**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

FERNANDO PEREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO DE ANÁLISE E DIAGNÓSTICO
DAS DESCARGAS PARCIAIS PARA IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS
NA CAMADA CONDUTIVA DE BARRAS ESTATÓRICAS PARA
HIDROGERADORES**

**SÃO PAULO
2019**

FERNANDO PEREIRA

DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO DE ANÁLISE E DIAGNÓSTICO DAS
DESCARGAS PARCIAIS PARA IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS NA CAMADA
CONDUTIVA DE BARRAS ESTATÓRICAS PARA HIDROGERADORES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Hédio Tatizawa.

Versão Corrigida

(versão original disponível na Biblioteca do Instituto de Energia e Ambiente e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP)

SÃO PAULO
2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Pereira, Fernando.

Desenvolvimento de método de análise e diagnóstico das descargas parciais para identificação de defeitos na camada condutiva de barras estatóricas para hidrogeradores. / Fernando Pereira; orientador: Hédio Tatizawa. – São Paulo, 2019. 207f.: il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Descargas parciais. 2. Semicondutores. 3. Geração de energia elétrica. I. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

Nome: Fernando Pereira

Título: Desenvolvimento de método de análise e diagnóstico das descargas parciais para identificação de defeitos na camada condutiva de barras estatóricas para hidrogeradores.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____

Presidente _____ Assinatura: _____

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado saúde para que conseguisse realizar esta prazerosa e desafiadora pesquisa. Também por ter me dado uma família maravilhosa e ter colocado na minha vida pessoas que de várias formas me ajudaram a concluir esta maravilhosa jornada.

Especialmente agradeço minha esposa Kelly Cristina Castiglioni Pereira por ter tido compreensão e generosidade em disponibilizar o nosso tempo juntos para que me dedicasse aos estudos, e além disso, com muito amor e carinho tem me dado inspiração e motivação para superar todos os obstáculos.

Aos meus pais que com grande amor dedicaram o seu tempo em me dar uma boa educação, ensinando com afinco os valores éticos e os preceitos cristãos, os quais foram a base para minha carreira profissional, acadêmica e social.

A empresa Voith Hydro e meus amigos que me proporcionaram a oportunidade de aprender com suas experiências e conhecimento na área de tecnologia de isolamento aplicado a hidrogeradores. Em especial, aos companheiros do laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento da tecnologia de isolamento por disponibilizar o seu tempo em cooperar com este interessante trabalho.

Ao Professor Doutor Hédio Tatizawa por me orientar nesta pesquisa com seu conhecimento, experiência e paciência. Também toda sua equipe do laboratório de alta tensão do IEE por me auxiliar na execução dos ensaios.

Ao FINEP que através da Chamada Pública MCTI/FINEP/FNDCT 02/2016 – PCNM, apoiou na implementação laboratorial no IEE.

RESUMO

PEREIRA, Fernando. **DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO DE ANÁLISE E DIAGNÓSTICO DAS DESCARGAS PARCIAIS PARA IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS NA CAMADA CONDUTIVA DE BARRAS ESTATÓRICAS PARA HIDROGERADORES.** 2019, 207f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um método de análise e diagnóstico das descargas parciais (DP) em barras estatóricas para hidrogeradores. O foco principal foi a identificação de defeitos na camada condutiva de ranhura (CCR) da isolamento de barras do tipo Roebel utilizando a técnica de medição de DP. CCR tem a função de realizar o contato elétrico de baixa resistência entre a superfície da isolamento da barra com a ranhura do núcleo estatórico do gerador prevenindo concentrações de campo elétrico e assim evitando a formação de descargas elétricas entre o núcleo e a isolamento da barra. Problemas de descargas elétricas de superfície na CCR de barras podem surgir durante a operação do gerador, estas produzem alta temperatura que poderá erodir a CCR e em alguns casos poderá levar a substituição da barra. Existem situações nas quais os defeitos são tão pequenos tornando difícil sua identificação por inspeção visual. Para abordar este problema foram intencionalmente confeccionados defeitos na CCR de barras projetadas para operarem na tensão nominal de 11 kVca. Defeitos com dimensões variadas e similares com uma situação real esperada foram realizados para simular possíveis danos mecânicos. As medições de DP foram realizadas para avaliar a condição da isolamento da barra, antes e após a introdução dos defeitos utilizando dois tipos de equipamento, um que mede em uma faixa de frequência entre 125 a 925 kHz e outro entre 40 a 400 MHz. Os ensaios foram realizados em vários níveis de tensões e em barras com diferentes tamanhos de defeitos na CCR. Foram avaliados três configurações de arranjo de eletrodos, um com o defeito exposto, no segundo foi colocado sobre o defeito uma placa metálica aterrada e para o terceiro arranjo foi posicionada uma placa metálica aterrada distanciada do defeito. Os resultados mostraram que a amplitude das DP não discrimina a barra com defeitos menores e iguais a $5 \times 10 \text{ mm}^2$, apresentando valores de DP muito similares da barra na condição anterior a introdução do defeito. Entretanto, a análise dos padrões produzidos pelas DP em função da tensão senoidal, que neste caso forneceu a predominância de polaridade positiva foram mais eficientes para identificar os defeitos na CCR. Comparando os arranjos de eletrodos que utilizaram placa aterrada em contato ou distanciada de 1 mm em relação ao defeito na CCR, os valores de DP diminuíram abruptamente durante o tempo de condicionamento em 1 minuto em 11 kVca, o qual não ocorreu no arranjo de eletrodo onde o defeito na CCR estava exposto, este fenômeno provavelmente é devido a ionização do ar entre o defeito e a placa metálica. Em resumo, o método de diagnóstico e análise desenvolvido nesta pesquisa mostrou que o equipamento de medição de DP em baixa frequência ou frequência muito alta utilizando o arranjo de eletrodos onde o defeito está exposto, ou seja, diferentemente do recomendado pelas normas, e selecionando uma tensão de teste adequada, poderá ser aplicado na identificação de defeitos na CCR de barras como controle de qualidade da fabricação em larga escala de barras estatóricas.

Palavras-chave: Descargas Parciais, camada condutiva de ranhura, barras estatóricas, hidrogeradores.

ABSTRACT

PEREIRA, Fernando. DEVELOPMENT OF DIAGNOSTIC AND ANALYSIS METHOD OF PARTIAL DISCHARGES ON IDENTIFICATION OF HYDROGENERATORS STATOR BARS SEMICONDUCTING SLOT COATING DEFECTS. 2019, 207f. Master's Dissertation – Energy Graduate Program, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

The purpose of this research was development of diagnostic and analysis method of partial discharges (PD) in hydro generators stator bars, the focus was on identification of semiconducting slot coating (SSC) defects of Roebel stator bars insulation by using partial discharges technique. SSC has the function to perform a low resistance electrical contact between the insulation surface and stator core slot, which prevent electrical field concentrations and then avoiding the formation of electrical discharges between the stator core and bar's insulation. Problems of electrical discharges on the surface on the SSC of stator bars can appear during the generator operation, they produce high temperature that can erode the SSC, in some cases this problem could lead to a stator bar replacement. In some situations, the defects are too small that is difficult to identify by visual inspection. To address this problem, bars designed to operate at 11 kVac received in their SSC some defects. The defects with different sizes and similar from those expected in real situation were performed to simulate possible mechanical damages. PD measurements performed to assess the condition of the stator bar insulation, before and after the introduction of defects on SSC by using two types of PD equipment, one has a frequency range from 125 to 925 kHz and another in the range of 40 to 400 MHz. The tests were carried it out in different voltages level in a set of stator bars with several size of defects on SSC. Three configurations of electrodes have been evaluated, one with the SSC defect uncovered, the second one with a grounded metallic plate in direct contact with it and the last one with a grounded metallic plate away from the surface by one millimeter. The obtained results showed that small SSC defects, equal and less than 5 x 10 mm² size, presented PD values very similar to the same bar before the introduction of the defect, however, the PD phase pattern analyses, which provided the positive predominance polarity was more efficient to identify the SSC defects. Comparing the simulated slot with grounded plates in contact or with a gap of 1 millimeter from de SSC defect, the PD values decreased abruptly during the conditioning time at 11 kVac, which did not occurred in the uncovered setup, this phenomena is likely due to ionization of the air between the defect and grounded metallic plate. In summary, the diagnostic and analysis method developed in the research showed that low or very high frequency PD equipment with uncovered setup instead of simulated slot recommended by standards and choosing a suitable test voltage can be used on the identification of stator bars SSC defects during the stator bar manufacturing quality control tests in large scale.

Key words: Partial Discharges, Semiconducting slot coating, stator bars, hydrogenerators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Principais componentes de um hidrogerador	8
Figura 2.2 – Barra estatórica equipada com suas proteções de corona, camada condutiva de ranhura (CCR) e luva anticorona (LA)	9
Figura 2.3 - Barras estatóricas que apresentaram danos severos na CCR com suas tensões de operação indicadas	10
Figura 2.4 - Barra estatórica removida do estator que apresentou danos severos na CCR.	11
Figura 2.5 – Instalação de barras estatóricas nas ranhuras do estator do gerador	12
Figura 2.6 – Representação de uma barra estatórica com a isolação exposta dentro de uma ranhura do estator.....	13
Figura 2.7 – Duas barras estatóricas (A e B) com um defeito na CCR exposto as condições do ambiente da câmara climática.	16
Figura 2.8 – Mapas estatísticos dos pulsos de DP plotados em função da tensão senoidal medido em 8 kV e com umidade absoluta de 9 g/m^3 na barra estatórica B, em 28°C (esquerda) e em 85°C (direita).	16
Figura 3.1 – Processo de avalanche de elétrons iniciado a partir de um eletrodo negativo a) Início. b) Formação de um par de elétrons – Impacto de um elétron com um átomo neutro libera um elétron adicional e deixa um íon positivo para trás. c) Multiplicação – Os elétrons se movem criando íons positivos quando se multiplicam.	18
Figura 3.2 – (a) Barra Roebel com diversas cavidades; (b) Circuito equivalente	20
Figura 3.3 – Tensões e correntes no circuito equivalente das descargas parciais	21
Figura 3.4 - Seção Transversal de uma barra inserida na ranhura onde Descargas Parciais podem ocorrerem em sua superfície.....	22
Figura 3.5 – Circuito equivalente simplificado para uma barra com CCR	22
Figura 3.6 – Pulso de uma descarga parcial medida através da variação da corrente no tempo com pico em 2,5 nano-segundos	24
Figura 3.7 – Circuito de medição de descargas parciais.....	25
Figura 3.8 – Exemplo de gráfico linear de altura dos pulsos representando os parâmetros Q_m e NQN	27
Figura 3.9 - Exemplo de um mapa de distribuição de DP em 2D: a) Descargas Externas na superfície; b) Descargas internas na isolação.....	28
Figura 3.10 – Circuito elétrico equivalente em série para um sistema de isolação com uma perda dielétrica.	29
Figura 3.11 – Diagrama vetorial do circuito elétrico equivalente em série para um sistema de isolação com uma perda dielétrica.....	30

Figura 3.12 – Exemplo de um gráfico dos resultados das medições do FD em % em função da tensão de teste mostrando que a maior variação do FD foi encontrada entre as tensões de teste de 0,4 e 0,6 Un.	31
Figura 4.1 – Dimensões principais do comprimento da barra estatórica #1 utilizada como objeto de teste nas medições de Descargas Parciais em baixa frequência.....	34
Figura 4.2 – Dimensões da seção transversal do centro da barra estatórica #1 utilizada como objeto de teste nas medições de Descargas Parciais em baixa frequência.....	34
Figura 4.3 – Dimensões principais do comprimento da barra estatórica #2 utilizada como objeto de teste nas medições de Descargas Parciais em frequência muito alta.....	35
Figura 4.4– Dimensões da seção transversal do centro da barra estatórica #2 utilizada como objeto de teste nas medições de Descargas Parciais em frequência muito alta.....	35
Figura 4.5 - Fotos mostrando a face larga da barra estatórica #2 com defeitos na CCR de várias dimensões (Altura x Largura) e seus respectivos perímetros (P).	36
Figura 4.6 – Arranjo experimental esquemático 1) Barra estatórica; 2) Proteção de corona CCR; 3) Proteção de corona LA; 4) Terminal da barra estatórica; 5) Fonte de alta tensão; 6) Capacitor de Acoplamento de 1 nF; 7) Impedância de medição; 8) Cabos Coaxiais; 9) Analisador de DP; 10) Computador; 11) Aterramento da superfície da barra; 12) Filtro Indutivo.....	37
Figura 4.7 – Arranjo experimental 1) Barra estatórica; 2) Fonte de alta tensão; 3) Capacitor de Acoplamento de 1 nF; 4) Impedância de medição; 5) Cabos Coaxiais; 6) Eletrodo de Aterramento da superfície da barra; 7) Filtro indutivo.	38
Figura 4.8 – Filtro indutivo conectado entre a fonte de tensão e o capacitor de acoplamento.	38
Figura 4.9 – Capacitor de acoplamento de 1 nF utilizado na medição de DP em baixa frequência.	39
Figura 4.10 – Impedância de medição utilizada no sistema de medição de DP em baixa frequência.	40
Figura 4.11 – Equipamento de medição das Descargas Parciais (fabricante Haefely) – 1) Analisador de DP; 2) Computador; 3) Visualização do programa de análise e registro das DP.....	41
Figura 4.12 – Parâmetros configurados no programa do sistema de medição de DP em baixa frequência.	42
Figura 4.13 – Arranjo experimental esquemático 1) Barra estatórica; 2) Proteção de corona CCR; 3) Proteção de corona LA; 4) Terminal da barra estatórica; 5) Fonte de alta tensão; 6) Capacitor de Acoplamento de 1 nF; 7) Impedância de medição; 8) Cabos Coaxiais; 9) Analisador de DP; 10) Computador;	

11) Aterramento da superfície da barra; 12) Filtro Indutivo; 13) Injetor de pulso de calibração.	43
Figura 4.14 – Arranjo experimental ilustrando a localização da conexão do injetor de pulsos.	43
Figura 4.15 – Injetor de pulso utilizado para a calibração do circuito de medição de Descargas Parciais (configurado para gerar pulsos de 500 pC)	44
Figura 4.16 – Tela do programa de aquisição de dados mostrando os pulsos de calibração e o sistema já calibrado com 500 pC.	45
Figura 4.17 – Ilustração do método de análise dos mapas de distribuição estatístico dos pulsos de DP em relação à Fase (PRPD) para definição da predominância de polaridade. Na parte superior é apresentado um exemplo de PRPD e na parte inferior foi acrescentado, no mesmo PRPD, as linhas auxiliares para definição da amplitude dos maiores e mais representativos pulsos positivo e negativo que serão utilizados para definição da predominância de polaridade e sua razão. Os pulsos dispersos e não considerados na análise foram demarcados com um círculo no PRPD.	47
Figura 4.18– Arranjo experimental esquemático 1) Barra estatórica; 2) Proteção de corona CCR; 3) Proteção de corona LA; 4) Terminal da barra estatórica; 5) Fonte de alta tensão; 6) Capacitor de Acoplamento de 80 pF (Mede os pulsos de DP provenientes da Barra); 7) Capacitor de acoplamento do sistema de 80 pF (Mede o ruído proveniente da fonte de alta tensão); 8) Cabo de Alta tensão blindado de 3 metros de comprimento; 9) Cabos Coaxiais 10) Analisador de DP; 11) Computador; 12) Aterramento da superfície da barra.....	48
Figura 4.19 – Arranjo experimental 1) Barra estatórica; 2) Proteção de corona CCR; 3) Proteção de corona LA; 4) Terminal da barra estatórica; 5) Conexão com a Fonte de alta tensão; 6) Capacitor de Acoplamento (Mede os pulsos de DP provenientes da Barra); 7) Capacitor de acoplamento do sistema (Elimina o ruído proveniente da fonte de alta tensão); 8) Cabo de Alta tensão blindado de 3 metros de comprimento; 9) Cabos Coaxiais os quais conectados ao analisador de DP; 10) Aterramento da superfície da barra;.....	49
Figura 4.20 – Capacitor de acoplamento de 80 pF utilizado na medição de DP em frequência muito alta.	50
Figura 4.21 – Capacitor de acoplamento do sistema de 80 pF utilizado na medição de DP em frequência muito alta.	50
Figura 4.22 – Equipamento de medição das Descargas Parciais (fabricante IRIS POWER) – 1) Analisador de DP; 2) Computador; 3) Software de análise e registro das DP.	51
Figura 4.23 –Exemplo de mapa de distribuição estatístico dos pulsos de DP em relação à Fase (PRPD) com predominância de polaridade positiva de razão aproximada de 1,8.	53
Figura 4.24 – Exemplo de gráfico linear de altura dos pulsos de DP com predominância de polaridade positiva de razão aproximada de 2,3.....	54

Figura 4.25 – Arranjo experimental esquemático utilizado na medição do fator de dissipação dielétrica da barra estatórica.....	55
Figura 4.26 – Arranjo experimental utilizado na medição do fator de dissipação dielétrica da barra estatórica: 1) Barra estatórica; 2) Fonte de alta tensão; 3) Capacitor padrão; 4) Anéis de guarda; 5) Cabos Coaxiais blindado Cn; 6) Cabos Coaxiais blindado Cx; 7) Filtro indutivo; 8) Base metálica.	56
Figura 4.27 – Capacitor padrão de 100 pF utilizado na medição do fator de dissipação dielétrica.	57
Figura 4.28 – Anel de guarda aplicado em uma das extremidades da CCR da barra estatórica, este está distanciado de aproximadamente 200 mm da base metálica.....	57
Figura 4.29 – Equipamento de medição do Fator de Dissipação Dielétrica (Modelo 2840 – Fabricante Haefely).....	58
Figura 5.1 – Fluxograma do plano de teste da Etapa 1.....	60
Figura 5.2 – Fluxograma do plano de teste da Etapa 2.....	60
Figura 5.3 – Fluxograma do plano de teste da Etapa 3.....	61
Figura 5.4 – Gráfico dos resultados das medições do FD em % em função da tensão de teste.	62
Figura 5.5 – Gráfico dos resultados das medições de capacitância em pF em função da tensão de teste.	63
Figura 5.6 – Fluxograma da sequência das medições de DP.....	64
Figura 5.7 – Níveis de tensão e duração para cada medição de Descargas Parciais (Un=11 kV)	65
Figura 5.8 – Exemplo de gráfico da amplitude das descargas parciais Qiec (linha contínua) e tensão de teste (linha tracejada), ambos em função do tempo (eixo horizontal) utilizado para identificação da tensão de início de DP.....	66
Figura 5.9 – Gráfico das tensões de início de DP para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura.....	67
Figura 5.10 – PRPD da medição do ruído de fundo do circuito de medição de DP na tensão de teste em 2 kV utilizando a barra na condição sem defeito.	68
Figura 5.11 – Gráfico amplitudes de DP (Qiec) para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura (escala do eixo y ampliada).....	70
Figura 5.12 – Gráfico amplitudes de DP (Qiec) para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura (escala do eixo y reduzida).....	70
Figura 5.13 – Alguns exemplos de PRPD provenientes das medições de DP em 7 kV da barra na condição sem e com defeitos mostrando como a razão da predominância de polaridade foi determinada.	73
Figura 5.14 – Alguns exemplos de PRPD provenientes das medições de DP em 11 kV da barra na condição sem e com defeitos mostrando como a razão da predominância de polaridade foi determinada.	75
Figura 5.15 – Alguns exemplos de PRPD provenientes das medições de DP em 15 kV da barra na condição sem e com defeitos mostrando como a razão da predominância de polaridade foi determinada.	77

Figura 5.16 – Alguns exemplos de PRPD provenientes das medições de DP em 20 kV da barra na condição sem e com defeitos mostrando como a razão da predominância de polaridade foi determinada.	79
Figura 5.17 – Arranjo de eletrodo TIPO A utilizado na medição de DP em baixa frequência.....	82
Figura 5.18 – Arranjo de eletrodo TIPO B utilizado na medição de DP em baixa frequência.....	82
Figura 5.19 – Arranjo de eletrodo TIPO C utilizado na medição de DP em baixa frequência.....	83
Figura 5.20 – Gráfico dos resultados de Qiec das três medições consecutivas utilizando diferentes arranjos de eletrodo. A tensão de teste utilizada foi de 7 kV.	85
Figura 5.21 – Gráfico dos resultados de Qiec das três medições consecutivas utilizando diferentes arranjos de eletrodo. A tensão de teste utilizada foi de 11 kV.	85
Figura 5.22 – PRPD provenientes das medições de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm ² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A.	87
Figura 5.23 – PRPD provenientes das medições de DP em 11 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm ² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A.	88
Figura 5.24 – PRPD provenientes das medições de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm ² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO B.....	89
Figura 5.25 – PRPD provenientes das medições de DP em 11 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm ² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO B.....	90
Figura 5.26 – PRPD provenientes das medições de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm ² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO C.....	91
Figura 5.27 – PRPD provenientes das medições de DP em 11 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm ² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO C.....	92
Figura 5.28 – PRPD proveniente da medição de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm ² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A com tempo de registro dos pulsos de DP de 1 minuto.	94
Figura 5.29 – PRPD proveniente da medição de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm ² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A com tempo de registro dos pulsos de DP de 2 minutos.....	94
Figura 5.30 – PRPD proveniente da medição de DP em 11 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm ² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A com tempo de registro dos pulsos de DP de 1 minuto.	95
Figura 5.31 – PRPD proveniente da medição de DP em 11 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm ² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A com tempo de registro dos pulsos de DP de 2 minutos.....	95
Figura 5.32 – PRPD proveniente da medição de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm ² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A com tempo de registro dos pulsos de DP de 1 minuto e sem limite mínimo de DP...	97

