

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – UFPA**

**INSTITUTO DE TECNOLOGIA – ITEC**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

FERNANDO DE SOUZA BRASIL

**DESENVOLVIMENTO DE SENSORES ELETROMAGNÉTICOS PARA  
MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS NOS ENROLAMENTOS  
ESTATÓRICOS DE HIDROGERADORES**

TESE DE DOUTORADO

TD 14/2016

UFPA/ITEC/PPGEE  
Campos Universitário do Guamá  
Belém – Pará-Brasil  
2016

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – UFPA**

**INSTITUTO DE TECNOLOGIA – ITEC**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DESENVOLVIMENTO DE SENSORES ELETROMAGNÉTICOS PARA  
MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS NOS ENROLAMENTOS  
ESTATÓRICOS DE HIDROGERADORES**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

TD 14/2016

FERNANDO DE SOUZA BRASIL

**ORIENTADOR: PROF. DR. VICTOR DMITRIEV**

UFPA/ITEC/PPGEE  
Campos Universitário do Guamá  
Belém – Pará-Brasil  
2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFPA

---

Brasil, Fernando de Souza, 1983-

Desenvolvimento de sensores eletromagnéticos para  
medição de descargas parciais nos enrolamentos  
estáticos de hidrogeradores / Fernando de Souza Brasil.  
- 2016.

Orientador: Victor Alexandrovich Dmitriev.  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do  
Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém,  
2016.

1. Descargas elétricas - medição. 2.  
Turbinas hidráulicas - testes. 3. Detectores.  
I. Título.

CDD 23. ed. 551.5632

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – UFPA**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA – ITEC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

AUTOR: **FERNANDO DE SOUZA BRASIL**

**Título: Desenvolvimento de Sensores Eletromagnéticos para Medição de Descargas Parciais nos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores**

ESTA TESE FOI JULGADA E APROVADA COMO PRÉ-REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO DE SISTEMA DE ENERGIA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ – ITEC – UFPA.

APROVADA EM: **14/04/2016**

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Victor Dmitriev  
(Orientador – PPGEE/UFPA)

---

Prof. Dr. Rodrigo Melo e Silva de Oliveira  
(Membro – PPGEE/UFPA)

---

Prof. Dr. Eduardo Tannus Tuma  
(Membro – PPGEE/UFPA)

---

Prof. Dr. Licinius Dimitri Sa de Alcantara  
(Membro Externo – UFPA)

---

Prof. Dr. Jose Felipe Souza de Almeida  
(Membro Externo – UFPA)

**VISTO:**

---

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes  
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

Never... Never... Never... Give up.

**Winston Churchill**

## DEDICATÓRIA

A minha família, em especial meus pais, Benedito Brasil e Rosete Brasil, e irmãos, Alexandre Brasil e Socorro Brasil, por todo carinho, compreensão, educação e amizade que me foram dados.

**Fernando de Souza Brasil**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer a Deus por tudo.

Ao Professor Victor Dmitriev que aceitou me orientar em nenhum momento hesitou em transmitir seus conhecimentos.

Ao Professor Rodrigo Oliveira pelo apoio incondicional.

A minha namorada Lanny Neiva, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo Paulo Vilhena que sempre esteve ao meu lado nos trabalhos práticos e teóricos.

Aos amigos dos laboratórios de Nanoeletrônica, Nanofotônica e LEMAG da UFPA.

A todos os amigos da Eletrobrás Eletronorte que contribuíram direta e indiretamente para êxito deste trabalho, em especial Bárbara Campos, Jorge Tostes, Juarez Santos, Ricardo Bezerra, Fernando Wilson, Paulo Rubens e Olegário Alves.

Aos Engenheiros Jacques Sanz e Lídio Nascimento por me apresentar o tema descargas parciais.

**Fernando de Souza Brasil**

## RESUMO

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

Paradas de máquinas não planejadas causadas por falhas na isolamento elétrica de equipamentos do sistema elétrico de potência são um grande problema, pois contabilizam elevadas perdas para planta e comprometem os indicadores de desempenho devido extenso período de parada da unidade geradora necessário para restauração da função geração. A fim de solucionar esse problema, vários pesquisadores e estudiosos da área de grandes máquinas rotativas descobriram que estas falhas estavam frequentemente relacionadas com o aumento do nível de descargas parciais (DP) da isolamento elétrica da máquina. As ocorrências das DP nos sistemas isolantes dos equipamentos de alta tensão são sintomas de fragilidade na sua suportabilidade dielétrica, cuja evolução pode ocasionar graves consequências para o equipamento. As DP podem ser detectadas através da medição de quantidades associadas a pulsos de corrente, sinais de rádio frequência (ondas eletromagnéticas), sinais acústicos, entre outros. Entre esses métodos, a detecção de ondas eletromagnéticas irradiadas pelas DP vem demonstrando ser uma técnica confiável para acompanhar processo de evolução do defeito. Em comparação com outras técnicas, tais como, os métodos de detecção baseados em acopladores capacitivos (método convencional), o uso de sensores eletromagnéticos de banda larga é não invasivo para isolamento.