Figura 5.33 – PRPD proveniente da medição de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm ² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A com tempo de registro dos pulsos de DP de 1 minuto e com limite mínimo de DP de 50 pC.....	97
Figura 5.34 – Barra estatórica com defeito de 20x40 mm ² na camada condutiva de ranhura	98
Figura 5.35 – Barra estatórica após reparo do defeito de 20x40 mm ² na camada condutiva de ranhura utilizando a pintura condutiva.....	98
Figura 5.36 – PRPD proveniente da medição de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm ² na CCR utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A.	100
Figura 5.37 – PRPD proveniente da medição de DP em 7 kV da barra na condição após reparo do defeito 20x40 mm ² na CCR utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A.....	100
Figura 5.38 – PRPD proveniente da medição de DP em 11 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm ² na CCR utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A.	101
Figura 5.39 – PRPD proveniente da medição de DP em 11 kV da barra na condição após reparo do defeito 20x40 mm ² na CCR utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A.....	101
Figura 5.40 – Arranjo experimental utilizado para registro das imagens UV mostrando o posicionamento das câmeras 1) Barra estatórica, 2) Fonte de alta tensão, 3) Câmera fotográfica, 4) Câmera CoroCAM I e 5) Localização do defeito na CCR.....	102
Figura 5.41 –Imagens da região do defeito na CCR – Primeira foto com a câmera no modo de exposição desligado e as seguintes com o modo de exposição ligado na tensão de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.....	104
Figura 5.42 – Imagens da região do defeito na CCR – Primeira foto com a câmera no modo UV desligado e as seguintes com o modo UV ligado na tensão de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.....	105
Figura 5.43 – Gráfico dos resultados das medições do FD em % em função da tensão de teste.	107
Figura 5.44 – Gráfico dos resultados das medições de capacitância em pF em função da tensão de teste.	107
Figura 5.45 – Fluxograma da sequência das medições de DP.....	108
Figura 5.46 – Mapa de distribuição estatístico dos pulsos de DP em relação à Fase (PRPD) do ruído de fundo do circuito de medição em Frequência Muito Alta medido na tensão de teste em 2 kV.....	109
Figura 5.47 – Gráfico amplitudes de DP (+Qm) para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura nas tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.....	111
Figura 5.48 – PRPD proveniente das três medições de DP em 11 kV da barra na condição sem defeito.....	114

Figura 5.49 – PRPD proveniente das três medições de DP em 11 kV da barra na condição com defeito 1x2 mm ²	115
Figura 5.50 – PRPD proveniente das três medições de DP em 11 kV da barra na condição com defeito 5x10 mm ²	116
Figura 5.51 – PRPD proveniente das três medições de DP em 11 kV da barra na condição com defeito 10x20 mm ²	117
Figura 5.52 - PRPD proveniente das três medições de DP em 11 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm ²	118
Figura 5.53 – Gráfico do Número de Quantidade Normalizada (+NQN) para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura nas tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.	120
Figura 5.54 – Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 11 kV da barra na condição sem defeito.	123
Figura 5.55 - Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 11 kV da barra na condição de defeito 1x2 mm ²	124
Figura 5.56 – Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 11 kV da barra na condição de defeito 5x10 mm ²	125
Figura 5.57 – Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 11 kV da barra na condição de defeito 10x20 mm ²	126
Figura 5.58 – Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 11 kV da barra na condição de defeito 20x40 mm ²	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resposta dos instrumentos de medição de Descargas Parciais a trem de pulso.....	15
Tabela 3.1 – Influência da umidade relativa do ar na tensão de extinção das DPs e amplitude das DPs medidas a 10 % da tensão de início das DPs em um vão de ar de 3 mm.....	26
Tabela 4.1 – Características principais do sistema de medição de DP em baixa frequência.....	41
Tabela 4.2 – Características principais do sistema de medição de DP em frequência muito alta.....	51
Tabela 5.1 – Resultados das medições de Fator de Dissipação medido na barra estatórica #1.....	62
Tabela 5.2 – Tabela das tensões de início de DP para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura.....	67
Tabela 5.3 – Tabela das amplitudes de Descargas Parciais (Qiec em pC) para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura nas tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.	69
Tabela 5.4 – Tabela das razões aproximadas da predominância de polaridade das medições de Descargas Parciais para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura nas tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.	71
Tabela 5.5 – Tabela dos resultados das amplitudes de DP (Qiec) obtidos das três medições consecutivas da barra com maior defeito variando apenas o tipo de arranjo de eletrodos.....	84
Tabela 5.6 – Tabela das razões aproximadas da predominância de polaridade das medições de Descargas Parciais para a barra com defeito de 20x40 mm ² na CCR nas tensões de teste de 7 e 11 kV.....	86
Tabela 5.7 – Tabela das amplitudes e razões aproximadas da predominância de polaridade das medições de Descargas Parciais da barra com defeito 20x40 mm ² na tensão de teste de 7 e 11 kV, variando o tempo de registro das DP em 1 e 2 minutos.	93
Tabela 5.8 – Tabela amplitudes de DP (Qiec) e razão aproximada da predominância de polaridade para a barra com defeito de 20x40 mm ² na CCR, tensão de teste de 7 kV, com e sem limite mínimo de leitura da medição de DP.....	96
Tabela 5.9 – Tabela das razões aproximadas da predominância de polaridade das medições de Descargas Parciais para a barra com defeito de 20x40 mm ² na CCR nas tensões de teste de 7 e 11 kV.....	99
Tabela 5.10 – Resultados das medições de FD medido na barra estatórica #2.....	106
Tabela 5.11 – Tabela das amplitudes de Descargas Parciais (Qm em mV) para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura nas tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.	110

Tabela 5.12 – Tabela das razões aproximadas da predominância de polaridade das medições de Descargas Parciais para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura nas tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.	112
Tabela 5.13 – Tabela das amplitudes de Descargas Parciais (NQN) para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura nas tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.	119
Tabela 5.14 – Tabela das razões aproximadas da predominância de polaridade das medições de Descargas Parciais (+NQN / -NQN) para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura nas tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.	121
Tabela 5.15 – Tabela resumo comparando os dois sistemas de medição de DP (Baixa frequência e Frequência muito alta) em relação a identificação dos defeitos na CCR de barras estatóricas.	129

LISTA DE SIGLAS

CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Électriques.
CCR	Camada Condutiva de Ranhura.
DP	Descarga Parcial.
FD	Fator de Dissipação Dielétrica.
IEC	International Electrotechnical Commission.
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers.
Qiec	Carga Aparente em picocoulomb conforme norma IEC 60270.
Qm	Maior amplitude associada com um pulso de DP com taxa de repetição de 10 pulsos por segundo (pps) em milivolt conforme norma IEEE.
NQN	Normalized Quantity Number.
PRPD	Phase Resolved Partial Discharges.
BF	Baixa Frequência.
FMA	Frequência Muito Alta.
LA	Luva anticorona.
PDIV	Partial Discharge Inception Voltage.

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	graus Celsius
pC	picocoulomb
mV	milivolt
kV	quilovolt
Hz	hertz
kHz	quilohertz
MHz	megahertz
Ω	ohm
pF	picofarad
g/m ³	gramas por metro cúbico
mm	milímetro
mm ²	milímetro quadrado
mA	miliampère

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 Objetivo geral	2
1.2.2 Objetivos específico	2
1.3 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	3
1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE NA UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE DESCARGAS PARCIAIS APLICADA NO CONTROLE DE QUALIDADE DA FABRICAÇÃO DE BARRAS E BOBINAS ESTATÓRICAS	3
1.5 DISCUSSÃO E CONTRIBUIÇÕES	6
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	7
2 HIDROGERADOR	8
2.1 ASPECTOS GERAIS DE UM HIDROGERADOR	8
2.2 PROTEÇÕES DE CORONA APLICADOS EM BARRAS E BOBINAS ESTATÓRICAS	8
2.3 PROBLEMAS NA CAMADA CONDUTIVA DE RANHURA DE BARRAS E BOBINAS ESTATÓRICAS	10
2.3.1 Durante a operação do gerador	10
2.3.2 Possíveis origens dos defeitos mecânicos na CCR que podem ocorrer durante o processo de fabricação e instalação das barras e bobinas estatóricas	12
2.4 MECANISMO DE DEGRADAÇÃO DA CAMADA CONDUTIVA DE RANHURA	13
2.5 EFEITO DA TEMPERATURA E UMIDADE NAS DESCARGAS DE SUPERFÍCIES	14
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	17
3 DESCARGAS PARCIAIS	18
3.1 PROCESSO FÍSICO DAS DESCARGAS PARCIAIS	18
3.2 TIPOS DAS DESCARGAS PARCIAIS EM ENROLAMENTOS ESTATÓRICOS	19
3.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DA DESCARGA PARCIAL EM UMA CAVIDADE	19

3.4	CIRCUITO EQUIVALENTE DE DESCARGA NA SUPERFÍCIE DA BARRA	21
3.5	MÉTODOS DE DETECÇÃO DAS DESCARGAS PARCIAIS.....	23
3.6	PULSO ELÉTRICO DAS DESCARGAS PARCIAIS	24
3.7	DETECÇÃO DO PULSO ELÉTRICO DAS DESCARGAS PARCIAIS PELO MÉTODO ELÉTRICO	25
3.8	GRANDEZAS ASSOCIADAS À MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS	26
3.9	FATOR DE DISSIPAÇÃO DIELÉTRICA	28
3.9.1	Procedimento para a medição do fator de dissipação dielétrica	30
3.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	31
4	METODOLOGIA	33
4.1	OBJETO DE TESTE	33
4.2	ARRANJO EXPERIMENTAL (BAIXA FREQUÊNCIA)	37
4.2.1	Componentes do sistema de medição de Descargas Parciais	38
4.2.2	Procedimento de calibração na medição de Descargas Parciais.....	42
4.2.2.1	Circuito de calibração	42
4.2.2.2	Injetor de pulso	44
4.2.2.3	Procedimento de calibração	45
4.2.3	Tratamento dos dados	46
4.2.3.1	Predominância de polaridade	46
4.3	ARRANJO EXPERIMENTAL (FREQUÊNCIA MUITO ALTA).....	48
4.3.1	Componentes do sistema de medição de Descargas Parciais	49
4.3.2	Tratamento dos dados	52
4.3.2.1	Predominância de polaridade	52
4.4	ARRANJO EXPERIMENTAL (FATOR DE DISSIPAÇÃO DIELÉTRICA).....	54
4.4.1	Componentes do sistema de medição do fator de dissipação dielétrica.	56
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	58
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	59
5.1	HIPÓTESES A SEREM TESTADAS.....	59
5.2	PLANOS DE TESTES.....	59
5.3	RESULTADOS DOS TESTES	61

5.3.1	Etapa 1 – Medição do fator de dissipação dielétrica (Tangente delta) ..	61
5.3.3	Etapa 2 – Medição das Descargas Parciais (Baixa Frequência) com diferentes eletrodos de aterramento	81
5.3.3.1	Etapa 2 – Comparação do tempo de registro das Descargas Parciais (Baixa Frequência) com eletrodo de aterramento TIPO A.....	93
5.3.3.2	Etapa 2 – Comparação do limite mínimo de leitura na medição das Descargas Parciais (Baixa Frequência) com eletrodo de aterramento TIPO A..	96
5.3.3.3	Etapa 2 – Comparação da Medição das Descargas Parciais (Baixa Frequência) com eletrodo de aterramento TIPO A antes e após reparo do defeito 20x40 mm ² na CCR da barra estatórica.	98
5.3.4	Registro das imagens ultravioleta (UV) das descargas superficiais na região do defeito na CCR (Defeito com dimensão de 20x40 mm ²).....	102
5.3.5	Etapa 3 – Medição do fator de dissipação dielétrica (Tangente delta)	106
5.3.6	Etapa 3 – Medição de descargas parciais em Alta Frequência.....	108
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	128
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	130
6.1	CONCLUSÕES	130
6.2	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO.....	132
6.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	132
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
	APÊNDICE A – ELABORAÇÃO DO DEFEITO NA CAMADA CONDUTIVA DE RANHURA.....	137
	APÊNDICE B – PRPD OBTIDOS NA MEDIÇÃO EM BF	138
	APÊNDICE C – PRPD OBTIDOS NA MEDIÇÃO EM FMA	158
	APÊNDICE D – GRÁFICO LINEAR DE ALTURA DE PULSOS OBTIDOS NA MEDIÇÃO EM FMA	173

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

A técnica de medição de DP [1, 2 e 3] é utilizada na indústria como teste de controle da qualidade da isolação de barras estatóricas de Hidrogeradores. Entretanto, a interpretação dos resultados da medição de Descargas Parciais ainda não é totalmente dominada pela comunidade científica. Após a fabricação de cada barra estatórica, esta é submetida a diversos ensaios elétricos para avaliação da qualidade de sua isolação, tais como: Fator de dissipação dielétrica e Capacitância [4, 5], Tensão aplicada [6, 7], Corona visual ou com auxílio de câmera ultravioleta [8], além da medição de Descargas Parciais.

Especificamente para o ensaio de Descargas Parciais, a avaliação da qualidade da isolação de barras estatóricas atualmente é realizada considerando somente o valor (amplitude) da carga aparente Q_{iec} dada em picocoulombs [1] ou Q_m dada em milivolt [2], ou seja, não existe nenhuma avaliação mais abrangente, como por exemplo, a interpretação dos padrões de Descargas Parciais em relação à forma de onda da tensão alternada aplicada, a qual poderia contribuir para a determinação da origem das Descargas Parciais produzidas por determinada barra estatórica com defeitos [9].

A motivação principal do presente trabalho é aprimorar a utilização da técnica de Descargas Parciais como ferramenta de controle da qualidade da fabricação de barras estatóricas. Os defeitos no sistema de isolação podem ser de origem interna ou externa, sendo que os defeitos internos na isolação são diagnosticados globalmente pela técnica de Fator de dissipação dielétrica, entretanto esta técnica não é muito sensível a defeitos externos ou localizados [10].

Os métodos utilizados pela indústria para identificar defeitos externos são: 1) Inspeção Visual, 2) Teste de Corona com auxílio de câmera ultravioleta ou visualmente em ambiente escuro e 3) Descargas Parciais. Entretanto, os métodos 1) e 2) demandam um acesso total de todo o comprimento da barra em ambas as faces e também são extremamente dependentes da experiência do técnico que está realizando os testes e, portanto, um defeito poderia não ser

identificado. Assim sendo, a utilização da técnica de Descargas Parciais torna-se essencial no controle de qualidade das barras estatóricas.

Outro ponto importante é que se tais barras estatóricas com defeitos externos na camada condutiva de ranhura forem instaladas no gerador, tais defeitos serão propagados e ampliados durante o seu funcionamento, produzindo assim descargas superficiais. Estas descargas degradarão as proteções de corona levando em alguns casos extremos numa futura substituição da barra. Como os custos de parada do gerador para tal manutenção são elevados, tais defeitos devem ser evitados.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem o objetivo de estudar as grandezas e parâmetros da técnica de Descargas Parciais provenientes de medições realizadas em barras estatóricas as quais propositalmente foram fabricadas com defeitos conhecidos em seu sistema de isolamento. Conhecendo e correlacionando as assinaturas (padrões) de Descargas Parciais para cada defeito, será possível utilizar este conhecimento para controle da qualidade na fabricação de barras e bobinas estatóricas em larga escala.

1.2.2 Objetivos específico

O problema a ser estudado tem basicamente três objetivos específicos, os quais são:

- 1) Correlacionar as assinaturas ou parâmetros da medição de Descargas Parciais de barras estatóricas com defeitos na camada condutiva de ranhura com o propósito de distinguir barras com defeitos na CCR de barras não defeituosas.
- 2) Comparar dois tipos de sistemas de medição de Descargas Parciais, um que utiliza uma faixa de medição em baixa frequência (125 kHz a 925 kHz) e outro que mede em frequência muito alta (40 MHz a 400 MHz). À medição em baixa frequência é muito utilizada em

ambientes de baixo ruído como laboratórios, por outro lado à medição em frequência muito alta é utilizada frequentemente em medições em campo onde o nível de ruído é mais alto.

3) Verificar a influência do arranjo de eletrodos nos resultados das medições de Descargas Parciais.

1.3 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Esta pesquisa foi delimitada à análise de defeitos na camada condutiva de ranhura de barras estatóricas através da técnica de Descargas Parciais. Foram utilizadas barras estatóricas projetadas para operarem em geradores com tensão nominal de 11 kVca e suas camadas condutivas de ranhura eram compostas por fita aplicada nas barras já isoladas e antes do processo de impregnação a vácuo.

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ESTADO DA ARTE NA UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE DESCARGAS PARCIAIS APLICADA NO CONTROLE DE QUALIDADE DA FABRICAÇÃO DE BARRAS E BOBINAS ESTATÓRICAS

Uma das primeiras aplicações da técnica de DP em máquinas rotativas, provavelmente foi durante a década de 40 [11, 12 e 13]. Isto foi motivado pelo grande número de falhas dos enrolamentos, principalmente na região da ranhura onde as barras ou bobinas estatóricas apresentavam descargas de ranhura após poucos anos de operação. As fontes das descargas de ranhura poderiam ter basicamente três origens [14]:

- Barras frouxas na ranhura – Onde a vibração da barra dentro da ranhura desgastava e destruía a camada condutiva e a isolamento da mesma;
- Fabricação deficiente da camada condutiva – ocorre quando a camada condutiva de ranhura não cumpre sua função devido à alta resistência superficial inicial ou aplicação deficiente da camada sobre a isolamento da barra;

- Contato não adequado entre a camada condutiva e a ranhura – quando a barra não está devidamente aterrada devido a presença de um filme isolante ou pela utilização de sistema isolante de fixação que está entre a camada condutiva e o núcleo estatórico.

Existe uma certa dificuldade em determinar qual destes três processos iniciou a descarga de ranhura, além de sua aparência ser similar, um processo pode eventualmente causar o outro. Independentemente do tipo de defeito de ranhura, descargas elétricas de superfície eram geradas e consequentemente, poderiam ser detectadas pelo sistema de monitoramento das Descargas Parciais durante a operação da máquina elétrica rotativa antes da ruptura total do sistema de isolamento, evitando um dano de extensão maior o qual poderia levar a longas paradas de máquina para realizar a recuperação deste enrolamento estatórico danificado [15].

Após algum tempo iniciou-se a aplicação da técnica de descargas parciais no controle de qualidade do processo de fabricação de enrolamento estatóricos e também em componentes do mesmo, como por exemplo, barras e bobinas estatóricas. Historicamente, a utilização da técnica de medição do fator de dissipação dielétrica (tangente delta) foi largamente utilizada para avaliar a eficácia do processo de impregnação e cura da isolamento na fabricação de barras e bobinas estatóricas [16]. Entretanto a partir de 1990 [17], a técnica de medição de Descargas Parciais começou a ser aplicada no processo de fabricação como ferramenta de controle de qualidade juntamente com a medição do fator de dissipação dielétrica (tangente delta).

No início de sua aplicação, alguns fabricantes de barras e bobinas estatóricas criaram o seu próprio banco de dados baseado em histórico de medições fazendo uma distribuição estatística dos resultados [18]. Da mesma forma, as companhias geradoras de energia começaram a especificar limites e critérios de aceitação para enrolamentos completos bem como para barras e bobinas estatóricas, em suas especificações técnicas [19]. Entretanto, devido à grande quantidade de variáveis envolvidas tais como: capacitor de acoplamento, método de calibração, características do instrumento de medição, tensão de teste, conexões do arranjo experimental, temperatura e umidade do ambiente de teste, propriedades e projeto do sistema de isolamento, torna-se complicado definir limites absolutos com o propósito de controlar a qualidade da fabricação de tais componentes [20].

No entanto, algumas propostas de metodologias para avaliação de barras e bobinas estatóricas utilizando Descargas Parciais têm sido publicadas, como por exemplo, a avaliação dos padrões de Descargas Parciais em ambiente de laboratório provenientes de DP internas e externas em 1995 [21], concluindo que um nível de descargas parciais poderia ser alto para um tipo de defeito e para outro tipo não seria tão severo para a isolação, propondo assim que deveria ser estabelecido um limite de amplitude de DP para cada tipo de defeito. De forma semelhante, um outro trabalho [9], que resumidamente propõe a avaliação dos pulsos de descargas parciais distribuídos em relação a forma de onda da tensão de teste, o qual utilizando um equipamento capaz de separar os pulsos de descargas parciais de cada defeito (descargas internas provenientes de pequenos vazios no interior da isolação das descargas externas advindas das proteções de corona). Com isso, a proposta de um critério de aceitação baseia-se que o componente a ser avaliado, barra ou bobinas estatóricas somente é permitido apresentar padrões de descargas parciais internas, advindos dos pequenos vãos de ar no interior da isolação os quais são intrínsecos a um sistema de isolação fabricado em um processo de impregnação a vácuo e sobre pressão. Caso exista um padrão de descargas parciais externas esta barra ou bobina seria reprovada.

No mercado, existem vários tipos de instrumentos de medição de Descargas Parciais utilizados em máquinas rotativas e em seus componentes como barras e bobinas estatóricas, em sua grande maioria utiliza capacitores para detectar os pulsos de corrente de Descargas Parciais na presença de tensão alternada (50/60 Hz), tal instrumentação mede os pulsos de corrente de DP o qual utiliza um conversor analógico para digital que determina o número, magnitude e posição na fase (em relação ao ciclo de corrente alternada 50/60 Hz) das Descargas Parciais.

Destacam-se duas famílias de instrumentos caracterizados pela sua faixa de frequência de medição como segue:

Baixa Frequência – (até 1 MHz conforme IEC 60270 [1]);

Frequência Muito Alta – (40 MHz a 350 MHz conforme IEEE 1434 [2]).

Os métodos elétricos de medição de Descargas Parciais podem ser divididos em subsistemas: dispositivo de acoplamento, sistema de transmissão (por exemplo, cabos e conexões) e o próprio sistema de medição. Basicamente a resposta em frequência do sistema

de medição de DP, incluindo a unidade de acoplamento, determina quanto da energia do sinal de DP será detectado [3].

À medição em baixa frequência de DP em barras e bobinas estatóricas é mais indicado por detectar a magnitude em mV do pulso de DP e converte-lo pelo processo de calibração em carga aparente em picocoulomb (pC). Esta unidade de carga (pC) é tradicionalmente utilizada para medição de DP pois o dano para a parte orgânica da isolação está relacionado ao número de elétrons durante o surgimento desta descarga, ou seja, a carga. Entretanto, à medição em frequência muito alta é muito utilizada em medições de DP em campo, pois neste tipo de ambiente os níveis de ruído são normalmente elevados [22].

1.5 DISCUSSÃO E CONTRIBUIÇÕES

A técnica de medição de DP tem sido utilizada como controle de qualidade de barras e bobinas estatóricas, entretanto devido a vários fatores citados anteriormente não foram estabelecidos limites de aceitação baseados na amplitude das Descargas Parciais que possam ser utilizados para discriminar uma barra com defeito de uma sem defeito. Também foi proposto por alguns autores uma avaliação qualitativa dos pulsos de DP plotados em função da tensão senoidal (PRPD), o qual dependendo do problema identificado pelo formato e pela predominância de polaridade do padrão, de forma somente qualitativa, este componente estaria aprovado ou rejeitado. Embora exista uma superioridade da avaliação dos pulsos de DP plotados em função da tensão senoidal em relação a amplitude da DP, tal avaliação não quantifica a predominância de polaridade e tão pouco avalia sua sensibilidade e reprodutibilidade com o tipo de defeito. Baseado nesta análise, o presente trabalho foi projetado para fornecer as seguintes contribuições descritas abaixo:

- a) Determinar a variabilidade da amplitude de Descargas Parciais na condição da barra sem e com defeito de diversos tamanhos na camada condutiva de ranhura (CCR);
- b) Estabelecer a sensibilidade das assinaturas de DP com o tamanho do defeito na CCR;
- c) Caracterizar os pulsos de DP plotados em função da tensão senoidal (PRPD), como por exemplo, a predominância de polaridade, na condição da barra sem e com defeito de diversos tamanhos na CCR;
- d) Comparar a eficiência dos sistemas de medição de Descargas Parciais em baixa e muito alta frequência para identificar defeitos na CCR;

- e) Entender a influência do arranjo de eletrodos nas amplitudes e assinaturas das Descargas Parciais provenientes de barras com defeito na CCR.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura da dissertação está dividida em 6 capítulos.

O capítulo 2 apresenta os aspectos gerais de um hidrogerador e seus principais componentes, como as barras e bobinas estatóricas e sua composição. Discorre sobre os problemas na CCR que podem ocorrer durante a operação do gerador bem como antes de sua instalação, ou seja, durante o processo de fabricação, manuseio e montagem. Discute o mecanismo de degradação da CCR, apresentando o seu modelo equivalente. Finalmente, avalia a influência da temperatura e umidade nos resultados das amplitudes das DP bem como na assinatura das DP plotadas em função da tensão senoidal (PRPD).

No capítulo 3 contém os conceitos físicos, tipos e pulso elétrico das DP. São mostrados os circuitos equivalentes da descarga em uma cavidade dentro da isolação e na superfície da barra, detalhando a sua detecção e as grandezas associadas na medição de DP. Também, apresenta a teoria e o procedimento de medição do fator de dissipação dielétrica.

O capítulo 4 apresenta a metodologia utilizada nesta pesquisa, bem como os objetos de teste, instrumentação e arranjos experimentais para a medição das Descargas Parciais e Fator de Dissipação Dielétrica, incluindo como foi realizado o tratamento dos dados.

No capítulo 5 foram apresentadas as hipóteses que motivaram a pesquisa. Também, os planos de testes em 3 etapas; na primeira etapa foi utilizado o sistema de medição de DP em BF, na segunda fixou-se o sistema de medição de DP e objeto de teste variando o arranjo de eletrodos e na terceira e última etapa foi realizado a medição de DP com o instrumento de FMA. Descreve e registra as imagens ultravioletas (UV) das descargas superficiais produzidas na região do defeito na CCR. Apresenta os resultados dos testes e análise dos mesmos provenientes das três etapas. Em adição, os PRPD principais são mostrados neste capítulo.

Finalmente, o capítulo 6 aborda as conclusões da pesquisa, bem como suas contribuições para a comunidade científica. Além de sugerir trabalhos futuros sobre o tema abordado nesta pesquisa.

2 HIDROGERADOR

2.1 ASPECTOS GERAIS DE UM HIDROGERADOR

O hidrogerador é uma máquina síncrona composta por uma parte estática denominada Estator (armadura) e por uma parte rotativa chamada Rotor (campo móvel) como ilustrado na Figura 1. Neste tipo de máquina, o enrolamento de campo é alimentado por uma fonte de corrente contínua através de dois anéis coletores e a armadura é ligada diretamente à carga [23]. No estator está o enrolamento estatórico o qual é composto por um grupo de barras ou bobinas estatóricas as quais são inseridas nas ranhuras do estator formando duas camadas conforme apresentado no detalhe a direita da Figura 2.1. A barra estatórica é formada por duas partes principais, uma é o feixe de fios de cobre e a segunda é a isolamento principal composta por camadas de fita de mica impregnadas com resina do tipo epóxi em um processo a vácuo sob pressão.

Figura 2.1 – Principais componentes de um hidrogerador.

Fonte: Voith Hydro (2018).

2.2 PROTEÇÕES DE CORONA APLICADOS EM BARRAS E BOBINAS ESTATÓRICAS

Como é impossível fabricar as barras e bobinas em um formato que se ajuste exatamente a ranhura do núcleo estatórico por todo o seu comprimento, inevitavelmente, vãos de ar surgirão entre a superfície da isolação da barra e a parede da ranhura, onde na condição

de operação do gerador, a diferença de potencial elétrico através destes vãos poderá exceder a rigidez dielétrica do ar e iniciar a ocorrência de descargas parciais entre a superfície da barra e a parede da ranhura do estator. Portanto, a CCR conforme a Figura 2.2, tem a função de mitigar estas descargas parciais realizando o contato elétrico entre a superfície da isolação da barra com a ranhura do núcleo estatórico do gerador que está aterrado, através de sua propriedade condutora, diminuindo o estresse elétrico dentro destes vãos de ar a um patamar abaixo da rigidez elétrica do ar [24].

A CCR é constituída basicamente de uma fita composta de falso tecido de poliéster impregnado com resina epóxi. Dopada com uma determinada quantidade de grafite. Sua resistividade superficial final, ou seja, após o processo de impregnação e cura da barra ou bobina não deveria exceder o limite de 25000 ohms por quadrado [25]. Normalmente a resistência superficial da CCR fica em torno de 0,2 a 10000 ohms por quadrado. Nota-se que a CCR não pode ser muito condutiva pois poderá curto circuitar as chapas do núcleo estatórico [24].

A luva anticorona (LA), conforme a Figura 2.2, tem a função de realizar uma distribuição adequada da tensão superficial entre a CCR (parte aterrada) e a parte da isolação da barra que está fora do núcleo do estatórico (parte energizada) evitando assim descargas elétricas superficiais.

Figura 2.2 – Barra estatórica equipada com suas proteções de corona, camada condutiva de ranhura (CCR) e luva anticorona (LA).

Fonte: Voith Hydro (2018).

2.3 PROBLEMAS NA CAMADA CONDUTIVA DE RANHURA DE BARRAS E BOBINAS ESTATÓRICAS

2.3.1 Durante a operação do gerador

Problemas na CCR de barras estatóricas ocasionados por descargas elétricas superficiais podem ocorrer durante a operação do gerador. Cada vez mais os sistemas de isolamento são projetados para operarem com níveis de estresse elétrico mais elevados. Como as resinas sintéticas utilizadas não são resistentes às descargas elétricas além de que em alguns casos as barras ou bobinas estatóricas não são bem fixadas na ranhura, então, estas podem ser submetidas a vibração, com isso a camada condutiva poderá ser deteriorada em poucos anos de funcionamento do gerador [26]. Como exemplo apresentado na Figura 2.3, onde barras estatóricas que operaram um certo tempo tiveram sua CCR deteriorada.

Figura 2.3 - Barras estatóricas que apresentaram danos severos na CCR com suas tensões de operação indicadas.

Fonte: Referência [26].

Além das descargas superficiais erodirem a CCR, estas também podem erodir a parte orgânica da isolação, como por exemplo, a resina de impregnação das camadas de mica como mostrado na Figura 2.4. Neste caso a barra foi removida de um gerador que operou por alguns anos [27].

Figura 2.4 - Barra estatórica removida do estator que apresentou danos severos na CCR.

Fonte: Referência [27].

As descargas elétricas superficiais geram uma grande quantidade de ozônio dentro do gerador. O ozônio é um dos agentes oxidantes mais potentes, pois sua reação com materiais oxidáveis como os ferrosos e poliméricos favorece a diminuição da concentração de ozônio. Além disso, as reações com outros contaminantes do ar também consomem ozônio através da oxidação. Este processo de reação pode ser acelerado em condições de temperaturas elevadas e umidade [28].

Nos casos ilustrados nas Figuras 2.3 e 2.4 onde o dano na CCR está dentro da ranhura, a única solução possível é a substituição da barra estatórica, o que acarreta uma parada longa de até algumas semanas do hidrogerador, gerando assim um custo elevado para a usina, como por exemplo, perda de receita financeira por não produzir energia elétrica.

2.3.2 Possíveis origens dos defeitos mecânicos na CCR que podem ocorrer durante o processo de fabricação e instalação das barras e bobinas estatóricas

Tais problemas podem ser causados por danos mecânicos durante a fabricação, transporte ou instalação das barras ou bobinas estatóricas nas ranhuras do estator do gerador. Na fase de fabricação, na etapa de remoção da fita desmoldante (fita transparente) que está sobre a camada condutiva de ranhura, existe o risco de raspar ou remover parte da camada condutiva de ranhura (CCR). Também durante a movimentação destes componentes existe o risco de danificar a camada condutiva de ranhura devido a uma possível colisão da mesma com o cavalete ou outros objetos próximos.

Durante o processo de inserção de barras e bobinas estatóricas nas ranhuras do estator, também existe o risco de remover a camada condutiva de ranhura, neste processo a barra estatórica poderá raspar nas chapas do núcleo do estator removendo parte da camada condutiva de ranhura (Figura 2.5).

Figura 2.5 – Instalação de barras estatóricas nas ranhuras do estator do gerador.

Fonte: Voith Hydro (São Paulo – SP - Brasil, 2018).

2.4 MECANISMO DE DEGRADAÇÃO DA CAMADA CONDUTIVA DE RANHURA

Para o caso de uma remoção da camada condutiva de ranhura causada por um dano mecânico ou vibração da barra na ranhura, se tal barra estiver energizada com uma tensão suficiente, então iniciará descargas parciais de superfície entre a isolação exposta para o canto da fita da CCR. Estas descargas irão erodir a CCR aumentando a dimensão do defeito [35]. A Figura 2.6 representa uma barra inserida na ranhura com um defeito. Esta barra tem a espessura de isolação (a) e parte da CCR foi removida deixando a superfície da isolação exposta, tal defeito circular tem o raio (R).

Figura 2.6 – Representação de uma barra estatórica com a isolação exposta dentro de uma ranhura do estator.

Fonte: Adaptado de [35].

O campo elétrico paralelo a superfície da isolação exposta (e) é calculado conforme a fórmula abaixo, (d) é a distância do centro do defeito ao ponto onde se quer calcular o campo elétrico paralelo a superfície exposta e (y) é a razão entre R sobre b:

$$e = yE \sqrt{\frac{d}{b}} \quad (1)$$

Basicamente o campo elétrico é maior na borda da área exposta da isolação (d igual a R), ou seja, na interface entre a CCR e isolação, nesta condição o campo elétrico aumenta suficientemente para ionizar o ar. Em adição, as condições para o início de descargas superficiais dependerão muito mais da tensão aplicada na barra a qual é diretamente proporcional ao campo elétrico normalizado (γE), do que o campo elétrico presente na borda da CCR no caso de uma superfície de isolação exposta [35]. Em casos práticos, a espessura da CCR (b) é fina, portanto o campo elétrico máximo dependerá do raio da borda da camada condutiva de ranhura.

2.5 EFEITO DA TEMPERATURA E UMIDADE NAS DESCARGAS DE SUPERFÍCIES

O efeito da umidade na tensão de extinção das DP's e na amplitude das Descargas Parciais superficiais medidas a 10 % acima da tensão de início de DP foram estudadas [36]. Tensão de início de DP, dada em Volts, é a menor tensão em que continuamente as DP's estão acima de uma amplitude definida (a qual pode ser definida como o nível de ruído de fundo) quando a tensão de teste aplicada é aumentada, no entanto, a tensão de extinção das DP's, também dada em Volts, é a menor tensão em que continuamente as DP's estão abaixo de uma amplitude definida (a qual pode ser definida como ruído de fundo) quando a tensão de teste aplicada é reduzida [3]. Um estudo laboratorial foi realizado com um arranjo experimental composto de um cabo não blindado isolado para 5 kV, este foi suspenso e distanciado de 3 mm de uma placa metálica aterrada. O diâmetro do cabo foi de aproximadamente 10 mm e foi energizado com uma fonte de alta tensão com frequência de 60 Hz. Foi utilizado um equipamento de medição das DP em picocoulomb e com uma banda de detecção de 100 kHz a 1000 kHz e na temperatura fixada em 26 °C (+/- 0.5 °C). A Tabela 2.1 contém os resultados obtidos para as tensões de extinção e amplitudes das DP's medidas a 10 % acima da tensão de início de DP para cada nível de umidade relativa do ar.

Tabela 2.1 – Influência da umidade relativa do ar na tensão de extinção das DP's e amplitude das DP's medidas a 10 % da tensão de início das DP's em um vão de ar de 3 mm.

<i>Umidade Relativa</i>	<i>Tensão de extinção de DP (kV)</i>	<i>Amplitude de DP (pC)</i>
<i>70</i>	4,9	500
<i>60</i>	5,3	600
<i>50</i>	5,8	1000
<i>40</i>	5,9	2000
<i>35</i>	5,9	4000
<i>31</i>	6,5	6000

Fonte: Referência [36].

Observa-se que as amplitudes de DP tiveram maiores variações absolutas (~ 4000 pC) e em porcentagem (~ 200 %) com umidade relativa menores, ou seja, comparando entre 31 e 40 % de umidade relativa. Fazendo a mesma avaliação para umidade relativas maiores, como por exemplo entre 60 e 70 % de umidade relativa, houve pouca diferença nos resultados das medições das amplitudes de DP, tanto em valores absolutos (~ 100 pC) bem como em porcentagem (~ 20 %). Uma possível razão para a diminuição das amplitudes das DP's com o aumento da umidade relativa, é que o aumento da umidade relativa pode curto-circuitar parcialmente ou totalmente o vão de ar entre a isolamento e o eletrodo aterrado, alterando assim a distribuição do campo elétrico na região do vão, proporcionando uma redução ou até extinção completa dos pulsos de DP [37].

O efeito da temperatura nas amplitudes e nos mapas estatísticos de distribuição de pulsos plotados em função da tensão senoidal (PRPD), foi pesquisado [37], no qual duas barras tiveram parte da CCR removida (Figura 2.7). Em seguida, foram registrados os mapas estatísticos dos pulsos de DP plotados em função da tensão senoidal medido em 8 kV com umidade absoluta de 9 g/m^3 na barra estatórica B, em duas temperaturas distintas, 28°C e 85°C (Figura 2.8). Verificou-se que houve um aumento na amplitude das DP's com o aumento da temperatura, entretanto, nas duas condições, foi constatado a presença da predominância de polaridade positiva, onde os pulsos positivos de DP tiveram amplitudes maiores do que os pulsos negativos, o que era esperado para defeitos que produzem descargas superficiais.

Figura 2.7 – Duas barras estatóricas (A e B) com um defeito na CCR exposto as condições do ambiente da câmara climática.

Fonte: Adaptado de [37].

Figura 2.8 – Mapas estatísticos dos pulsos de DP plotados em função da tensão senoidal medido em 8 kV e com umidade absoluta de 9 g/m^3 na barra estatórica B, em 28°C (esquerda) e em 85°C (direita).

Fonte: Adaptado de [37].

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi descrito os principais componentes do hidrogerador, com maior ênfase na barra estatórica e suas proteções de corona. Foi apresentado problemas na camada condutiva de ranhura os quais podem ocorrer durante a operação do gerador. Tais problemas, poderiam ser defeitos mecânicos na CCR os quais tiveram sua origem no processo de fabricação ou instalação das barras e bobinas estatóricas. Portanto, faz-se necessário identificar barras estatóricas com defeitos na CCR antes de serem montadas no gerador. Também, verificou-se o mecanismo de degradação da CCR o qual tem início na borda da CCR onde o campo elétrico é maior produzindo descargas de superfícies. Além disso, o efeito da temperatura nas descargas de superfícies foi abordado e verificou-se que houve um aumento nas amplitudes das DPs com o aumento da temperatura. De forma contrária a temperatura, constatou-se que as amplitudes das DPs diminuíram com o aumento da umidade relativa.

3 DESCARGAS PARCIAIS

3.1 PROCESSO FÍSICO DAS DESCARGAS PARCIAIS

O processo físico das descargas parciais baseia-se no entendimento do mecanismo de ionização dos átomos de um material dielétrico. Tal processo divide-se em duas etapas, primeiro a ionização principal e segundo a avalanche (início de descargas) de cargas. O processo de ionização principal, no entanto, é a ionização por colisão entre um elétron e um átomo ou molécula neutra. Se o elétron livre está submetido a um campo elétrico, ele é acelerado e colide com átomos de nitrogênio, oxigênio e outros gases presentes. A velocidade do elétron está diretamente ligada à intensidade do campo elétrico. Se o campo elétrico não for muito intenso, estas colisões serão elásticas, similares a colisões entre bolas de bilhar, e, portanto, a energia cinética total (soma da energia da bola que acertou a outra e aquela que foi acertada) será a mesma antes e após a colisão. Se por outro lado a intensidade do campo elétrico exceder um valor crítico, qualquer elétron livre presente nesse campo irá adquirir uma velocidade suficiente para tornar a colisão com uma molécula de ar inelástica, o que significa que o elétron terá energia para deslocar outro elétron de sua órbita e ionizar o átomo. O processo de avalanche é iniciado sempre com um elétron livre submetido a um campo elétrico intenso. A sequência da ionização dos átomos é exemplificada pela Figura 3.1 [29].

Figura 3.1 – Processo de avalanche de elétrons iniciado a partir de um eletrodo negativo a) Início. b) Formação de um par de elétrons – Impacto de um elétron com um átomo neutro libera um elétron adicional e deixa um íon positivo para trás. c) Multiplicação – Os elétrons se movem criando íons positivos quando se multiplicam.

Fonte: Referência [29].

3.2 TIPOS DAS DESCARGAS PARCIAIS EM ENROLAMENTOS ESTATÓRICOS

As fontes de DP em enrolamentos estatóricos podem ser classificadas em 4 grupos: descargas internas, descargas de ranhura, descargas na cabeça da bobina e descargas por partículas condutivas (contaminação) [30].

Em especial, as descargas de ranhura em hidrogeradores podem ocorrer devido a três processos já abordados no item 1.4:

- Barras frouxas na ranhura – Onde a vibração da barra dentro da ranhura desgastava e destruía a camada condutiva e a isolamento da mesma;
- Fabricação deficiente da camada condutiva – ocorre quando a camada condutiva de ranhura não cumpre sua função devido à alta resistência superficial inicial ou aplicação deficiente da camada sobre a isolamento da barra;
- Contato não adequado entre a camada condutiva e a ranhura – quando a barra não está devidamente aterrada devido a presença de um filme isolante ou pela utilização de sistema isolante de fixação que está entre a camada condutiva e o núcleo estatórico.

Portanto, altos níveis de DP surgirão nesta região o que pode resultar em um dano irreversível da isolamento da barra e eventualmente em uma falha na isolamento [31].

3.3 CIRCUITO EQUIVALENTE DA DESCARGA PARCIAL EM UMA CAVIDADE

Durante o processo de impregnação a vácuo da isolamento de barras e bobinas estatóricas não é possível eliminar todos os vãos de ar, portanto podem existir pequenas cavidades no interior da isolamento. Em adição, defeitos podem existir devido a delaminação entre camadas de isolamento e também entre a isolamento e o feixe de condutores, ocasionado pela perda da aderência entres elas. E por último, problemas nas proteções de corona, como por exemplo, um mau contato entre a superfície da isolamento da barra e a ranhura (Figura 3.2 (a)).

O circuito equivalente simplificado para uma única cavidade de contorno de plano, pode ser simulada idealmente por capacitores de placas planas paralelas. O circuito da Figura 3.2 (b) mostra a representação elétrica do comportamento de DP internas ao isolante submetido à uma determinada tensão alternada. A cavidade possui uma capacitância C_c , C_b representa a capacitância referente às partes do dielétrico em que não ocorrem descargas e que fica em série com C_c e C_a que representa a capacitância da parte íntegra do dielétrico nos dois lados da cavidade [31].

Figura 3.2 – (a) Barra Roebel com diversas cavidades; (b) Circuito equivalente.

Fonte: Referência [31].

Quando o circuito da Figura 3.2 (b) é submetido a alta tensão designada por V_{apl} , a cavidade associada a capacitância C_c fica submetida à uma tensão V_c e quando a tensão V_c atinge a tensão de ruptura da rigidez dielétrica da cavidade U_+ , ocorre um curto-circuito através da capacitância C_c , ou seja, uma descarga parcial, o que significa uma diminuição da tensão nos terminais do dielétrico e da cavidade C_c , a Figura 3.3 ilustra este processo [31]. Quando a tensão sob a cavidade atingir U_+ novamente, ocorrerá uma nova descarga parcial. Isso se repetirá várias vezes até que a tensão V_a decresça e a tensão V_c atinja U_- , quando novamente voltarão a ocorrer descargas (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Tensões e correntes no circuito equivalente das descargas parciais.

Fonte: Referência [31].

3.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DE DESCARGA NA SUPERFÍCIE DA BARRA

O circuito equivalente de descarga na superfície, ou seja, a descarga entre a superfície da isolamento da barra e a ranhura, é semelhante ao circuito equivalente de uma cavidade [32]. Como ocorre para uma cavidade dentro da isolamento, uma porcentagem significativa da tensão aplicada no cobre surgirá através do vão de ar entre a superfície da barra e a ranhura, conforme ilustrado pela Figura 3.4. Portanto, se o estresse elétrico nesta região exceder o valor de 3 kV/mm (rigidez dielétrica do ar), então descargas parciais estarão presentes.

Com objetivo de prevenir o surgimento de descargas parciais nesta região, é aplicada na superfície da isolamento das barras uma camada condutiva de ranhura a qual estará em contato com alguns pontos do núcleo estatórico por todo o seu comprimento. Com uma resistência baixa suficiente (R_{CCR} na Figura 3.5), a CCR tem o potencial de terra pois está em

contato com o núcleo, sendo assim, o estresse elétrico no vão (Vvão) entre a barra e o núcleo torna-se praticamente zero.

Figura 3.4 - Seção Transversal de uma barra inserida na ranhura onde Descargas Parciais podem ocorrer em sua superfície.

Fonte: Adaptado de [32].

Figura 3.5 – Circuito equivalente simplificado para uma barra com CCR.

Fonte: Adaptado de [32].

3.5 MÉTODOS DE DETECÇÃO DAS DESCARGAS PARCIAIS

Descargas parciais são acompanhadas por diversas manifestações físicas, como por exemplo, pulsos elétricos e de rádio frequência, acústico, luz e também reações químicas [2]. Resumidamente, são apresentados alguns métodos de detecção de DP, bem como suas principais características:

Método de detecção acústico – Este método detecta o ruído audível ou ultrassônico gerado pelas DPs, provenientes do ruído no ar ou vibrações em materiais adjacentes à fonte de descarga. São utilizados microfones, transdutores com amplificadores e sensores que detectam faixas de frequência para localizar as descargas. Portanto, esta técnica é mais utilizada para localizar espacialmente a ocorrência de DPs e são utilizadas em diversos tipos de equipamentos tal como transformadores. Eles podem ser montados dentro ou fora das carcaças dos equipamentos [2, 29].

Método de detecção químico – Em máquinas refrigeradas a ar, a presença de descargas na superfície dos seus componentes, como por exemplo barras e bobinas estatóricas, causa reações químicas no ar adjacente gerando o ozônio que é um subproduto desta reação química. Normalmente, são utilizados sensores eletrônicos para medir a concentração de ozônio [2]. Em adição, a presença de DPs em equipamentos isolados com óleo ou gás podem ser detectados pela análise química dos produtos de decomposição que estão dissolvidos no óleo ou gás [1].

Método de detecção visual – Este método é realizado em ambientes escuros e tem o objetivo de determinar a presença e a localização das descargas de superfície quando o objeto de teste é energizado, a observação é visual e realizada após os olhos adaptarem com a escuridão [1].

Método de detecção Ultravioleta – As descargas de superfície não geram somente luz na faixa de frequência que é detectada pelo olho humano, mas também na faixa ultravioleta (UV). Portanto, as DPs podem ser detectadas utilizando sensores de UV, os quais permitem sua detecção em ambientes escuros ou claros [3], como por exemplo em isoladores de linhas de transmissão.

Método de detecção dos sinais de Rádio Frequência – Sinais de rádio frequência são irradiados pelas DPs quando ocorrem internamente ou na superfície da isolação. Um

dispositivo eletromagnético composto por uma bobina enrolada em um núcleo de ferrite é utilizado para detectar os sinais de rádio frequência. Esta técnica é utilizada para localizar fisicamente as DPs em enrolamentos estatóricos [3].

Método de detecção elétrico – Quando ocorre uma DP é gerado um fluxo de corrente. O fluxo de corrente cria uma tensão através da impedância do sistema de isolamento. Uma das primeiras possibilidades para detectar a DP é medir a tensão do pulso que acompanha cada DP, ou o pulso de corrente resultante [2]. Nas seções seguintes são abordados com detalhes este método.

3.6 PULSO ELÉTRICO DAS DESCARGAS PARCIAIS

As descargas parciais apresentam duração muito menor do que o período da tensão de teste (1/60 segundos). O tempo de duração de uma descarga parcial é da ordem de nano-segundos (ns), o que caracteriza as DPs como um fenômeno de alta-frequência. O formato de uma DP típica, medida através do pulso de corrente ao longo do tempo é apresentado na Figura 3.6. Nota-se que, o intervalo de duração da descarga é aproximadamente 10 ns e o pico de corrente é próximo a 120 mA [33].

Figura 3.6 – Pulso de uma descarga parcial medida através da variação da corrente no tempo com pico em 2,5 nano-segundos.

Fonte: Referência [33].

3.7 DETECÇÃO DO PULSO ELÉTRICO DAS DESCARGAS PARCIAIS PELO MÉTODO ELÉTRICO

A carga em Coulombs do pulso de corrente é dada pela seguinte fórmula:

$$q = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \quad (2)$$

O circuito de medição baseado na IEC 60270 [1] oferece alguns arranjos de testes, entretanto o mais utilizado é o representado pela Figura 3.7. Basicamente, o instrumento de medição detecta uma queda de tensão em uma impedância de medição (Z_m), provocada por impulsos de corrente das descargas parciais provenientes do objeto de teste.

Figura 3.7 – Circuito de medição de descargas parciais.

Componentes:

$U \sim$ = Fonte de Alta Tensão, Z = Filtro indutivo, Z_{mi} = Impedância de medição, CC = Cabo Coaxial de conexão, C_a = Objeto de teste, C_k = Capacitor de acoplamento, CD = Dispositivo de acoplamento, MI = Instrumento de medição.

Fonte: Referência [1].

3.8 GRANDEZAS ASSOCIADAS À MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

Baseado nas normas internacionais, existem inúmeras grandezas na medição de DP, entretanto, serão utilizadas nesta pesquisa as principais grandezas adotadas pelo mercado de hidrogeração e por correlacionar com a amplitude e/ou a ocorrência dos pulsos de DP:

Q_{iec} (positivo e negativo) – Amplitude ponderada registrada pelo sistema de medição o qual apresenta resposta a trem de pulsos de DP. Tal ponderação é aplicada aos pulsos com determinada taxa de repetição conhecida N (pulsos/segundos), de forma que a leitura da amplitude R indicada no instrumento é dada conforme os fatores contidos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Resposta dos instrumentos de medição de Descargas Parciais a trem de pulsos.

N (1/s)	1	2	5	10	50	≥ 100
$R_{\min}$ (%)	35	55	76	85	94	95
$R_{\max}$ (%)	45	65	86	95	104	104

Fonte: Referência [1].

Q_m (positivo e negativo) – Maior amplitude associada com um pulso de DP com taxa de repetição de 10 pulsos por segundo (pps), o qual pode ser diretamente inferido da distribuição de amplitudes dos pulsos [3] conforme apresentado na Figura 13.

NQN (positivo e negativo) – Número de Quantidade Normalizada é definido como a área normalizada sob uma linha reta ajustada para a quantidade de pulsos em cada faixa de amplitude de um gráfico linear da altura dos pulsos conforme Figura 3.8, no qual a quantidade de pulsos é expressa como um logaritmo dos pulsos por segundo e a faixa de amplitudes dos pulsos está na escala linear [2]. O valor de NQN também pode ser entendido como um número não-dimensional proporcional ao total da energia descarregada no circuito ou fase monitorada, representado por uma escala arbitrária, e é dado pela integração da área sob a curva positiva ou negativa no gráfico linear de altura de pulso [34].

Figura 3.8 – Exemplo de gráfico linear de altura dos pulsos representando os parâmetros Qm e NQN.

Fonte: Referência [34].

Tensão de Início de DP, dada em Volts, é a menor tensão em que continuamente as DPs estão acima de uma amplitude definida (a qual pode ser definida como o nível de ruído de fundo) quando a tensão de teste aplicada é aumentada [3].

Mapa de distribuição de DP em 2 dimensões, do inglês *Phase Resolved Partial Discharges* (PRPD) – Número de pulsos para uma matriz de amplitudes de DP versus posição da fase do ciclo CA para visualização do comportamento das DP durante um tempo de medição pré-definido [3]. Neste mapa pode-se identificar os padrões de Descargas Parciais os quais mostrarão os prováveis locais com defeitos no sistema de isolamento (Figura 3.9). Normalmente o padrão de Φ - q - n onde a amplitude das DP q_1 está no eixo das ordenadas e a ocorrência em relação à fase Φ_1 está no eixo da abscissa para cada pulso individual de Descargas Parciais. Em alguns sistemas, a frequência da ocorrência de cada pulso (n) dentro de cada fase/janela de magnitude poderá ser visualizado empregando um sistema eficaz de código de cores o qual sua escala será visualizada ao lado do gráfico [30].

Figura 3.9 - Exemplo de um mapa de distribuição de DP em 2D: a) Descargas Externas na superfície. b) Descargas internas na isolação.

Fonte: do Autor.

Fonte: Especificação técnica do equipamento DDX 9121b emitido pelo fabricante Haefely Hipotronics.

3.9 FATOR DE DISSIPAÇÃO DIELETRICA

As características do fator de dissipação dielétrica (FD) versus a tensão aplicada na isolação de uma barra ou bobina estatórica é o resultado de vários fenômenos que ocorrem internamente a estrutura da isolação [5]. Entre esses fenômenos estão as descargas parciais que ocorrem dentro de vãos de ar na isolação quando uma tensão elétrica crítica é excedida. A

energia dissipada pode ser modelada através de um resistor em série R_s com a capacitância da barra ou bobina estatórica C_s (que representa a isolação elétrica sem nenhuma dissipação) conforme a Figura 3.10.

Figura 3.10 – Circuito elétrico equivalente em série para um sistema de isolação com uma perda dielétrica.

R_s = Resistência série equivalente;

C_s = Capacitância série equivalente;

δ = Ângulo de perda dielétrico.

Fonte: Adaptado de [5].

Plotando um diagrama vetorial deste circuito, o fator de dissipação dielétrica é determinado como a tangente do ângulo de perda dielétrica, δ , conforme a Figura 3.11.

Figura 3.11 – Diagrama vetorial do circuito elétrico equivalente em série para um sistema de isolamento com uma perda dielétrica.

A equação (3) apresenta como é calculado o fator de dissipação dielétrica:

$$FD = \tan \delta = 2\pi f C_s R_s \quad (3)$$

3.9.1 Procedimento para a medição do fator de dissipação dielétrica

A medição do fator de dissipação dielétrica é realizada em tensões pré-definidas. Normalmente, os FDs em porcentagem são medidos na tensão de teste de 0,2 Un (20 % da tensão nominal) até a tensão nominal, em patamares de 20 % da tensão nominal como ilustrado pela Figura 3.12.

A variação do FD em função da tensão de teste determina se a isolamento apresenta vãos de ar em seu interior. A medição do valor de capacitância do objeto de teste verifica se a impregnação da isolamento da barra estatórica com resina epóxi foi realizada corretamente.

Figura 3.12 – Exemplo de um gráfico dos resultados das medições do FD em % em função da tensão de teste mostrando que a maior variação do FD foi encontrada entre as tensões de teste de 0,4 e 0,6 Un.

3.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi estudado o processo físico das descargas parciais o qual ocorre basicamente em duas etapas, a primeira etapa é a ionização principal e a segunda por avalanche de cargas. Também, apresentou as fontes de DP em enrolamentos estatóricos, dando ênfase nas Descargas de Ranhura as quais podem ocorrer por três processos, o primeiro processo é quando a barra estatórica está frouxa na ranhura, o segundo quando a fabricação da camada condutiva foi deficiente e o terceiro quando o contato entre a camada condutiva e a ranhura não é adequado. Estes três tipos de Descargas de Ranhura geram altos níveis de DP o qual pode resultar em um dano irreversível da isolação ou eventualmente sua ruptura total. Foi discorrido sobre os circuitos equivalentes da descarga parcial tanto em uma cavidade bem como na superfície de uma barra estatórica. Para a descarga na superfície, ocorre DPs quando o estresse elétrico nesta região exceder o valor de 3 kV/mm (rigidez dielétrica do ar). Verificou-se que as DPs são acompanhadas por diversas manifestações físicas e para cada uma delas existe um método de detecção específico. O método de detecção elétrico foi descrito detalhadamente por ser utilizado nesta pesquisa, mostrando inicialmente o pulso elétrico das DPs, o qual tem tempo de duração na ordem de nano-segundos e este é detectado pela queda de tensão em uma impedância do circuito de medição, provocada por impulsos de

corrente das DPs provenientes do objeto de teste. Em seguida é apresentado as principais grandezas das medições de DP. Finalizando discorreu sobre a teoria da medição do fator de dissipação dielétrica da isolamento, na qual a variação do FD em função da tensão de teste indica se a isolamento de uma determinada barra estatórica foi corretamente impregnada ou não.

4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho teve a estrutura conforme as etapas descritas abaixo:

Primeira Etapa: Pesquisa bibliográfica sobre os fundamentos e técnicas aplicadas na medição de descargas parciais, revisando a literatura com foco na utilização desta técnica para identificação de defeitos no sistema de isolamento de barras e bobinas estatóricas. Com foco principal nos defeitos na camada condutiva de ranhura (CCR).

Segunda Etapa: Seleção, caracterização e preparação dos objetos de testes, ou seja, simulação dos defeitos nas CCR das barras estatóricas que foram utilizadas como objeto de testes. Tais defeitos são semelhantes na forma e dimensão dos defeitos reais na CCR identificados na primeira etapa durante a revisão da literatura.

Terceira Etapa: Seleção do sistema de medição de Descargas Parciais, montagem, ajuste e calibração do circuito de ensaio, incluindo o roteiro de testes.

Quarta Etapa: Experimentos em laboratório, utilizando sistemas de baixa frequência e frequência muito alta com coleta de dados.

Quinta Etapa: Análise, interpretação dos resultados e conclusões.

4.1 OBJETO DE TESTE

Barras estatóricas do tipo Roebel foram utilizadas como objeto de teste, projetadas para operar em um hidrogerador com tensão nominal de 11 kV. Estas barras são compostas de um feixe de condutores de cobre isolados entre si e transpostos. Sobre este feixe de condutores, algumas camadas de fita de mica são aplicadas e sobre estas uma camada de fita condutiva de ranhura (CCR) e em seguida a fita composta por carbetto de silício com resina parcialmente polimerizada, este estágio de cura é conhecido como estágio B (LA). Após esta etapa, a barra isolada é inserida em um molde metálico o qual dará a conformação final do componente, para que a isolamento seja impregnada totalmente com resina do tipo epóxi é utilizado um sistema a vácuo com aplicação de pressão. A fase final do processo é a cura da resina que é realizado em estufa.

As barras #1 e #2 utilizadas neste projeto estão apresentadas nas Figuras 4.1 a 4.4, contendo suas dimensões principais em relação ao seu comprimento e sua seção transversal do centro da barra.

Figura 4.1 – Dimensões principais do comprimento da barra estatórica #1 utilizada como objeto de teste nas medições de Descargas Parciais em baixa frequência.

Figura 4.2 – Dimensões da seção transversal do centro da barra estatórica #1 utilizada como objeto de teste nas medições de Descargas Parciais em baixa frequência.

Figura 4.3 – Dimensões principais do comprimento da barra estatórica #2 utilizada como objeto de teste nas medições de Descargas Parciais em frequência muito alta.

Figura 4.4 – Dimensões da seção transversal do centro da barra estatórica #2 utilizada como objeto de teste nas medições de Descargas Parciais em frequência muito alta.

Os defeitos confeccionados na CCR das barras tiveram dimensões de 1x2, 5x10, 10x20 e 20x40 mm². Como estes defeitos foram realizados na mesma barra, iniciou-se com o defeito menor e assim sucessivamente até o defeito de maior dimensão conforme Apêndice A. As fotos dos defeitos na CCR estão apresentadas pela Figura 4.5.

Figura 4.5 - Fotos mostrando a face larga da barra estatórica #2 com defeitos na CCR de várias dimensões (Altura x Largura) e seus respectivos perímetros (P).

Sem Defeito
Defeito $1 \times 2 \text{ mm}^2$ $P = 6 \text{ mm}$
Defeito $5 \times 10 \text{ mm}^2$ $P = 30 \text{ mm}$
Defeito $10 \times 20 \text{ mm}^2$ $P = 60 \text{ mm}$
Defeito $20 \times 40 \text{ mm}^2$ $P = 120 \text{ mm}$

4.2 ARRANJO EXPERIMENTAL (BAIXA FREQUÊNCIA)

No circuito de medição de DP em baixa frequência a tensão de teste foi aplicada no terminal da barra estatórica, entre a fonte de alta tensão e a barra estatórica foi introduzido um filtro indutivo. O objeto de teste foi aterrado através da camada condutiva de ranhura conforme ilustrado pela Figura 4.6. À medição das DP foi realizada conforme a norma IEC 60270 [1] obtida através do lado de baixa tensão do capacitor de acoplamento em série com uma impedância de medição. A impedância de medição conectada ao analisador de DP, tem a função de extrair os pulsos de DP gerados pela barra e dirigi-los ao analisador de DP. A interface para ajuste dos parâmetros de medição, análise e registro dos resultados foi realizada através do programa de registro e análise instalado em um computador.

Os equipamentos utilizados na medição estão representados no arranjo experimental esquemático (Figura 4.6).

Figura 4.6 – Arranjo experimental esquemático 1) Barra estatórica; 2) Proteção de corona CCR; 3) Proteção de corona LA; 4) Terminal da barra estatórica; 5) Fonte de alta tensão; 6) Capacitor de Acoplamento de 1 nF; 7) Impedância de medição; 8) Cabos Coaxiais; 9) Analisador de DP; 10) Computador; 11) Aterramento da superfície da barra; 12) Filtro Indutivo.

Fonte: Referência [18].

Na Figura 4.7 é apresentado o arranjo experimental, contendo os equipamentos utilizados na medição de Descargas Parciais em Baixa Frequência.

Figura 4.7 – Arranjo experimental 1) Barra estatórica; 2) Fonte de alta tensão; 3) Capacitor de Acoplamento de 1 nF; 4) Impedância de medição; 5) Cabos Coaxiais; 6) Eletrodo de Aterramento da superfície da barra; 7) Filtro indutivo.

4.2.1 Componentes do sistema de medição de Descargas Parciais

Nesta seção serão apresentados os principais componentes do sistema de medição de Descargas Parciais em Baixa frequência.

a) Filtro indutivo

Entre a fonte de tensão e o capacitor de acoplamento foi introduzido um filtro indutivo com uma indutância de 122 mH. Este filtro foi construído pelo Instituto de Energia e Ambiente da USP (Figura 4.8) e tem a função de atenuar os ruídos de alta frequência provenientes da fonte de alta tensão.

Figura 4.8 – Filtro indutivo conectado entre a fonte de tensão e o capacitor de acoplamento.

b) Capacitor de Acoplamento

O capacitor de acoplamento utilizado na medição de Descargas Parciais em baixa frequência tem capacitância de 1 nF e foi projetado para tensões de teste até 100 kV, sendo este do tipo que apresenta amplitudes de descargas parciais menores do que 1 pC. Na Figura 4.9 é apresentado o capacitor de acoplamento utilizado na medição de Descargas Parciais em Baixa Frequência.

Figura 4.9 – Capacitor de acoplamento de 1 nF utilizado na medição de DP em baixa frequência.

c) Impedância de medição

Os pulsos de corrente desacoplados do circuito de DP pelo capacitor de acoplamento são convertidos pela impedância de medição em pulsos equivalentes de tensão. Estes pulsos são caracterizados por tempos extremamente curtos na ordem de ns, e além disso eles têm magnitudes na ordem de μV (microvolts). Se por exemplo uma carga aparente de 0,1 pC é detectada, então a magnitude de tensão correspondente é de aproximadamente 100 μV , se a constante de tempo de 50 ns para o pulso de DP for adotada, então a impedância de medição corresponderá a 50 Ω . Na Figura 4.10 é apresentado a impedância de medição utilizada na medição de Descargas Parciais em Baixa Frequência.

Figura 4.10 – Impedância de medição utilizada no sistema de medição de DP em baixa frequência.

d) Analisador e registro das medições de Descargas Parciais

O equipamento de medição de Descargas Parciais DDX 9121b de fabricação Haefely foi utilizado nas medições de Descargas Parciais em baixa frequência (Figura 4.11). Os resultados das medições são analisados e armazenados pelo programa do analisador de DP. Este fornece como resultado, Q_{iec} definido como carga aparente [1] e os pulsos de DP referenciadas na tensão senoidal (PRPD). Na Tabela 4.1 são apresentados as principais características e parâmetros configurados no programa do sistema de medição de DP em baixa frequência utilizado neste trabalho (Figura 4.12).

Figura 4.11 – Equipamento de medição das Descargas Parciais (fabricante Haefely) – 1) Analisador de DP; 2) Computador; 3) Visualização do programa de análise e registro das DP.

Tabela 4.1 – Características principais do sistema de medição de DP em baixa frequência.

Sistema DP	H (Haefely)
Capacitor de acoplamento	1000 pF
Limite de Frequência inferior f1	125 kHz
Limite de Frequência superior f2	925 kHz
Largura da Banda Δf	800 kHz
Impedância de medição	50 Ω

Figura 4.12 – Parâmetros configurados no programa do sistema de medição de DP em baixa frequência.

4.2.2 Procedimento de calibração na medição de Descargas Parciais

A calibração é realizada com o circuito completo de medição de forma a encontrar o fator de escala para a medição da carga aparente, pela injeção no circuito de medição de pulsos de corrente de curta duração de magnitude de carga conhecida [1]. Devido a capacitância do objeto de teste influenciar na característica do circuito, a calibração deve ser realizada para cada objeto de teste.

4.2.2.1 Circuito de calibração

No arranjo experimental esquemático apresentado na Figura 4.13, o injetor de pulso é conectado no terminal da barra estatórica. No arranjo experimental ilustrado pela Figura 4.14 mostra a localização do injetor de pulsos. Neste trabalho o injetor de pulsos foi configurado para gerar pulsos de 500 pC, porque as barras estatóricas sem defeitos, normalmente apresentam valores de Qiec menores do que 1000 pC. Uma faixa relevante do pulso de calibração deveria ser entre 50 % a 200 % da amplitude de DP especificada ou esperada [1].

Figura 4.13 – Arranjo experimental esquemático 1) Barra estatórica; 2) Proteção de corona CCR; 3) Proteção de corona LA; 4) Terminal da barra estatórica; 5) Fonte de alta tensão; 6) Capacitor de Acoplamento de 1 nF; 7) Impedância de medição; 8) Cabos Coaxiais; 9) Analisador de DP; 10) Computador; 11) Aterramento da superfície da barra; 12) Filtro Indutivo; 13) Injetor de pulso de calibração.

Fonte: Adaptado de [18].

Figura 4.14 – Arranjo experimental ilustrando a localização da conexão do injetor de pulsos.

4.2.2.2 Injetor de pulso

O injetor de pulso (Figura 4.15) utilizado para a calibração do sistema de medição de DP de fabricação Haefely é composto por um circuito que gera um pulso de calibração na faixa de 1 pC a 50 nC.

Figura 4.15 – Injetor de pulso utilizado para a calibração do circuito de medição de Descargas Parciais (configurado para gerar pulsos de 500 pC).

4.2.2.3 Procedimento de calibração

O procedimento de calibração do sistema de medição de DP adotado neste projeto constituiu-se das seguintes etapas descritas abaixo:

- Informar para o programa de aquisição de dados que será calibrado com 500 pC;
- Configurar o injetor de pulsos para 500 pC;
- Instalar no circuito de medição de DP, uma das conexões é ligada no terminal da barra e outra no condutor de aterramento;
- No programa de aquisição dos dados aparecerão os pulsos de calibração (Figura 4.16), clicar no botão de calibração e aguardar o sistema realizar a calibração;
- Desconectar o injetor de pulso do circuito de medição de DP.

Figura 4.16 – Tela do programa de aquisição de dados mostrando os pulsos de calibração e o sistema já calibrado com 500 pC.

4.2.3 Tratamento dos dados

O tratamento dos dados de descargas parciais no sistema de medição em baixa frequência aplicado neste trabalho avaliou os parâmetros de maior relevância. Neste caso foram analisadas as amplitudes Q_{iec} e também a predominância de polaridade das Descargas Parciais.

4.2.3.1 Predominância de polaridade

A predominância de polaridade é obtida através da análise do mapa de distribuição estatístico dos pulsos de DP em relação a tensão senoidal aplicada, conhecido como PRPD. Na parte superior da Figura 4.17 é mostrado um PRPD onde claramente os pulsos positivos de DP (localizados no semiciclo negativo da tensão senoidal) tem amplitudes maiores do que os pulsos negativos de DP (localizados no semiciclo positivo da tensão senoidal). A análise é feita pela razão aproximada dos maiores pulsos positivos e negativos que melhor representam tal distribuição. Na parte inferior da Figura 4.17, desenhando uma linha auxiliar tracejada a qual contorna a distribuição dos pulsos tanto no semiciclo positivo quanto negativo é possível determinar o maior pulso representativo da distribuição, excluindo os pulsos dispersos desta distribuição. Em alguns casos, existe um acúmulo de pulsos acima da distribuição de pulsos, que devido a sua taxa de ocorrência influenciar diretamente o valor calculado da amplitude Q_{iec} , portanto, nestes casos o maior pulso representativo será determinado pelo acúmulo de pulsos ao invés do contorno da distribuição de pulsos. No exemplo ilustrado na Figura 4.17, o maior pulso representativo dos pulsos positivos de DP é de aproximadamente 2000 pC e para os pulsos negativos de DP na faixa de 1000 pC. Portanto, podemos dizer que este PRPD apresenta uma predominância de polaridade positiva de razão aproximada de 2 (+2000 pC/-1000 pC). Esta análise é de caráter qualitativo e tem o objetivo de verificar se os defeitos no sistema de isolamento estão localizados próximos a superfície da isolamento (predominância de polaridade positiva), ou no interior da isolamento (sem predominância de polaridade), ou ainda próximo ao feixe de condutores (predominância de polaridade negativa).

Figura 4.17 – Ilustração do método de análise dos mapas de distribuição estatístico dos pulsos de DP em relação à Fase (PRPD) para definição da predominância de polaridade. Na parte superior é apresentado um exemplo de PRPD e na parte inferior foi acrescentado, no mesmo PRPD, as linhas auxiliares para definição da amplitude dos maiores e mais representativos pulsos positivo e negativo que serão utilizados para definição da predominância de polaridade e sua razão. Os pulsos dispersos e não considerados na análise foram demarcados com um círculo no PRPD.

4.3 ARRANJO EXPERIMENTAL (FREQUÊNCIA MUITO ALTA)

À medição de DP em frequência muito alta aplicada nesta pesquisa, utiliza dois capacitores que realizam a eliminação do ruído proveniente da fonte de tensão ou da rede (Figura 4.18). O arranjo experimental é montado de forma que o cabo de alta tensão entre os dois capacitores com 3 metros de comprimento e os cabos coaxiais que conectam os dois capacitores ao analisador tenham o mesmo comprimento. Desta forma, os pulsos provenientes da fonte de alta tensão chegam no capacitor de acoplamento do sistema no tempo x e também chegam no capacitor de acoplamento da barra no tempo x mais um atraso y proporcionado pelo comprimento do cabo de alta tensão. Desta forma, o sistema de medição distingue e elimina os pulsos provenientes da fonte de alta tensão pelo tempo de chegada dos pulsos, considerando apenas os pulsos de DP advindos do capacitor de acoplamento da barra.

Figura 4.18– Arranjo experimental esquemático 1) Barra estatórica; 2) Proteção de corona CCR; 3) Proteção de corona LA; 4) Terminal da barra estatórica; 5) Fonte de alta tensão; 6) Capacitor de Acoplamento de 80 pF (Mede os pulsos de DP provenientes da Barra); 7) Capacitor de acoplamento do sistema de 80 pF (Mede o ruído proveniente da fonte de alta tensão); 8) Cabo de Alta tensão blindado de 3 metros de comprimento; 9) Cabos Coaxiais 10) Analisador de DP; 11) Computador; 12) Aterramento da superfície da barra.

O arranjo experimental utilizado na medição de DP em frequência muito alta está apresentado na Figura 4.19.

Figura 4.19 – Arranjo experimental 1) Barra estatórica; 2) Proteção de corona CCR; 3) Proteção de corona LA; 4) Terminal da barra estatórica; 5) Conexão com a Fonte de alta tensão; 6) Capacitor de Acoplamento (Mede os pulsos de DP provenientes da Barra); 7) Capacitor de acoplamento do sistema (Elimina o ruído proveniente da fonte de alta tensão); 8) Cabo de Alta tensão blindado de 3 metros de comprimento; 9) Cabos Coaxiais os quais conectados ao analisador de DP; 10) Aterramento da superfície da barra.

4.3.1 Componentes do sistema de medição de Descargas Parciais

Nesta seção serão apresentados os principais componentes do sistema de medição de Descargas Parciais em frequência muito alta.

a) Capacitor de Acoplamento

O capacitor de acoplamento que mede os pulsos advindos da barra na medição de Descargas Parciais em frequência muito alta tem capacitância de 80 pF e foi projetado para tensões de teste até 25 kV que apresenta amplitudes de descargas parciais menores do que 1 pC. Na Figura 4.20 é ilustrado o capacitor de acoplamento utilizado nesta medição.

Figura 4.20 – Capacitor de acoplamento de 80 pF utilizado na medição de DP em frequência muito alta.

b) Capacitor de Acoplamento do sistema

O capacitor de acoplamento do sistema mede o ruído proveniente da fonte de alta tensão, tem capacitância de 80 pF e foi projetado para tensões de teste até 25 kV, sendo este do tipo que apresenta amplitudes de descargas parciais menores do que 1 pC. Na Figura 4.21 é ilustrado o capacitor de acoplamento do sistema utilizado nesta medição.

Figura 4.21 – Capacitor de acoplamento do sistema de 80 pF utilizado na medição de DP em frequência muito alta.

e) Analisador e registro das medições de Descargas Parciais

O equipamento de medição de Descargas Parciais PDA-IV de fabricação IRIS POWER foi utilizado nas medições de Descargas Parciais na faixa de frequência muito alta (Figura 4.22). Os resultados das medições são analisados e armazenados pelo programa do analisador de DP, fornece como resultado, Qm, NQN e além dos pulsos de Descargas Parciais referenciadas na tensão senoidal (PRPD). Na Tabela 4.2 são apresentadas as principais características do sistema de medição de DP em frequência muito alta utilizado neste trabalho.

Figura 4.22 – Equipamento de medição das Descargas Parciais (fabricante IRIS POWER) – 1) Analisador de DP; 2) Computador; 3) Software de análise e registro das DP.

Tabela 4.2 – Características principais do sistema de medição de DP em frequência muito alta.

Sistema DP	I (IRIS)
Capacitor de acoplamento	80 pF
Limite de Frequência inferior f1	40 MHz
Limite de Frequência superior f2	400 MHz
Largura da Banda Δf	360 MHz

4.3.2 Tratamento dos dados

O tratamento dos dados de descargas parciais no sistema de medição em frequência muito alta aplicado neste trabalho avaliou os parâmetros de maior relevância. Neste caso foram analisadas as amplitudes e a predominância de polaridade das Descargas Parciais.

4.3.2.1 Predominância de polaridade

A predominância de polaridade é obtida através da análise do mapa de distribuição estatístico dos pulsos DP em relação a tensão senoidal aplicada, conhecido como PRPD. Na Figura 4.23 é mostrado um PRPD onde claramente os pulsos positivos de DP tem amplitudes maiores do que os pulsos negativos. Como o sistema de medição em frequência muito alta apresenta os valores de Q_m positivo e negativo, portanto a simples divisão entre $+Q_m$ pelo $-Q_m$ nos fornece a razão da predominância de polaridade, que neste caso, podemos dizer que este PRPD apresenta predominância de polaridade positiva de razão 1,8 ($+96 \text{ mV} / -53 \text{ mV}$). Esta análise é de caráter qualitativo e tem o objetivo de verificar se os defeitos no sistema de isolamento estão localizados próximos a superfície da isolamento (predominância de polaridade positiva), ou no interior da isolamento (sem predominância de polaridade), ou ainda próximo ao feixe de condutores (predominância de polaridade negativa).

Figura 4.23 –Exemplo de mapa de distribuição estatístico dos pulsos de DP em relação à Fase (PRPD) com predominância de polaridade positiva de razão aproximada de 1,8.

$$+Q_m = 96 \text{ mV}; -Q_m = 53 \text{ mV}$$

Além da predominância de polaridade utilizando os valores de Q_m , no sistema de medição de DP em frequência muito alta, podemos utilizar os valores de NQN obtido através do gráfico linear de altura de pulso dividindo o valor de NQN positivo pelo NQN negativo. Na Figura 4.24 é apresentado o gráfico linear de altura de pulso proveniente da mesma medição de DP da figura anterior, neste caso o valor de NQN positivo é 172 e o NQN negativo é de 74. Portanto, podemos dizer que este padrão de DP tem predominância de polaridade positiva de razão aproximada de 2,3 (+NQN /-NQN).

Figura 4.24 – Exemplo de gráfico linear de altura dos pulsos de DP com predominância de polaridade positiva de razão aproximada de 2,3.

4.4 ARRANJO EXPERIMENTAL (FATOR DE DISSIPAÇÃO DIELÉTRICA)

No circuito de medição do Fator de Dissipação Dielétrica, a tensão de teste foi aplicada no terminal da barra estatórica, em paralelo a fonte de alta tensão, foi conectado o capacitor padrão de 100 pF (C_n) no terminal da barra estatórica. Anéis de guarda foram aplicados em cada extremidade da CCR para interceptar toda a corrente que flui das Luvas Anticorona. O objeto de teste foi apoiado na região da camada condutiva de ranhura sobre uma base metálica na qual foi conectado um cabo coaxial blindado que obtém o sinal de capacitância e o envia para a ponte de balanceamento automática conforme ilustrado pela

Figura 4.25. Basicamente, os valores de FD fornece uma indicação das perdas dielétricas no interior da isolação. À medição do FD foi realizada conforme a norma IEEE 286 [5] e teve como objetivo verificar se o objeto de teste estava livre de defeitos no interior de sua isolação, como por exemplo, delaminações ou vãos de ar no qual poderia influenciar os resultados de DPs e conseqüentemente sua interpretação. Os equipamentos utilizados na medição estão representados no arranjo esquemático (Figura 4.25).

Figura 4.25 – Arranjo esquemático utilizado na medição do fator de dissipação dielétrica da barra estatórica.

Fonte: Adaptado de [5].

Na Figura 4.26 é apresentado o arranjo experimental utilizado na medição de DF. Observa-se que os anéis de guarda estão posicionados em cada extremidade da CCR e os mesmos estão distanciados da base metálica em aproximadamente 200 mm. O motivo pelo qual é necessário este espaçamento é que a resistência da CCR, na faixa de alguns $k\Omega$ por quadrado, isola eletricamente o anel de guarda da base metálica.

Figura 4.26 – Arranjo experimental utilizado na medição do fator de dissipação dielétrica da barra estatórica
 1) Barra estatórica; 2) Fonte de alta tensão; 3) Capacitor padrão; 4) Anéis de guarda; 5) Cabos Coaxiais blindado Cn; 6) Cabos Coaxiais blindado Cx; 7) Filtro indutivo; 8) Base metálica.

4.4.1 Componentes do sistema de medição do fator de dissipação dielétrica

Nesta seção serão apresentados os principais componentes do sistema de medição de fator de dissipação dielétrica. O filtro indutivo utilizado nesta medição foi o mesmo apresentado no item 7.2.1 a).

a) Capacitor Padrão

O capacitor padrão é utilizado como referência para a ponte automática encontrar a capacitância do objeto de teste por comparação, tem capacitância de 100 pF e foi projetado para tensões de teste até 30 kV, sendo este do tipo que apresenta amplitudes de descargas parciais menores do que 1 pC. Na Figura 4.27 é apresentado o capacitor padrão do sistema utilizado nesta medição.

Figura 4.27 – Capacitor padrão de 100 pF utilizado na medição do fator de dissipação dielétrica.

b) Anéis de guarda

Os anéis de guarda foram instalados nas extremidades da CCR, composto por fita condutiva de cobre, conectados à terra proveniente da caixa de medição. Na Figura 4.28 é apresentado um anel de guarda instalado e distanciado da base metálica em aproximadamente 200 mm.

Figura 4.28 – Anel de guarda aplicado em uma das extremidades da CCR da barra estatórica, este está distanciado de aproximadamente 200 mm da base metálica.

c) Analisador e registro das medições do fator de dissipação dielétrica

Foi utilizado para medição do fator de dissipação dielétrica o equipamento modelo 2840 de fabricação Haefely (Figura 4.29).

Figura 4.29 – Equipamento de medição do Fator de Dissipação Dielétrica (Modelo 2840 – Fabricante Haefely).

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Foram apresentados neste capítulo as barras estatóricas utilizadas como objeto de teste nesta pesquisa e seus respectivos defeitos na camada condutiva de ranhura. Tais defeitos foram realizados para simular um defeito real na CCR. Os arranjos experimentais das medições de Descargas Parciais em Baixa Frequência, Frequência Muito Alta e do Fator de Dissipação Dielétrica foram detalhados, estes arranjos seguem as diretrizes das normas internacionais. Em adição, foram apresentados os seus principais componentes.

O método de análise dos mapas de distribuição estatísticos dos pulsos de DP em relação à fase (PRPD) para definição da razão da predominância de polaridade, estes provenientes das medições de Descargas Parciais em BF e FMA foram descritos neste capítulo, o quais serão utilizados para a avaliação dos resultados das medições de DP durante esta pesquisa.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 HIPÓTESES A SEREM TESTADAS

As hipóteses a serem testadas são as descritas abaixo:

Primeira hipótese – A técnica de medição de Descargas Parciais é capaz de identificar defeitos na camada condutiva de ranhura de barras estatóricas utilizadas em hidrogeradores.

Segunda hipótese – A amplitude da DP discrimina a barra com defeito na CCR da barra sem defeito.

Terceira hipótese – A análise pela predominância de polaridade distingue a barra com defeito na CCR da barra sem defeito.

Quarta hipótese – O tipo de arranjo de eletrodo utilizado no aterramento da camada condutiva de ranhura tem influência na identificação de defeitos.

5.2 PLANOS DE TESTES

Os Planos de Testes foram elaborados com o objetivo de avaliar as hipóteses descritas no item anterior. Estão divididos em 3 etapas como mostrado nos fluxogramas a seguir (Figuras 5.1 a 5.3). Na Etapa 1 foi utilizado nas medições de DP o equipamento de Baixa Frequência, tendo como o objeto de teste a barra sem defeito e com defeitos na CCR de tamanhos diferentes. Para a Etapa 2 foi mantido o mesmo instrumento de medição, utilizando a barra com o maior defeito na CCR (20x40 mm²), entretanto foram utilizados três tipos de eletrodos de aterramento. Finalizando na Etapa 3 foi utilizado nas medições de DP o equipamento de Frequência Muito Alta, tendo como o objeto de teste a barra sem defeito e com defeitos na CCR de diferentes dimensões.

Figura 5.1 – Fluxograma do plano de teste da Etapa 1.

Figura 5.2 – Fluxograma do plano de teste da Etapa 2.

Figura 5.3 – Fluxograma do plano de teste da Etapa 3.

5.3 RESULTADOS DOS TESTES

Os resultados dos testes referente as etapas 1, 2 e 3 estão apresentados nesta seção.

5.3.1 Etapa 1 – Medição do fator de dissipação dielétrica (Tangente delta)

O fator de dissipação dielétrica em porcentagem e a capacitância da barra estatórica foram medidas nas seguintes tensões de teste:

0,2 U_n = 2,2 kV;

0,4 U_n = 4,4 kV;

0,6 U_n = 6,6 kV;

0,8 U_n = 8,8 kV;

1,0 U_n = 11 kV.

Os resultados dos testes estão apresentados na Tabela 5.1 e graficamente nas Figuras 5.4 e 5.5.

As condições ambientais foram:

Temperatura = 22,9 °C;

Umidade relativa = 61,7 %;

Pressão atmosférica = 93,51 kPa.

Tabela 5.1 – Resultados das medições de Fator de Dissipação Dielétrica medido na barra estatórica #1.

Barra #1	Tensão de teste (kV)	2,23	4,42	6,64	8,79	11,03
	FD % (Tan delta)	0,54	0,57	0,58	0,59	0,59
	Cp (pF)	2317	2318	2318	2319	2319

Figura 5.4 – Gráfico dos resultados das medições do FD em % em função da tensão de teste.

Figura 5.5 – Gráfico dos resultados das medições de capacitância em pF em função da tensão de teste.

Analisando os resultados de FD e capacitância verifica-se pouca variação destes valores entre os níveis de tensão de teste, especificamente para o FD a maior variação encontrada foi entre a tensão de teste de 0,2 e 0,4 Un, a qual o FD variou apenas 0,03 %. Um aumento do fator de dissipação dielétrico versus a tensão de teste é inevitável mesmo em barras / bobinas produzidas em um sistema de impregnação a vácuo e pressão de alta qualidade, porque o isolamento de mica sempre terá micro delaminações dentro das pequenas partículas anisotrópicas de mica. No entanto, se parte do isolamento não estiver totalmente impregnado, será caracterizado por um aumento significativo do fator de dissipação dielétrica. A norma IEC 60034-27-3 [4], apresenta como valores característicos de variação de FD entre patamares de tensões de 0,2 Un de 0,5 %. O valor apresentado pelo objeto de teste nesta pesquisa apresentou um valor menor em aproximadamente uma ordem de grandeza com relação aos valores apresentados pela norma IEC.

5.3.2 Etapa 1 – Medição de descargas parciais em baixa frequência

Esta etapa foi constituída de 5 passos (Figura 5.6), primeiro passo foi medida a DP na barra estatórica referência, ou seja, sem defeito, por três vezes consecutivas, o propósito era verificar a variabilidade da medição de DP. O segundo passo, foi realizado um defeito na camada condutiva de ranhura desta mesma barra com dimensão de 1x2 mm², esta barra foi

submetida por três vezes as medições de DP. Em seguida, o defeito anterior foi aumentado para $5 \times 10 \text{ mm}^2$ de dimensão e então mais três medições de DP foram executadas (terceiro passo). Da mesma maneira, defeitos de $10 \times 20 \text{ mm}^2$ e $20 \times 40 \text{ mm}^2$ foram executados e consecutivamente três medições de DP.

A variabilidade é uma medida da dispersão das três medições consecutivas, foi calculada através da amplitude total, a qual é um termo utilizado em Estatística, definida como a diferença entre o maior e o menor valor observado.

As condições ambientais durante os dois dias de medição foram:

Temperaturas: $20,4^\circ\text{C}$ (primeiro dia) e $22,5^\circ\text{C}$ (segundo dia);

Umidade relativa: $63,3\%$ (primeiro dia) e $75,2\%$ (segundo dia);

Pressão atmosférica: $93,55 \text{ kPa}$ (primeiro dia) e $93,63 \text{ kPa}$ (segundo dia).

No fluxograma da Figura 5.6 são apresentados a sequência dos testes realizados.

Figura 5.6 – Fluxograma da sequência das medições de DP.

Os níveis de tensão utilizados para cada uma das medições de DP estão apresentados na Figura 5.7, primeiramente foi medida a tensão de início das DPs e após foram medidos em quatro níveis de tensão e os dados de DP foram adquiridos em 1 minuto para cada nível de tensão, o primeiro nível foi na tensão fase-terra (7 kV), é a tensão que a região com defeito na CCR será submetida durante operação normal no gerador, o segundo nível foi na tensão nominal do gerador (11 kV), o terceiro a 40% acima da tensão nominal (15 kV) e o último nível a 80% acima da tensão nominal do gerador (20 kV). Foram escolhidas tensões maiores

do que a tensão fase-terra (tensão real de operação no gerador) com o objetivo de gerar mais DPs na região do defeito e verificar se tensões de testes maiores auxiliam na identificação dos defeitos.

Figura 5.7 – Níveis de tensão e duração para cada medição de Descargas Parciais ($U_n=11$ kV).

Conforme a norma IEC 60034-27-1 [3], os instrumentos digitais calculam os valores de Q (Q_{iec} ou Q_m), para isso requerem um tempo mínimo de coleta dos dados e também para processá-los. Portanto, para medições em frequência padrão (50 ou 60 Hz), o tempo mínimo para coleta dos dados é de 10 segundos. Neste estudo, utilizamos um tempo de aquisição dos dados de 1 minuto.

O procedimento utilizado para determinação da tensão de início de descargas parciais (PDIV) seguiu as seguintes fases abaixo:

- 1º Definição do ruído de fundo na tensão de teste na faixa de 500 V a 1000 V;
- 2º Aumento da tensão até o valor medido das DP for maior do que o nível de ruído de fundo;
- 3º Registro da tensão de início de descargas parciais.

Na Figura 5.8 está plotada a tensão aplicada ao circuito de medição em kV (linha tracejada) juntamente a carga aparente Q_{iec} em pC (linha contínua), ambos em função do tempo. Neste exemplo, a tensão de início de DP registrada foi de aproximadamente 5,3 kV.

Figura 5.8 – Exemplo de gráfico da amplitude das descargas parciais Q_{iec} (linha contínua) e tensão de teste (linha tracejada), ambos em função do tempo (eixo horizontal) utilizado para identificação da tensão de início de DP.

Os resultados das tensões de início de descargas parciais estão apresentados na Tabela 5.2, nesta constam os três valores medidos da tensão de início de DP, bem como sua média aritmética para cada condição da barra estatórica. Verifica-se uma tendência de quanto maior o tamanho do defeito menor será a tensão de início de DP. Entretanto, a variabilidade encontrada nos resultados foi na faixa de 0,6 kV para a condição do maior defeito até 2,1 kV para a condição sem defeito na CCR. Observa-se no gráfico da Figura 5.9 que a tensão de início de descargas parciais não foi capaz de discriminar as barras com defeitos menores, por exemplo, de dimensão $1 \times 2 \text{ mm}^2$ e de $5 \times 10 \text{ mm}^2$ em relação à barra referência, que neste caso é a barra sem defeito na CCR.

Tabela 5.2 – Tabela das tensões de início de DP para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura.

Nº da Barra	Condição	Tensão de início de DP (kVca)			Média Aritmética
		1ª	2ª	3ª	
1	<i>Sem defeito</i>	5,5	4,9	7,0	5,80
	<i>1x2 mm²</i>	6,0	7,0	5,0	6,00
	<i>5x10 mm²</i>	5,0	5,0	4,5	4,83
	<i>10x20 mm²</i>	3,5	4,6	4,0	4,03
	<i>20x40 mm²</i>	2,2	3,0	2,4	2,53

Figura 5.9 - Gráfico das tensões de início de DP para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura.

Com o objetivo de definir o ruído de fundo do circuito de medição, foram medidas as descargas parciais Qiec em um nível de tensão bem abaixo da tensão de início das DP, que para a barra na condição sem defeito a PDIV foi na faixa de 4,9 a 7 kV. Por esse motivo o ruído de fundo foi determinado na tensão de teste de 2 kV, nesta condição foi medido a amplitude de Qiec que foi de aproximadamente 9 pC. Na Figura 5.10 é mostrado o gráfico de PRPD para o ruído de fundo do circuito de medição.

Figura 5.10 – PRPD da medição do ruído de fundo do circuito de medição de DP na tensão de teste em 2 kV utilizando a barra na condição sem defeito.

De forma semelhante, os resultados das amplitudes de descargas parciais (Q_{iec}) estão apresentados na Tabela 5.3, onde constam os três valores medidos de Q_{iec} , bem como sua média para cada condição da barra estatórica e tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV. Verifica-se uma tendência de que quanto maior o tamanho do defeito maior as amplitudes das DP para o mesmo nível de tensão. Entretanto, a variabilidade da medição de DP encontrada foi na faixa de algumas unidades de pC até aproximadamente 3700 pC. Nos gráficos da Figura 5.11 (Escala no eixo y ampliada) e Figura 5.12 (escala do eixo y reduzida) estão apresentados os valores médios e também foi adicionado a barra de erro composta dos valores máximos e mínimos de Q_{iec} medido dentre as três medições consecutivas de DP para cada condição. Portanto, observa-se que as amplitudes de descargas parciais não foram capazes de diferenciar as barras com defeitos menores, por exemplo, de dimensão $1 \times 2 \text{ mm}^2$ e de $5 \times 10 \text{ mm}^2$ em relação à barra referência, que neste caso é a barra sem defeito na CCR. Somente para a condição de defeito com dimensão $10 \times 20 \text{ mm}^2$ foi possível discriminar pela amplitude de Descargas Parciais (Q_{iec}) em relação à barra referência para todos os níveis de tensão.

Tabela 5.3 – Tabela das amplitudes de Descargas Parciais (Qiec em pC) para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura nas tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.

Nº da Barra	Tensão de Teste (kVca)	Condição	Medições Sequenciais de DP (pC)			Média Aritmética
			1ª	2ª	3ª	
1	7	<i>Sem defeito</i>	58	9	9	25
		<i>1x2 mm²</i>	5	5	5	5
		<i>5x10 mm²</i>	105	7	4	39
		<i>10x20 mm²</i>	502	528	223	418
		<i>20x40 mm²</i>	1759	778	849	1129
	11	<i>Sem defeito</i>	394	10	377	260
		<i>1x2 mm²</i>	6	17	288	104
		<i>5x10 mm²</i>	518	72	181	257
		<i>10x20 mm²</i>	1284	1324	1166	1258
		<i>20x40 mm²</i>	3647	3680	3583	3637
	15	<i>Sem defeito</i>	504	540	456	500
		<i>1x2 mm²</i>	123	401	407	310
		<i>5x10 mm²</i>	565	264	502	444
		<i>10x20 mm²</i>	1406	1356	1409	1390
		<i>20x40 mm²</i>	2680	4291	1577	2849
	20	<i>Sem defeito</i>	613	657	676	649
		<i>1x2 mm²</i>	611	604	576	597
		<i>5x10 mm²</i>	687	642	682	670
		<i>10x20 mm²</i>	1430	1217	1255	1301
		<i>20x40 mm²</i>	3807	1756	5414	3659

Figura 5.11 – Gráfico amplitudes de DP (Qiec) para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura (escala do eixo y ampliada).

Figura 5.12 – Gráfico amplitudes de DP (Qiec) para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura (escala do eixo y reduzida).

Devido às amplitudes de DP (Qiec) e as tensões de início de DP não distinguirem a barra com defeitos menores ($1 \times 2 \text{ mm}^2$ e $5 \times 10 \text{ mm}^2$) da barra sem defeito, foi avaliada a predominância de polaridade obtida através dos mapas de distribuição dos pulsos de DP em relação a tensão de teste aplicada (PRPD). Aplicando a metodologia descrita no item 7.2.3.1, os PRPD de todas as medições apresentadas na Tabela 5.3 foram avaliadas e a razão da predominância de polaridade de cada uma delas foi obtida e estão apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Tabela das razões aproximadas da predominância de polaridade das medições de Descargas Parciais para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura nas tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.

Nº da Barra	Tensão de Teste (kVca)	Condição	Razão aproximada da predominância de polaridade			Resultado
1	7	<i>Sem defeito</i>	1	1	1	
		$1 \times 2 \text{ mm}^2$	1	1	1	
		$5 \times 10 \text{ mm}^2$	1,8	2	1	
		$10 \times 20 \text{ mm}^2$	2	3	5	
		$20 \times 40 \text{ mm}^2$	3	3	6	
	11	<i>Sem defeito</i>	1	1	1	
		$1 \times 2 \text{ mm}^2$	1,4	1	1	
		$5 \times 10 \text{ mm}^2$	2	2	1,5	
		$10 \times 20 \text{ mm}^2$	2	1,8	2	
		$20 \times 40 \text{ mm}^2$	1,7	2,5	2,5	
	15	<i>Sem defeito</i>	1,6	1,7	1,3	
		$1 \times 2 \text{ mm}^2$	1,6	1,4	1,5	
		$5 \times 10 \text{ mm}^2$	2	1,6	1,8	
		$10 \times 20 \text{ mm}^2$	1,9	1,4	1,7	
		$20 \times 40 \text{ mm}^2$	1,5	1,2	1,4	
	20	<i>Sem defeito</i>	2	1,4	1,6	
		$1 \times 2 \text{ mm}^2$	1,2	1,4	1,3	
		$5 \times 10 \text{ mm}^2$	1,4	1,3	1,4	
		$10 \times 20 \text{ mm}^2$	1,8	1,5	1,6	
		$20 \times 40 \text{ mm}^2$	1	0,8	1,2	

Legenda:

Verde – As três medições de DP foram capazes de distinguir a barra com defeito da barra referência;

Amarelo – Uma ou duas medições de DP foram capazes de distinguir o defeito da barra referência;

Vermelho – Nenhuma das medições de DP distinguiu a barra com defeito da barra sem referência.

Analisando os resultados da Tabela 5.4, algumas conclusões podem ser obtidas:

- a. Os níveis de tensões de teste de 7 e 11 kV foram mais eficazes para distinguirem a barra na condição com defeito da barra sem defeito, pois na condição da barra sem defeito foi obtida razão unitária, ou seja, houve simetria entre os pulsos de DP positivos e negativos;
- b. As medições de DP para a barra sem defeito (referência) quando realizada nos níveis de tensões de teste de 15 e 20 kV apresentaram predominância de polaridade positiva. Como a barra de teste foi projetada para operar em máquinas rotativas de 11 kV, tensões de teste muito acima deste valor podem iniciar outros tipos de descargas de superfície, tanto no objeto de teste quanto no arranjo experimental utilizado;
- c. A barra com defeito de dimensão $1 \times 2 \text{ mm}^2$, ou seja, o menor defeito pode ser identificado somente em uma medição de DP na tensão de teste em 11 kV. Como explicado na seção 2.4, o campo elétrico paralelo a superfície da isolação exposta é maior na borda, no caso do menor defeito, a área da isolação exposta é muito pequena e, portanto, as bordas da CCR estão muito próximas, ocasionando assim a ionização do ar nesta pequena região exposta da isolação, fazendo com que as DPs sejam reduzidas ou até mesmo extinguidas;
- d. A barra com defeito de dimensão $5 \times 10 \text{ mm}^2$, ou seja, o segundo menor defeito, pode ser identificado em todas as medições de DP no nível de tensão de 11 kV. Entretanto, para o nível de tensão de teste em 7 kV ela pode ser identificada em duas das três medições. Uma possível explicação é que a tensão de 7 kV foi muito baixa para iniciar todas as descargas de superfície.

Nas Figuras 5.13 a 5.16 seguintes, são apresentados 20 exemplos de PRPD obtidos, e o procedimento utilizado para determinar a razão da predominância de polaridade. No anexo A consta todos PRPD obtidos.

Figura 5.13 – Alguns exemplos de PRPD provenientes das medições de DP em 7 kV da barra na condição sem e com defeitos mostrando como a razão da predominância de polaridade foi determinada.

Figura 5.14 – Alguns exemplos de PRPD provenientes das medições de DP em 11 kV da barra na condição sem e com defeitos mostrando como a razão da predominância de polaridade foi determinada.

Figura 5.15 – Alguns exemplos de PRPD provenientes das medições de DP em 15 kV da barra na condição sem e com defeitos mostrando como a razão da predominância de polaridade foi determinada.

Figura 5.16 – Alguns exemplos de PRPD provenientes das medições de DP em 20 kV da barra na condição sem e com defeitos mostrando como a razão da predominância de polaridade foi determinada.

5.3.3 Etapa 2 – Medição das Descargas Parciais (Baixa Frequência) com diferentes eletrodos de aterramento

Como os eletrodos fazem parte do circuito de medição e por ser montado na parte reta da barra estatórica onde está localizado a CCR, foi estudada a influência do arranjo de eletrodos nos resultados das medições das Descargas Parciais. O objetivo principal foi verificar qual tipo de arranjo de eletrodos seria mais eficiente para a identificação dos defeitos na CCR das barras estatóricas. Basicamente três tipos foram avaliados conforme Figuras 5.17 a 5.19:

Tipo A – O defeito está exposto e apenas uma face da barra está em contato com a placa metálica de aterramento;

Tipo B – As duas faces da barra estão em contato com a placa metálica aterrada cobrindo assim o defeito. Este tipo é o recomendado pelas normas internacionais de medição de DP [2];

Tipo C – Uma das placas está em contato com a barra e a outra onde está localizado o defeito está distanciada de 1 mm.

Para os três tipos de arranjo de eletrodo foi utilizada a barra com defeito de $20 \times 40 \text{ mm}^2$, por fornecer as maiores amplitudes de Qiec verificados na Etapa 1.

Figura 5.17 – Arranjo de eletrodo TIPO A utilizado na medição de DP em baixa frequência.

Figura 5.18 – Arranjo de eletrodo TIPO B utilizado na medição de DP em baixa frequência.

Figura 5.19 – Arranjo de eletrodo TIPO C utilizado na medição de DP em baixa frequência.

Utilizando o sistema de medição H (HAEFELY), foram verificados três tipos de arranjo de eletrodos nas tensões de 7 e 11 kV e os resultados das amplitudes de DP (Qiec) estão apresentados na Tabela 5.5. Para cada arranjo de eletrodo o sistema de medição de DP foi calibrado com pulsos de DP de 500 pC.

As condições ambientais foram:

Temperatura = 22,0 °C;

Umidade Relativa = 63,0 %;

Pressão atmosférica = 93,22 kPa.

Tabela 5.5 – Tabela dos resultados das amplitudes de DP (Qiec) obtidos das três medições consecutivas da barra com maior defeito variando apenas o tipo de arranjo de eletrodos.

Nº da Barra	Condição	Tensão de Teste (kVac)	Arranjo de Eletrodos	Medições Sequenciais de DP (pC)		
				1ª	2ª	3ª
1	20x40 mm ²	7	TIPO A	913	400	777
			TIPO B	127	89	47
			TIPO C	1720	1257	1263
		11	TIPO A	6931	3479	5086
			TIPO B	233	209	192
			TIPO C	1184	1091	1017

Nos resultados das amplitudes de descargas parciais (Qiec) apresentados na Tabela 5.5, verifica-se que as maiores amplitudes de Qiec foram obtidas com o arranjo de eletrodo do TIPO C para o nível de tensão em 7 kV e com o arranjo TIPO A para tensão de teste de 11 kV. Nos gráficos das Figuras 5.20 e 5.21 estão apresentados os valores de Qiec obtidos em 7 kV e 11 kV, respectivamente, onde verifica-se que os menores valores encontrados foram no arranjo de eletrodos TIPO B. Tal fenômeno pode ser explicado pela ionização do ar contido no pequeno vão entre a isolação e a base metálica na região do defeito diminuindo o gradiente de tensão. Estima-se que a espessura desse vão seja próxima a espessura da camada condutiva de ranhura que é de aproximadamente 0,15 mm.

Figura 5.20 – Gráfico dos resultados de Qiec das três medições consecutivas utilizando diferentes arranjos de eletrodo. A tensão de teste utilizada foi de 7 kV.

Figura 5.21 – Gráfico dos resultados de Qiec das três medições consecutivas utilizando diferentes arranjos de eletrodo. A tensão de teste utilizada foi de 11 kV.

Em seguida, foi avaliada a predominância de polaridade obtida através dos mapas de distribuição dos pulsos de DP em relação a tensão de teste aplicada (PRPD). Aplicando a metodologia descrita no item 7.2.3.1, os PRPD de todas as medições apresentadas na Tabela 5.5 foram avaliados e a razão aproximada da predominância de polaridade de cada uma delas foi obtida e estão apresentadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Tabela das razões aproximadas da predominância de polaridade das medições de Descargas Parciais para a barra com defeito de 20x40 mm² na CCR nas tensões de teste de 7 e 11 kV.

Nº da Barra	Condição	Tensão de Teste (kV)	Arranjo de Eletrodos	Razão aproximada da predominância de polaridade			Resultado
				1ª	2ª	3ª	
1	20x40 mm ²	7	TIPO A	3,3	8	3,7	Verde
			TIPO B	0,7	0,2	0,3	Vermelho
			TIPO C	0,7	1,2	2,5	Amarelo
		11	TIPO A	1,9	1,8	2,3	Verde
			TIPO B	1,8	2,1	2,2	Verde
			TIPO C	1	1,4	1,6	Amarelo

Legenda:

Verde – As três medições de DP apresentaram razão de predominância de polaridade maior que 1;

Amarelo – Uma ou duas medições de DP apresentaram razão de predominância de polaridade maior que 1;

Vermelho – Nenhuma das medições de DP apresentaram razão de predominância de polaridade maior que 1.

Analisando os resultados da Tabela 10, algumas conclusões podem ser obtidas:

- Comparando os três tipos de arranjo de eletrodos, apenas o TIPO A obteve razões de predominância de polaridade maiores que 1 para as três medições consecutivas e também para os dois níveis de tensão de teste (7 e 11 kV);
- O arranjo de eletrodo do TIPO B na tensão de teste de 7 kV apresentou razões de predominância de polaridade menores que 1 para as três medições consecutivas;
- O arranjo de eletrodo TIPO C na tensão de teste de 7 kV apresentou em uma das medições, razão de predominância de polaridade menor que 1. E na tensão de 11 kV em uma das medições apresentou razão de predominância de polaridade igual a 1.

Nas Figuras 5.22 a 5.27 seguintes, são apresentados os PRPD obtidos, e o procedimento utilizado para determinar a predominância de polaridade.

Figura 5.22 – PRPD provenientes das medições de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A.

Figura 5.23 – PRPD provenientes das medições de DP em 11 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A.

Figura 5.24 – PRPD provenientes das medições de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO B.

Figura 5.25 – PRPD provenientes das medições de DP em 11 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO B.

Figura 5.26 – PRPD provenientes das medições de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO C.

Figura 5.27 – PRPD provenientes das medições de DP em 11 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO C.

5.3.3.1 Etapa 2 – Comparação do tempo de registro das Descargas Parciais (Baixa Frequência) com eletrodo de aterramento TIPO A.

Um dos parâmetros estudado e analisado foi o tempo de registro dos pulsos de DP, para isso foram realizadas duas medições de DP consecutivas com a barra na condição com defeito de 20x40 mm² na tensão de teste de 7 kV e 11 kV, a primeira com tempo de registro de 1 minuto (Figuras 5.28 e 5.30) e a segunda com exatamente o dobro de tempo da primeira, ou seja, 2 minutos (Figuras 5.29 e 5.31). Os resultados das amplitudes de DP (Qiec) e da razão aproximada da predominância de polaridade quando medidos com tempo de registro de 1 e 2 minutos estão apresentados na Tabela 5.7.

As condições ambientais foram:

Temperatura = 20,7 °C;

Umidade Relativa = 60,2 %;

Pressão atmosférica = 93,25 kPa.

Tabela 5.7 – Tabela das amplitudes e razões aproximadas da predominância de polaridade das medições de Descargas Parciais da barra com defeito 20x40 mm² na tensão de teste de 7 e 11 kV, variando o tempo de registro das DP em 1 e 2 minutos.

Nº da Barra	Condição	Tempo de Registro (min)	Tensão de Teste (kV)	Qiec (pC)	Razão aprox. da predominância
1	20x40 mm ²	1	7	638	5,5
			11	6931	1,7
		2	7	593	5,3
			11	4719	1,9

Verificou-se que não houve diferença significativa porque apresentou variação semelhante aos valores observados durante a Etapa 1, para a barra na condição de defeito 20x40 mm² e nas tensões de teste de 7 kV e 11 kV.

Nas Figuras 5.28 a 5.31 seguintes, são apresentados os PRPD obtidos, e o procedimento utilizado para determinar a predominância de polaridade.

Figura 5.28 – PRPD proveniente da medição de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A com tempo de registro dos pulsos de DP de 1 minuto.

Figura 5.29 – PRPD proveniente da medição de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A com tempo de registro dos pulsos de DP de 2 minutos.

Figura 5.30 – PRPD proveniente da medição de DP em 11 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A com tempo de registro dos pulsos de DP de 1 minuto.

Figura 5.31 – PRPD proveniente da medição de DP em 11 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A com tempo de registro dos pulsos de DP de 2 minutos.

5.3.3.2 Etapa 2 – Comparação do limite mínimo de leitura na medição das Descargas Parciais (Baixa Frequência) com eletrodo de aterramento TIPO A.

O segundo parâmetro analisado foi o limite mínimo de DP, para isso foram realizadas duas medições em sequência de DP com a barra na condição com defeito de 20x40 mm² na tensão de teste de 7 kV, a primeira sem limite mínimo de DP, ou seja, todas as amplitudes Qiec são registradas (Figura 5.32) e a segunda com limite mínimo de DP igual a 50 pC, ou seja, apenas DP com amplitudes iguais ou maiores do que 50 pC são registradas (Figura 5.33).

As condições ambientais foram:

Temperatura = 20,7 °C;

Umidade Relativa = 60,2 %;

Pressão atmosférica = 93,25 kPa.

Os resultados das amplitudes de DP (Qiec) e razão aproximada da predominância de polaridade estão apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Tabela amplitudes de DP (Qiec) e razão aproximada da predominância de polaridade para a barra com defeito de 20x40 mm² na CCR, tensão de teste de 7 kV, com e sem limite mínimo de leitura da medição de DP.

Nº da Barra	Tensão de Teste (kVca)	Condição	Limite mínimo de leitura da medição de DP (pC)	Qiec (pC)	Razão aprox. da predominância de polaridade
1	7	20x40 mm ²	Sem limite	1472	3,0
			≥ 50	1035	3,5

Os resultados das amplitudes de DP (Qiec), na primeira medição sem limite foi de 1472 pC e para a medição com limite foi de 1035 pC, ou seja, um pouco menor em relação à medição sem limite, entretanto, a variação de DP encontrada pode ser considerada normal baseada nas variações encontradas de DP nas medições da Etapa 1. Em adição foi analisada a razão aproximada da predominância de polaridade, a qual não apresentou diferença significativa, que neste caso a razão da predominância de polaridade na medição sem limite de DP foi de 3,0 e para a medição com limite foi de 3,5. Nas Figuras 5.32 a 5.33 seguintes,

são apresentados os PRPD obtidos, e o procedimento utilizado para determinar a predominância de polaridade.

Figura 5.32 – PRPD proveniente da medição de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A com tempo de registro dos pulsos de DP de 1 minuto e sem limite mínimo de DP.

Figura 5.33 – PRPD proveniente da medição de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm² utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A com tempo de registro dos pulsos de DP de 1 minuto e com limite mínimo de DP de 50 pC.

5.3.3.3 Etapa 2 – Comparação da Medição das Descargas Parciais (Baixa Frequência) com eletrodo de aterramento TIPO A antes e após reparo do defeito 20x40 mm² na CCR da barra estatórica.

Foram realizadas medições de DP na barra na condição com defeito de 20x40 mm² (Figura 5.34) e também após o reparo do defeito que foi realizado utilizando uma pintura condutiva a base de resina dopada com pó de grafite, esta pintura tem resistência elétrica superficial na ordem de alguns k Ω por quadrado (Figura 5.35).

Figura 5.34 – Barra estatórica com defeito de 20x40 mm² na camada condutiva de ranhura.

Figura 5.35 – Barra estatórica após reparo do defeito de 20x40 mm² na camada condutiva de ranhura utilizando a pintura condutiva.

As medições de DP na barra na condição com defeito de 20x40 mm² e após reparo, utilizaram o tempo de registro de 1 minuto e sem limite mínimo de DP, e foram realizadas nas tensões de 7 kV (Figuras 5.36 e 5.37) e 11 kV (Figuras 5.38 e 5.39).

As condições ambientais foram:

Temperatura = 20,7 °C;

Umidade Relativa = 60,2 %;

Pressão atmosférica = 93,25 kPa.

Os resultados das amplitudes de DP (Q_{iec}) e razão aproximada da predominância de polaridade estão apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Tabela das razões aproximadas da predominância de polaridade das medições de Descargas Parciais para a barra com defeito de 20x40 mm² na CCR nas tensões de teste de 7 e 11 kV.

Nº da Barra	Tensão de Teste (kV)	Condição	Q _{iec} (pC)	Razão aprox. da predominância de polaridade
1	7	20x40 mm ²	1118	2,5
		Após Reparo	9	N. A.
	11	20x40 mm ²	3126	2,4
		Após Reparo	14	1

Verificou-se que houve grande redução da amplitude de DP (Q_{iec}) comparando a barra com defeito da barra na condição após reparo mostrando assim que o reparo foi eficiente retornando a barra para a condição inicial dos testes realizados no início deste projeto. De maneira semelhante, foi observado que para a barra com defeito, a razão aproximada da predominância de polaridade positiva nas tensões de teste de 7 kV e 11 kV, foram respectivamente 2,5 e 2,4, entretanto, após reparo do defeito, estas foram reduzidas para aproximadamente 1 na tensão de teste em 11 kV, ou seja, não houve predominância de polaridade, e para a tensão de teste de 7 kV não foi possível avaliar porque a amplitude de DP foi muito baixa, praticamente no nível de ruído de fundo do circuito de medição de DP.

Nas Figuras 5.36 a 5.39 seguintes, são apresentados os PRPD obtidos, e o procedimento utilizado para determinar a predominância de polaridade.

Figura 5.36 – PRPD proveniente da medição de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm² na CCR utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A.

Figura 5.37 – PRPD proveniente da medição de DP em 7 kV da barra na condição após reparo do defeito 20x40 mm² na CCR utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A.

Figura 5.38 – PRPD proveniente da medição de DP em 11 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm² na CCR utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A.

Figura 5.39 – PRPD proveniente da medição de DP em 11 kV da barra na condição após reparo do defeito 20x40 mm² na CCR utilizando o arranjo de eletrodo TIPO A.

5.3.4 Registro das imagens ultravioleta (UV) das descargas superficiais na região do defeito na CCR (Defeito com dimensão de $20 \times 40 \text{ mm}^2$).

Foram registradas as imagens UV geradas pelas DP na região do maior defeito na CCR, ou seja, $20 \times 40 \text{ mm}^2$, nos níveis de tensão de teste de 7, 11, 15 e 20 kV. Duas câmeras foram utilizadas para o registro da imagem, a CoroCAM I de fabricação UViRCO Technologies que possui filtro de banda larga e UV, também foi utilizada uma câmera fotográfica de fabricação CANON, modelo T6i de 24 megapixels, no modo de exposição com tempo de 30 segundos, ambas posicionadas conforme ilustrado no arranjo experimental mostrado na Figura 5.40. Observa-se que este arranjo é o mesmo utilizado na medição de DP em baixa frequência.

Figura 5.40 – Arranjo experimental utilizado para registro das imagens UV mostrando o posicionamento das câmeras 1) Barra estatórica, 2) Fonte de alta tensão, 3) Câmera fotográfica, 4) Câmera CoroCAM I e 5) Localização do defeito na CCR.

Como explicado anteriormente na seção 2.4, o campo elétrico é maior na borda da área exposta da isolação, ou seja, na interface entre a CCR e isolação, nesta condição o campo elétrico aumenta suficientemente para ionizar o ar, portanto, na tensão de teste de 7 kV, foi observado que as descargas superficiais se iniciam na borda da CCR na região do defeito

(Figuras 5.41 e 5.42). Conforme a Tabela 5.2 na seção 5.3.2, a tensão de início de DP para o defeito de dimensão 20x40 mm², foi de 2,2 kV a 3 kV.

Verificou-se que à medida que a tensão de teste vai aumentando as descargas superficiais evoluem em direção ao centro do defeito preenchendo a região exposta. Este preenchimento ocasiona a ionização do ar na região defeituosa corroborando com o que foi observado sobre as amplitudes médias de DP (Q_{iec}) nas tensões de teste de 11, 15 e 20 kV sejam muito parecidas.

As condições ambientais foram:

Temperatura = 21,3 °C;

Umidade Relativa = 61,5 %;

Pressão atmosférica = 93,52 kPa.

Figura 5.41 –Imagens da região do defeito na CCR – Primeira foto com a câmera no modo de exposição desligado e as seguintes com o modo de exposição ligado na tensão de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.

a) Imagem da região do defeito com modo de exposição desligado.

b) Imagem da região do defeito com modo de exposição ligado.
Tensão de teste de 7 kV

c) Imagem da região do defeito com modo de exposição ligado.
Tensão de teste de 11 kV

d) Imagem da região do defeito com modo de exposição ligado.
Tensão de teste de 15 kV

e) Imagem da região do defeito com modo de exposição ligado.
Tensão de teste de 20 kV

Figura 5.42 – Imagens da região do defeito na CCR – Primeira foto com a câmera no modo UV desligado e as seguintes com o modo UV ligado na tensão de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.

a) Imagem da região do defeito com modo UV desligado.

b) Imagem da região do defeito com modo UV ligado.
Tensão de teste de 7 kV

c) Imagem da região do defeito com modo UV ligado.
Tensão de teste de 11 kV

d) Imagem da região do defeito com modo UV ligado.
Tensão de teste de 15 kV

e) Imagem da região do defeito com modo UV ligado.
Tensão de teste de 20 kV

5.3.5 Etapa 3 – Medição do fator de dissipação dielétrica (Tangente delta)

O fator de dissipação dielétrica em porcentagem e a capacitância da barra estatórica foram medidas nas seguintes tensões de teste:

0,2 U_n = 2,2 kV;

0,4 U_n = 4,4 kV;

0,6 U_n = 6,6 kV;

0,8 U_n = 8,8 kV;

1,0 U_n = 11 kV.

Os resultados dos testes estão apresentados na Tabela 5.10 e graficamente nas Figuras 5.43 e 5.44.

As condições ambientais foram:

Temperatura: 24,9 °C;

Umidade relativa: 52,3 %.

Tabela 5.10 – Resultados das medições de FD medido na barra estatórica #2

Barra #2	Tensão de teste (kV)	2,23	4,42	6,64	8,79	11,03
	FD % (Tan delta)	1,17	1,21	1,36	1,45	1,5
	Cp (pF)	1551	1553	1556	1560	1563

Figura 5.43 – Gráfico dos resultados das medições do FD em % em função da tensão de teste.

Figura 5.44 – Gráfico dos resultados das medições de capacitância em pF em função da tensão de teste.

Analisando os resultados de FD e capacitância verifica-se pouca variação desses valores entre os níveis de tensão de teste, especificamente para o FD a maior variação encontrada foi entre a tensão de teste de 0,4 e 0,6Un, nas quais o FD variou apenas 0,15 %. A norma IEC 60034-27-3 [4], apresenta como valores característicos de variação de DF entre patamares de tensões de 0,2Un de 0,5 %. Ou seja, uma barra estatórica que apresenta variações de FD até 0,5 % seria considerada uma isolamento com vazios na isolamento em quantidade normal e aceitável, entretanto o valor apresentado pelo objeto de teste nesta

pesquisa apresentou um valor de apenas 30 % em relação aos valores apresentados pela norma IEC, mostrando então que existem poucos vazios no interior da isolação da barra estatórica.

5.3.6 Etapa 3 – Medição de descargas parciais em Alta Frequência

Esta etapa foi constituída de 5 fases, na primeira fase foi medida as DP na barra estatórica referência, ou seja, sem defeito, por três vezes consecutivas, com propósito de verificar a variabilidade da medição de DP. A segunda fase, foi realizado um defeito na camada condutiva de ranhura desta mesma barra com dimensão de $1 \times 2 \text{ mm}^2$, esta barra foi submetida por três vezes as medições de DP. Em seguida, o defeito anterior foi aumentado para $5 \times 10 \text{ mm}^2$ de dimensão e então mais três medições de DP foram executadas (terceira fase). Da mesma maneira, defeitos de $10 \times 20 \text{ mm}^2$ e $20 \times 40 \text{ mm}^2$ foram executados e consecutivamente três medições de DP.

As condições ambientais durante os dois dias de medição foram:

Temperatura: 24 °C (primeiro dia) e 25 °C (segundo dia);

Umidade relativa: 48 % (primeiro dia) e 69 % (segundo dia).

No fluxograma da Figura 5.45 são apresentados a sequência dos testes realizados.

Figura 5.45 – Fluxograma da sequência das medições de DP.

Cada uma das medições de DP foram realizadas em quatro níveis de tensão e os dados de DP foram adquiridos durante 1 minuto para cada nível de tensão. O primeiro nível foi na tensão fase-terra (7 kV) que é a tensão que a região com defeito na CCR será submetida durante operação normal no gerador, o segundo nível foi na tensão nominal do gerador (11 kV), o terceiro a 40 % acima da tensão nominal (15 kV) e o último nível a 80 % acima da tensão nominal do gerador (20 kV). Foram escolhidas tensões maiores do que a tensão fase-terra (tensão real de operação no gerador) com o objetivo de gerar mais DPs na região do defeito e verificar se tensões de testes maiores auxiliam na identificação dos defeitos.

Para conhecer o ruído de fundo do circuito de medição, foram medidas as descargas parciais Qm em um nível de tensão bem abaixo da tensão de início das DP. O ruído de fundo foi determinado na tensão de teste de 2 kV, nesta condição foi medido a amplitude de Qm que foi menor que 20 mV (menor amplitude medida pelo equipamento). Na Figura 5.46 é mostrado o gráfico de PRPD para o ruído de fundo do circuito de medição. Nota-se como a medição é realizada em Frequência Muito Alta e o laboratório de ensaios elétricos está longe de fontes de perturbações industriais, então o ruído ambiente não é significativo.

Figura 5.46 – Mapa de distribuição estatístico dos pulsos de DP em relação à Fase (PRPD) do ruído de fundo do circuito de medição em Frequência Muito Alta medido na tensão de teste em 2 kV.

Os resultados das amplitudes de descargas parciais (+Qm e -Qm) estão apresentados na Tabela 5.11, nesta constam os três valores medidos de Qm positivo e negativo, bem como sua média para cada condição da barra estatórica e tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.

Tabela 5.11 – Tabela das amplitudes de Descargas Parciais (Qm em mV) para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura nas tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.

Nº da Barra	Tensão de Teste (kVca)	Condição	Medições Sequenciais de DP (mV)						Média Aritmética	
			1ª		2ª		3ª			
			+Qm	-Qm	+Qm	-Qm	+Qm	-Qm	+Qm	-Qm
2	7	Sem defeito	47	38	29	22	20	20	32	27
		1x2 mm ²	20	20	20	20	20	20	20	20
		5x10 mm ²	20	20	20	20	20	20	20	20
		10x20 mm ²	20	20	20	20	20	20	20	20
		20x40 mm ²	20	20	20	20	20	20	20	20
	11	Sem defeito	58	53	70	52	58	44	62	50
		1x2 mm ²	73	20	73	20	75	20	74	20
		5x10 mm ²	66	20	76	37	20	20	54	26
		10x20 mm ²	52	20	35	22	52	21	46	21
		20x40 mm ²	96	53	117	20	66	20	93	31
	15	Sem defeito	74	31	79	23	91	35	81	30
		1x2 mm ²	96	20	93	60	99	72	96	51
		5x10 mm ²	91	20	91	20	98	65	93	35
		10x20 mm ²	76	30	74	37	79	29	76	32
		20x40 mm ²	120	20	141	76	112	69	124	55
	20	Sem defeito	87	39	91	57	92	63	90	53
		1x2 mm ²	95	63	96	72	104	74	98	70
		5x10 mm ²	95	69	96	72	96	71	96	71
		10x20 mm ²	86	52	79	57	86	62	84	57
		20x40 mm ²	157	79	133	187	186	185	159	150

A variabilidade da medição de DP encontrada para Qm positivo foi na faixa de algumas unidades de mV até aproximadamente 90 mV. Nos gráficos da Figura 5.47 estão apresentados os valores médios de +Qm e também foi adicionada a barra de erro composta dos valores máximos e mínimos de -Qm medido nas três medições consecutivas de DP para cada condição. Portanto, observa-se que as amplitudes de descargas parciais (+Qm) não foram capazes de distinguir as barras com defeitos menores em relação a barra referência, que neste caso é a barra sem defeito na CCR. Somente para a condição de defeito com maior dimensão 20x40 mm² exclusivamente na tensão de teste de 15 kV foi possível discriminar pela amplitude de Descargas Parciais (Qm) em relação a barra referência.

Figura 5.47 – Gráfico amplitudes de DP (+Qm) para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura nas tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.

Devido as amplitudes de DP (+Qm) não distinguirem a barra com defeitos menores ($1 \times 2 \text{ mm}^2$, $5 \times 10 \text{ mm}^2$ e $10 \times 20 \text{ mm}^2$) da barra sem defeito, foi avaliada a predominância de polaridade obtida através da divisão do valor de Qm positivo pelo Qm negativo. Os PRPD de todas as medições apresentadas na Tabela 5.11 foram avaliadas e a razão da predominância de polaridade de cada uma delas foi calculada e estão apresentadas na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Tabela das razões aproximadas da predominância de polaridade das medições de Descargas Parciais para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura nas tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.

Nº da Barra	Tensão de Teste (kVca)	Condição	Razão de predominância de polaridade			Resultado
			1ª	2ª	3ª	
2	7	<i>Sem defeito</i>	1,2	1,3	1,0	
		<i>1x2 mm²</i>	1,0	1,0	1,0	
		<i>5x10 mm²</i>	1,0	1,0	1,0	
		<i>10x20 mm²</i>	1,0	1,0	1,0	
		<i>20x40 mm²</i>	1,0	1,0	1,0	
	11	<i>Sem defeito</i>	1,1	1,3	1,3	
		<i>1x2 mm²</i>	3,7	3,7	3,8	
		<i>5x10 mm²</i>	3,3	2,1	1,0	
		<i>10x20 mm²</i>	2,6	1,6	2,5	
		<i>20x40 mm²</i>	1,8	5,9	3,3	
	15	<i>Sem defeito</i>	2,4	3,4	2,6	
		<i>1x2 mm²</i>	4,8	1,6	1,4	
		<i>5x10 mm²</i>	4,6	4,6	1,5	
		<i>10x20 mm²</i>	2,5	2,0	2,7	
		<i>20x40 mm²</i>	6,0	1,9	1,6	
	20	<i>Sem defeito</i>	2,2	1,6	1,5	
		<i>1x2 mm²</i>	1,5	1,3	1,4	
		<i>5x10 mm²</i>	1,4	1,3	1,4	
		<i>10x20 mm²</i>	1,7	1,4	1,4	
		<i>20x40 mm²</i>	2,0	0,7	1,0	

Legenda:

Verde – As três medições de DP foram capazes de distinguir a barra com defeito da barra referência;

Amarelo – Uma ou duas medições de DP foram capazes de distinguir o defeito da barra referência;

Vermelho – Nenhuma das medições de DP distinguiu a barra com defeito da barra sem referência.

Analisando os resultados da Tabela 5.12, algumas conclusões podem ser obtidas:

- a. O nível de tensão de teste em 11 kV foi mais eficaz para distinguir a barra na condição com defeito da barra sem defeito;
- b. As medições de DP para a barra sem defeito (referência) quando realizada nos níveis de tensões de teste de 15 e 20 kV apresentaram razão de predominância de polaridade positiva maiores que 1,5;
- c. As medições de DP na tensão de teste em 7 kV não produziram DP maiores do que o valor mínimo de 20 mV e por isto os valores calculados da razão de predominância de polaridade foram próximos de 1;
- d. A barra com defeito de dimensão $1 \times 2 \text{ mm}^2$, ou seja, o menor defeito pode ser identificado nas três medições de DP na tensão de teste em 11 kV;
- e. A barra com defeito de dimensão $5 \times 10 \text{ mm}^2$, foi identificado em duas das três medições de DP no nível de tensão de 11 kV e 15 kV.

Nas Figuras 5.48 a 5.52 seguintes, são apresentados exemplos de PRPD obtidos das medições em 11 kV para as cinco condições da barra (sem e com defeitos de diferentes dimensões).

Figura 5.48 – PRPD proveniente das três medições de DP em 11 kV da barra na condição sem defeito.

Figura 5.49 – PRPD proveniente das três medições de DP em 11 kV da barra na condição com defeito $1 \times 2 \text{ mm}^2$.

Figura 5.50 – PRPD proveniente das três medições de DP em 11 kV da barra na condição com defeito $5 \times 10 \text{ mm}^2$.

$+Q_m = 66 \text{ mV}$; $-Q_m = < 20 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

$+Q_m = 76 \text{ mV}$; $-Q_m = 37 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

$+Q_m = < 20 \text{ mV}$; $-Q_m = < 20 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

Figura 5.51 – PRPD proveniente das três medições de DP em 11 kV da barra na condição com defeito $10 \times 20 \text{ mm}^2$.

$+Q_m = 52 \text{ mV}$; $-Q_m = < 20 \text{ mV}$

$+Q_m = 35 \text{ mV}$; $-Q_m = 22 \text{ mV}$

$+Q_m = 52 \text{ mV}$; $-Q_m = 21 \text{ mV}$

Figura 5.52 - PRPD proveniente das três medições de DP em 11 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm².

Os resultados do Número de Quantidade Normalizado (+NQN e -NQN) estão apresentados na Tabela 5.13, nesta constam os três valores medidos de NQN positivo e negativo, bem como sua média para cada condição da barra estatórica e tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.

Tabela 5.13 – Tabela das amplitudes de Descargas Parciais (NQN) para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura nas tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.

Nº da Barra	Tensão de Teste (kVac)	Condição	Medições Sequenciais de DP						Média Aritmética	
			1ª		2ª		3ª			
			+NQN	-NQN	+NQN	-NQN	+NQN	-NQN	+NQN	-NQN
2	7	Sem defeito	65	51	26	21	12	3	34	25
		1x2 mm ²	1	1	1	1	5	1	2	1
		5x10 mm ²	1	1	3	1	1	1	2	1
		10x20 mm ²	14	5	19	14	25	11	19	10
		20x40 mm ²	52	5	15	3	14	6	27	5
	11	Sem defeito	94	80	118	78	100	69	104	76
		1x2 mm ²	85	27	87	37	93	25	88	30
		5x10 mm ²	68	21	125	46	56	13	83	27
		10x20 mm ²	75	25	73	26	78	33	75	28
		20x40 mm ²	172	74	164	39	99	31	145	48
	15	Sem defeito	108	62	120	63	136	73	121	66
		1x2 mm ²	131	77	128	74	133	80	131	77
		5x10 mm ²	113	46	111	53	128	64	117	54
		10x20 mm ²	134	48	114	68	113	56	120	57
		20x40 mm ²	240	62	254	102	193	94	229	86
	20	Sem defeito	145	80	144	78	161	93	150	84
		1x2 mm ²	162	81	162	102	176	101	167	95
		5x10 mm ²	147	79	136	76	157	94	147	83
		10x20 mm ²	171	77	153	84	162	82	162	81
		20x40 mm ²	330	122	269	283	295	230	298	212

A variabilidade da medição de DP encontrada para NQN positivo foi na faixa de algumas unidades até aproximadamente 150. Nos gráficos da Figura 5.53 estão apresentados os valores médios de +NQN e também foi adicionada a barra de erro composta dos valores máximos e mínimos de +NQN medido dentre as três medições consecutivas de DP para cada condição. Portanto, observa-se que o número de quantidade normalizada (+NQN) não possibilitou distinguir as barras com defeitos menores em relação a barra referência, que neste caso é a barra sem defeito na CCR. Somente para a condição de defeito com maior dimensão 20x40 mm² exclusivamente nas tensões de teste de 15 kV e 20 kV foi possível discriminar utilizando o NQN positivo em relação a barra referência.

Figura 5.53 – Gráfico do Número de Quantidade Normalizada (+NQN) para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura nas tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.

Pelos resultados de NQN positivo (+NQN) não distinguem a barra com defeitos menores ($1 \times 2 \text{ mm}^2$, $5 \times 10 \text{ mm}^2$ e $10 \times 20 \text{ mm}^2$) da barra sem defeito, foi avaliada a predominância de polaridade obtida através da divisão do valor de NQN positivo pelo NQN negativo. Os PRPD de todas as medições apresentadas na Tabela 5.13 foram avaliadas e a

razão da predominância de polaridade de cada uma delas foi calculada e estão apresentadas na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Tabela das razões aproximadas da predominância de polaridade das medições de Descargas Parciais (+NQN / -NQN) para a barra sem e com defeitos na camada condutiva de ranhura nas tensões de teste de 7, 11, 15 e 20 kV.

Nº da Barra	Tensão de Teste (kVca)	Condição	Razão de predominância de polaridade			Resultado
			1ª	2ª	3ª	
2	7	<i>Sem defeito</i>	1,3	1,2	4,0	
		<i>1x2 mm²</i>	1,0	1,0	5,0	
		<i>5x10 mm²</i>	1,0	3,0	1,0	
		<i>10x20 mm²</i>	2,8	1,4	2,3	
		<i>20x40 mm²</i>	10,4	5,0	2,3	
	11	<i>Sem defeito</i>	1,2	1,5	1,4	
		<i>1x2 mm²</i>	3,1	2,4	3,7	
		<i>5x10 mm²</i>	3,2	2,7	4,3	
		<i>10x20 mm²</i>	3,0	2,8	2,4	
		<i>20x40 mm²</i>	2,3	4,2	3,2	
	15	<i>Sem defeito</i>	1,7	1,9	1,9	
		<i>1x2 mm²</i>	1,7	1,7	1,7	
		<i>5x10 mm²</i>	2,5	2,1	2,0	
		<i>10x20 mm²</i>	2,8	1,7	2,0	
		<i>20x40 mm²</i>	3,9	2,5	2,1	
	20	<i>Sem defeito</i>	1,8	1,8	1,7	
		<i>1x2 mm²</i>	2,0	1,6	1,7	
		<i>5x10 mm²</i>	1,9	1,8	1,7	
		<i>10x20 mm²</i>	2,2	1,8	2,0	
		<i>20x40 mm²</i>	2,7	1,0	1,3	

Legenda:

Verde – As três medições de DP foram capazes de distinguir a barra com defeito da barra referência;

Amarelo – Uma ou duas medições de DP foram capazes de distinguir o defeito da barra referência;

Vermelho – Nenhuma das medições de DP distinguiu a barra com defeito da barra sem referência.

Analisando os resultados da Tabela 5.14, algumas conclusões podem ser obtidas:

- a. O nível de tensão de teste em 11 kV foi mais eficaz para distinguir a barra na condição com defeito da barra sem defeito;
- b. As medições de DP para a barra sem defeito (referência) apresentaram razão de predominância de polaridade positiva iguais e maiores que 1,2 para todos os níveis de tensões de teste;
- c. Algumas medições de DP na tensão de teste em 7 kV não produziram DP maiores do que o valor mínimo de 20 mV fazendo com que os valores de NQN fossem muito baixos e, portanto, os valores calculados da razão de predominância de polaridade foram próximos de 1;
- d. A barra com defeito de dimensão $1 \times 2 \text{ mm}^2$, ou seja, o menor defeito pode ser identificado nas três medições de DP somente na tensão de teste em 11 kV;
- e. A barra com defeito de dimensão $5 \times 10 \text{ mm}^2$ foi identificada nas medições de DP no nível de tensão de 11 e 15 kV.

Nas Figuras 5.54 a 5.58 seguintes, são apresentados exemplos de Gráficos de Altura de Pulsos obtidos das medições em 11 kV para as cinco condições da barra (sem e com defeitos de diferentes dimensões).

Figura 5.54 – Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 11 kV da barra na condição sem defeito.

Figura 5.55 - Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 11 kV da barra na condição de defeito 1x2 mm².

Figura 5.56 – Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 11 kV da barra na condição de defeito $5 \times 10 \text{ mm}^2$.

Figura 5.57– Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 11 kV da barra na condição de defeito 10x20 mm².

Figura 5.58 – Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 11 kV da barra na condição de defeito 20x40 mm².

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Os resultados obtidos neste capítulo mostraram que os parâmetros das Descargas Parciais, como o Q_{iec} em pC, Q_m positivo em mV e o NQN positivo falharam em revelar a maioria dos defeitos na CCR das barras estatóricas. Entretanto, a análise da predominância de polaridade positiva nas medições em BF e FMA identificaram a maioria dos defeitos na CCR. A Tabela 5.15 apresenta um resumo comparando os dois sistemas de medição de DP, baixa frequência e frequência muito alta em relação a identificação de defeitos na Camada Condutiva de Ranhura de barras estatóricas.

Tabela 5.15 – Tabela resumo comparando os dois sistemas de medição de DP (Baixa frequência e Frequência muito alta) em relação a identificação dos defeitos na CCR de barras estatóricas.

DESCRIÇÃO	Dimensão do defeito na Camada Condutiva de Ranhura na barra estatórica	Avaliação comparativa dos sistemas de medição de DP em relação a identificação dos defeitos na CCR de barras estatóricas		
		BAIXA FREQUÊNCIA	FREQUÊNCIA MUITO ALTA	
		Q_{iec} (pC)	+ Q_m (mV)	+ NQN
PARÂMETROS DAS DP (AMPLITUDES E NÚMERO DE QUANT. NORMALIZADA) (Todas as tensões de teste)	1x2 mm ²			
	5x10 mm ²			
	10x20 mm ²			
	20x40 mm ²			
		Razão obtida pelo PRPD	+ Q_m / - Q_m	+NQN / -NQN
PREDOMINÂNCIA DE POLARIDADE (Tensão de teste = 11 kV)	Sem defeito			
	1x2 mm ²			
	5x10 mm ²			
	10x20 mm ²			
	20x40 mm ²			

Legenda:

Verde – As três medições de DP foram capazes de distinguir a barra com defeito da barra referência;

Amarelo – Uma ou duas medições de DP foram capazes de distinguir o defeito da barra referência;

Vermelho – Nenhuma das medições de DP distinguiu a barra com defeito da barra sem referência;

Azul – Sem predominância de polaridade, ou seja, razão igual a 1;

Cinza – Predominância de polaridade positiva, ou seja, razão maior que 1.

Baseado nos registros das imagens UV, observou-se que o campo elétrico é maior na borda da área exposta da isolamento, ou seja, na interface entre a CCR e isolamento. Também, verificou-se que a medida que a tensão de teste vai aumentando as descargas superficiais evoluem em direção ao centro do defeito preenchendo a região exposta.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados nesta dissertação, verificou-se que a detecção de Descargas Parciais tem um grande potencial de aprimorar a habilidade de encontrar defeitos de superfície na camada condutiva de ranhura de barras e bobinas estatóricas. Entretanto, a mera aquisição dos parâmetros da medição de DP, como por exemplo, as amplitudes das DP (Q_{iec} ou Q_m) ou o número de quantidade normalizada (NQN), a qual é a aplicação mais comum e simplista do método, falhou em revelar os defeitos de superfície nos casos práticos pela produção de resultados os quais são indistinguíveis daqueles provenientes dos objetos de referência, os quais não tinham nenhum defeito. Entretanto, nesta pesquisa, verificou-se que a limitação de diagnóstico pela utilização da máxima amplitude somente como parâmetro de passa-não-passa pode ser, em partes superada, recorrendo a avaliação dos pulsos de DP plotados em função da tensão senoidal (PRPD), procurando pela predominância de polaridade do padrão de DP (razão da predominância de polaridade positiva), o qual na maioria dos casos, correlacionaram bem com a existência dos defeitos de superfície. Em adição, constatou-se que o arranjo de eletrodos Tipo A, na situação aonde o defeito na camada condutiva de ranhura da barra estava descoberto, revelaram ser mais eficiente para o propósito de identificação dos defeitos em relação aos Tipos B (eletrodo em contato com o defeito) e C (eletrodo distanciado do defeito em 1 mm). Dentre os níveis de tensões de testes utilizados, verificou-se que a tensão de teste em 11 kV (tensão nominal do gerador para a qual a barra foi projetada) foi a mais adequada para realizar a identificação dos defeitos de superfície.

Portanto, baseado nos resultados desta pesquisa, concluímos que o método de análise e diagnóstico das descargas parciais para identificação de defeitos na camada condutiva de barras estatóricas para hidrogeradores possuiria as seguintes características e etapas:

- a) Utilizando o sistema de BF ou FMA na TENSÃO NOMINAL que a barra estatórica foi projetada para operar. Com o arranjo de eletrodo do TIPO A, é realizada a primeira medição de DP;
- b) Após realizada a primeira medição é avaliada a razão da predominância de polaridade;

- c) Em seguida, a barra estatórica é reposicionada de forma que a face exposta na primeira medição fique em contato com o eletrodo de aterramento;
- d) Realizar a segunda medição de DP e avaliar a razão da predominância de polaridade;
- e) Para as duas medições de DP, se a razão da predominância de polaridade positiva (conforme item 7.3.2.1) for maior que 1 para o sistema de BF ou 1,3 ($+Q_m / -Q_m$) ou 1,5 ($+NQN / -NQN$) para o sistema de FMA. Então, uma inspeção visual detalhada da CCR da barra deverá ser realizada na identificação do defeito para comprovação do mesmo e também um posterior reparo.

OBS: Importante salientar que estes valores apresentados de razões de predominância de polaridade positiva foram determinados nesta pesquisa e estão limitados a este tipo de barra estatórica utilizando um instrumento de medição específico e com este arranjo experimental descritos nesta dissertação. Caso alguma dessas características sejam diferentes, uma ou mais barras de teste devem ser utilizada para determinar as novas razões de predominância de polaridade positiva e tensão de teste.

6.2 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Nesta pesquisa foram identificadas algumas contribuições relevantes como descritas abaixo:

- Conhecimento da variabilidade das amplitudes e outros parâmetros das DPs (Qiec, Qm e NQN);
- Apresentada uma proposta de metodologia para definição da razão de predominância de polaridade na medição em baixa frequência (BF) com o propósito de identificar defeitos na CCR de barras estatóricas;
- Verificou-se a influência dos arranjos de eletrodos nos resultados de DP;
- Identificou-se uma tensão de teste mais adequada para o propósito de identificação dos defeitos na CCR.

6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se um estudo mais aprofundado para outros tipos de objeto de teste, por exemplo, bobinas de múltiplas espiras e barras do tipo Roebel com CCR do tipo pintura. Bem como barras e bobinas projetadas para operarem em tensões diferentes as utilizadas nesta pesquisa. Também, como sugestão para expandir o conhecimento do defeito na CCR, poderá ser estudada a influência do formato do defeito na CCR nos resultados das medições de DP. Adicionalmente, uma avaliação em enrolamentos estatóricos completo, ou seja, com várias barras instaladas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60270**: High – voltage test techniques - Partial discharge measurements. IEC -. Genebra. 2015.
- [2] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 1434**. IEEE Guide to the Measurements of Partial Discharges in AC Electric Machinery. New York: 2014.
- [3] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60034-27-1**: Rotating Electrical Machines: Partial Discharge Offline Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Machinery. IEC -. Genebra. 2017.
- [4] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60034-27-3**: Rotating Electrical Machines: Dielectric dissipation factor measurement on stator winding insulation of rotating electrical machines. IEC -. Genebra. 2015.
- [5] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 286**. IEEE Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation. New York: 2000.
- [6] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 4**. IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques. New York: 2013.
- [7] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60034-1**: Rotating Electrical Machines – Part 1: Rating and performance. IEC -. Genebra. 2017.
- [8] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE 1799**. IEEE Recommended Practice for Quality Control Testing of External Discharges on Stator Coils, Bars and Windings. New York: 2012.
- [9] CONTIN, A.; PICCOLO, ANDREA. PD Acceptance Tests for New Bars and Coils. In: ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE, 2016, Montreal. **Proceedings. EIC's-16**, Montreal, 2016. p. 243 – 247.
- [10] STONE, G.C.; BOULTER, E.A.; CULBERT, I.; DHIRANI, H. **Electrical Insulation for Rotating Machines**, 1. ed. New Jersey, EUA: Wiley Interscience/ IEEE Press, 2004. cap.12, p. 257-259.
- [11] JOHNSON, J.S, WARREN, M. Detection of Slot Discharges in High-Voltage Stator Windings During Operation. In: **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, vol. 70, 1951, pp. 1998-2000.

- [12] JOHNSON, J.S. Detection of Slot Surface Discharges in High-Voltage Machine Stator Windings. **Electrical Engineering Magazine**, American Institute of Electrical Engineers. vol. 71, Issue: 2, 1952, pp. 143-147.
- [13] STONE, G.C, SASIC, M. Twenty-Five Years of Experience with On-line Partial Discharges Testing of Stator Windings. In: **12th International Electrical Insulation Conference (INSUCON)**, Maio, 2013.
- [14] V. WARREN, G.C. STONE. Deterioration of Stator Winding Insulation by Vibration Sparking. In: **ISEIM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATING MATERIALS**, 2008.
- [15] M. KURTS, J.F. LYLES, G.C. STONE. Application of Partial Discharge Testing to Hydro Generator Maintenance. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**, vol. PAS-103, No. 8, 1984.
- [16] WICHMANN, A. Two decades of experience and progress in epoxy mica insulation systems for large rotating machines. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, vol. PAS-102, No. 1, 1983.
- [17] F.T. EMERY. Partial Discharge Activity in High Voltage Stator Coils, **IEEE International Symposium Electrical Insulation**, 1994, Pittsburgh, PA, pp.318-321.
- [18] M.J. DA SILVA, F. PEREIRA, I. POMPEU, J.F. CORDEIRO. Desenvolvimento de uma metodologia de medição de descargas parciais para o controle de qualidade de componentes elétricos de máquinas rotativas. In: **ENCONTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO, 3** , 2006, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. **Anais. III ENAM, 2006.**
- [19] S. CHERUKUPALLI, G.L. HALLDORSON, C. TAN. Comparative measurements of two partial discharge measurements used for form wound coils/bars as quality assurance tests. In: **ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE AND ELECTRICAL MANUFACTURING AND COIL WINDING CONFERENCE**, 2001, Cincinnati. **Proceedings. EIC's-2001**, Cincinnati, 2001. p. 541 – 546.
- [20] A. PETIT. Comparison of PD Amplitudes of Stator Bars Taken With Different Instruments. In: **Electrical Insulation Conference**, 2015, Seattle. **Proceedings. EIC's-2015**, Washington, 2015. p. 255 – 261.
- [21] C. HUDON, R.H. REHDER. Recognition of phase resolved partial discharge patterns for internal discharges and external corona activity. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONDUCTION AND BREAKDOWN IN SOLID DIELECTRICS**, 5., 1995, Leicester. .. **Proceedings of IEEE**, 1995. p. 386 – 392.

- [22] G.C. STONE, H.G. SEDDING, C. CHAN, C. WENDEL. Comparison of Low Frequency and High Frequency PD Measurements on Rotating Machine Stator Windings. In: ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE, 2018, SAN ANTONIO. **Proceedings. EIC's-2018**, San Antonio, 2015. p. 349 – 352.
- [23] KOSOW, I. I. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 14^a edição. São Paulo: Globo, 2000. p. 41 - 42.
- [24] ALLISON, J. A. Understanding the need for Anti-corona materials in High Voltage Rotating machines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROPERTIES AND APPLICATIONS OF DIELECTRIC MATERIALS, 6., 2000, Xi'an, China. **Proceedings**. 2000.
- [25] LIESE, M, BROWN, M. Design-Dependent Slot Discharge and Vibration Sparking on High Voltage Windings. **IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation** Vol.15, No. 4, 2008. p. 927 – 932.
- [26] MOUDY, W. H. Deterioration mechanisms in recent air cooled turbine generators. In: **The American Society of Mechanical Engineers**, 2006, Atlanta, EUA.
- [27] MOORE, W. G. KHAZANOV, A. Insulation Degradation in Generator Stator Bars due to Spark Erosion and Partial Discharge Damage. In: **IEEE International Symposium on Electrical Insulation**, 2010, San Diego. p. 1 – 5.
- [28] LIMA, A. A. ODA, P. R. D. FATTORI, I. M. LEAL, E. M. DE SOUZA, O. J. Medição de concentração de ozônio como ferramenta no diagnóstico de envelhecimento da isolação por descargas parciais em hidrogeradores. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 22., 2013, Brasília. **Anais. 2013**.
- [29] CUENCA, W. M. H. **Caracterização dos sinais de descargas parciais em equipamentos de alta tensão a partir de modelos experimentais**. 2005. 140p. Tese (Doutorado em Ciências)- UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- [30] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60034-27-2: Rotating Electrical Machines: Partial Discharge Online Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Machinery**. IEC -. Genebra. 2015.
- [31] BRASIL, F. S. **Desenvolvimento de Sensores Eletromagnéticos para Medição de Descargas Parciais nos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores**. 2016. 122p. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade Federal do Pará, 2016.
- [32] STONE, G.C.; BOULTER, E.A.; CULBERT, I.;DHIRANI, H. **Electrical Insulation for Rotating Machines**, 1. ed. New Jersey, EUA: Wiley Interscience/ IEEE Press, 2004. cap.12, p. 25.

- [33] FAIER, J.M. **Curvas Principais Aplicadas na Identificação de Descargas Parciais em Equipamentos de Potência**. 2006. 102p. Dissertação (Mestrado em Ciências), - UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- [34] RIBEIRO, A.B.U. Catálogo de defeitos e metodologia para interpretação de ensaios de descargas parciais em hidrogeradores. In: ENCONTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO DE MÁQUINAS ROTATIVAS, 2., 2004, Belém. **Anais. II ENAM**
- [35] JACKSON, R.J. WILSON. A. Slot-discharge activity in air-cooled motors and generators. **IEE Proceedings B – Electric Power Applications** Vol.129, Issue: 3, 1982. p. 159 – 167.
- [36] STONE, G.C. WARREN, V. FENGER, M. Case Studies on the Effect of Humidity on Stator Winding Partial Discharge Activity. In: **IEEE International Symposium on Electrical Insulation**, 2002, Boston.
- [37] LÉVESQUE, M. **Étude des facteurs influençant le mécanisme des décharges partielles d’encoche**. 2012, Tese de doutorado, Escola de Tecnologia Superior da Universidade de Quebec, Canadá, 2012.

APÊNDICE A – ELABORAÇÃO DO DEFEITO NA CAMADA CONDUTIVA DE RANHURA

Para elaboração do defeito na camada condutiva de ranhura foram utilizadas as seguintes ferramentas descritas abaixo:

- Trena;
- Lápis poroso;
- Régua;
- Estilete;
- Panos para limpeza.

O processo utilizado para confeccionar o defeito na CCR teve as seguintes etapas:

- a) Foi utilizada a trena para marcar o centro da barra em relação ao comprimento da CCR;
- b) Foi demarcado o centro da face larga da barra utilizando a régua;
- c) Com o lápis poroso foi desenhado um retângulo centralizado com o centro da face larga e do comprimento da barra na dimensão do defeito desejado (1x2, 5x10, 10x20 e 20x40 mm²);
- d) Utilizando o estilete e a régua, com bastante cuidado, o estilete foi pressionado sobre a CCR realizando um corte com profundidade da espessura da CCR exatamente sobre o desenho retangular, sem que houvesse dano na isolação principal da barra;
- e) Em seguida, foi removida a parte retangular delimitada pelo corte da CCR da isolação principal;
- f) Com o auxílio de panos limpos e secos, foi realizada uma limpeza na região para a remoção de resíduos deste processo.

APÊNDICE B – PRPD OBTIDOS NA MEDIÇÃO EM BF

APÊNDICE C – PRPD OBTIDOS NA MEDIÇÃO EM FMA

$+Q_m = 47 \text{ mV}; -Q_m = 38 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

$+Q_m = 29 \text{ mV}; -Q_m = 22 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

$+Q_m = < 20 \text{ mV}; -Q_m = < 20 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

PRPD proveniente das três medições de DP em 7 kV da barra na condição sem defeito.

Amplitude
do pulso
(mV)

$+Q_m = < 20 \text{ mV}$; $-Q_m = < 20 \text{ mV}$ Fase de ocorrência da DP

Amplitude
do pulso
(mV)

$+Q_m = < 20 \text{ mV}$; $-Q_m = < 20 \text{ mV}$ Fase de ocorrência da DP

Amplitude
do pulso
(mV)

$+Q_m = < 20 \text{ mV}$; $-Q_m = < 20 \text{ mV}$ Fase de ocorrência da DP

PRPD proveniente das três medições de DP em 7 kV da barra na condição com defeito $1 \times 2 \text{ mm}^2$.

Amplitude
do pulso
(mV)

$+Q_m = < 20 \text{ mV}$; $-Q_m = < 20 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

Amplitude
do pulso
(mV)

$+Q_m = < 20 \text{ mV}$; $-Q_m = < 20 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

Amplitude
do pulso
(mV)

$+Q_m = < 20 \text{ mV}$; $-Q_m = < 20 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

PRPD proveniente das três medições de DP em 7 kV da barra na condição com defeito $5 \times 10 \text{ mm}^2$.

**Amplitude
do pulso
(mV)**

$+Q_m = < 20 \text{ mV}; -Q_m = < 20 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

**Amplitude
do pulso
(mV)**

$+Q_m = < 20 \text{ mV}; -Q_m = < 20 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

**Amplitude
do pulso
(mV)**

$+Q_m = < 20 \text{ mV}; -Q_m = < 20 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

PRPD proveniente das três medições de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 10x20 mm².

**Amplitude
do pulso
(mV)**

$+Q_m = < 20 \text{ mV}; -Q_m = < 20 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

**Amplitude
do pulso
(mV)**

$+Q_m = < 20 \text{ mV}; -Q_m = < 20 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

**Amplitude
do pulso
(mV)**

$+Q_m = < 20 \text{ mV}; -Q_m = < 20 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

PRPD proveniente das três medições de DP em 7 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm².

$+Q_m = 74 \text{ mV}; -Q_m = 31 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

$+Q_m = 79 \text{ mV}; -Q_m = 23 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

$+Q_m = 91 \text{ mV}; -Q_m = 35 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

PRPD proveniente das três medições de DP em 15 kV da barra na condição sem defeito.

Amplitude
do pulso
(mV)

$+Q_m = 96 \text{ mV}$; $-Q_m = < 20 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

Amplitude
do pulso
(mV)

$+Q_m = 93 \text{ mV}$; $-Q_m = 60 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

Amplitude
do pulso
(mV)

$+Q_m = 99 \text{ mV}$; $-Q_m = 72 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

PRPD proveniente das três medições de DP em 15 kV da barra na condição com defeito 1x2 mm².

Amplitude
do pulso
(mV)

$+Q_m = 91 \text{ mV}$; $-Q_m = < 20 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

Amplitude
do pulso
(mV)

$+Q_m = 91 \text{ mV}$; $-Q_m = < 20 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

Amplitude
do pulso
(mV)

$+Q_m = 98 \text{ mV}$; $-Q_m = 65 \text{ mV}$

Fase de ocorrência da DP

PRPD proveniente das três medições de DP em 15 kV da barra na condição com defeito $5 \times 10 \text{ mm}^2$.

Amplitude
do pulso
(mV)

$$+Q_m = 76 \text{ mV}; -Q_m = 30 \text{ mV}$$

Fase de ocorrência da DP

Amplitude
do pulso
(mV)

$$+Q_m = 74 \text{ mV}; -Q_m = 37 \text{ mV}$$

Fase de ocorrência da DP

Amplitude
do pulso
(mV)

$$+Q_m = 79 \text{ mV}; -Q_m = 29 \text{ mV}$$

Fase de ocorrência da DP

PRPD proveniente das três medições de DP em 15 kV da barra na condição com defeito 10x20 mm².

$+Q_m = 120 \text{ mV}$; $-Q_m = < 20 \text{ mV}$ Fase de ocorrência da DP

$+Q_m = 141 \text{ mV}$; $-Q_m = 76 \text{ mV}$ Fase de ocorrência da DP

$+Q_m = 112 \text{ mV}$; $-Q_m = 69 \text{ mV}$ Fase de ocorrência da DP

PRPD proveniente das três medições de DP em 15 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm².

PRPD proveniente das três medições de DP em 20 kV da barra na condição sem defeito.

PRPD proveniente das três medições de DP em 20 kV da barra na condição com defeito 1x2 mm².

PRPD proveniente das três medições de DP em 20 kV da barra na condição com defeito 5x10 mm².

PRPD proveniente das três medições de DP em 20 kV da barra na condição com defeito 10x20 mm².

Amplitude
do pulso
(mV)

+Qm = 157 mV; -Qm = 79 mV

Fase de ocorrência da DP

Amplitude
do pulso
(mV)

+Qm = 133 mV; -Qm = 187 mV

Fase de ocorrência da DP

Amplitude
do pulso
(mV)

+Qm = 186 mV; -Qm = 185 mV

Fase de ocorrência da DP

PRPD proveniente das três medições de DP em 20 kV da barra na condição com defeito 20x40 mm².

APÊNDICE D – GRÁFICO LINEAR DE ALTURA DE PULSOS OBTIDOS NA MEDIÇÃO EM FMA

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 65; -NQN= 51 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 26; -NQN= 21 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 12; -NQN= 3 Amplitude do Pulso (mV)

Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 7 kV da barra na condição sem defeito.

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 1; -NQN = 1 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 1; -NQN = 1 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 5; -NQN = 1 Amplitude do Pulso (mV)

Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 7 kV da barra na condição de defeito 1x2 mm².

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 1; -NQN = 1 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 3; -NQN = 1 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 1; -NQN = 1 Amplitude do Pulso (mV)

Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 7 kV da barra na condição de defeito $5 \times 10 \text{ mm}^2$.

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 14; -NQN = 5 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 19; -NQN = 14 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 25; -NQN = 11 Amplitude do Pulso (mV)

Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 7 kV da barra na condição de defeito 10x20 mm².

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 52; -NQN= 5 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 15; -NQN= 3 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 14; -NQN= 6 Amplitude do Pulso (mV)

Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 7 kV da barra na condição de defeito 20x40 mm².

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 108; -NQN= 62 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 120; -NQN= 63 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 136; -NQN= 73 Amplitude do Pulso (mV)

Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 15 kV da barra na condição sem defeito.

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 131; -NQN= 77 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 128; -NQN= 74 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 133; -NQN= 80 Amplitude do Pulso (mV)

Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 15 kV da barra na condição de defeito 1x2 mm².

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 113; -NQN= 46 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 111; -NQN= 53 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 128; -NQN= 64 Amplitude do Pulso (mV)

Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 15 kV da barra na condição de defeito 5x10 mm².

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 134; -NQN= 48 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 114; -NQN= 68 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 113; -NQN= 56 Amplitude do Pulso (mV)

Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 15 kV da barra na condição de defeito 10x20 mm².

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 240; -NQN= 62 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 254; -NQN= 102 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 193; -NQN= 94 Amplitude do Pulso (mV)

Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 15 kV da barra na condição de defeito 20x40 mm².

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 145; -NQN= 80 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 144; -NQN= 78 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 161; -NQN= 93 Amplitude do Pulso (mV)

Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 20 kV da barra na condição sem defeito.

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 162; -NQN= 81 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 162; -NQN= 102 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 176; -NQN= 101 Amplitude do Pulso (mV)

Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 20 kV da barra na condição de defeito 1x2 mm².

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 147; -NQN= 79 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 136; -NQN= 76 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 157; -NQN= 94 Amplitude do Pulso (mV)

Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 20 kV da barra na condição de defeito 5x10 mm².

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 171; -NQN= 77 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 153; -NQN= 84 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 162; -NQN= 82 Amplitude do Pulso (mV)

Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 20 kV da barra na condição de defeito 10x20 mm².

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 330; -NQN= 122 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 269; -NQN= 283 Amplitude do Pulso (mV)

Taxa de
repetição
dos pulsos
(pulsos
por
segundo)

+NQN = 295; -NQN= 230 Amplitude do Pulso (mV)

Gráficos da Altura de Pulsos (NQN) das 3 medições em 20 kV da barra na condição de defeito 20x40 mm².