Neste sentido, este trabalho tem como objetivo mostrar a avaliação de três diferentes sensores eletromagnéticos de ultra alta frequência, do inglês, *Ultra High Frequency* (UHF) projetados para serem instalados nos hidrogeradores. Os sensores utilizados nos experimentos são os seguintes: acoplador direcional de microfita; antena loop e antena log-periódica. Os sensores foram avaliados através de ensaios de alta tensão para medição de descargas parciais, em que foram avaliados todos os tipos de descargas encontrados nos hidrogeradores, como descargas internas, delaminações, descargas de ranhura, descargas barra-barra e de superfície, e através do ensaio de envelhecimento acelerado.

Os resultados obtidos no laboratório mostraram que o acoplador direcional apresentou uma grande sensibilidade para todos os tipos de descargas simuladas, cujo os resultados foram validados pela antena log-periódica, e a antena loop foi a que apresentou menor sensibilidade. Os resultados também mostram que é possível identificar as descargas através das características UHF. A evolução dos níveis de DP foi avaliada através do acoplador direcional durante o ensaio de envelhecimento acelerado, foi possível observar o aparecimento de dois tipos de descargas, delaminações e corona, os resultados foram similares aos medidos pelo acoplador capacitivo.

**Palavras-chaves:** Descargas parciais, hidrogeradores, enrolamentos do estator, sensores UHF.



## ABSTRACT

BRASIL, F.S., **Development of Electromagnetic Sensors to Measurement of Partial Discharges in Hydrogenerators Stator Windings**. Doctoral Tesis. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 2016. 122p.

Stops machines unplanned caused by faults in the electrical insulation of the power electric system equipment is a big problem, because account for high losses to plan and undertake performance indicators due long stop period generating unit necessary for the generation function restoration. In order to solve this problem, many researchers and scholars in the field of large rotating machines found that these failures were often related to the increased level of partial discharges (PD) of electrical insulation of the machine. Occurrences of PDs in insulating systems of high voltage equipment are symptoms of weakness in their dielectric withstand, whose evolution can cause serious consequences for the equipment. The PDs can be detected by measuring quantities associated with current pulses, radio frequency signals (electromagnetic waves), acoustic signals, among others. Among these methods the detection of electromagnetic waves radiated by PDs are proving to be a reliable technique to follow the default process of evolution. In comparison with other techniques such as the detection method based on capacitive couplers (conventional method), the use of electromagnetic broadband sensors is not invasive to isolation.

In this way, this paper aims to show the evaluation of three different electromagnetic sensors of Ultra High Frequency (UHF) designed to be installed in hydrogenerators. The sensors used in the experiments are: microstrip directional coupler, loop antenna and log-periodic antenna. The sensors were evaluated by high-voltage tests to measure partial discharges which were evaluated all kinds of discharges found in hydrogenerators, like internal discharges, delaminations, slot discharge, bar-bar and surface discharges, and through the accelerated aging test.

The results obtained in the laboratory demonstrated that the directional coupler showed a high sensibility to all types of simulated discharges which results were validated by log-periodic antenna, and the loop antenna showed a low sensibility. The results also demonstrated that is possible to identify discharges through the UHF characteristics. The evolution of the PDs levels were evaluated through the directional coupler during the accelerated aging test, it was possible to observe the appearance of two types of discharges, delaminations and corona, the results were similar to those measured by the capacitive coupler.

**Keywords:** Partial discharges, hydrogenerators, stator windings, UHF sensors.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>CAPÍTULO – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	1
1.2	MOTIVAÇÃO .....	2
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO .....	3
1.3.1	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>3</b>
1.3.2	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>3</b>
1.4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
1.5	PUBLICAÇÕES ORIGINADAS DO PRESENTE TRABALHO .....	6
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	6
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO – SISTEMA DE ISOLAÇÃO DOS ENROLAMENTOS ESTATÓRICOS.....</b>	<b>8</b>
2.1	ESTRUTURA DOS ENROLAMENTOS DO ESTATOR.....	9
2.1.1	<b>Estrutura das Bobinas.....</b>	<b>9</b>
2.1.2	<b>Barra (Meia Bobina) ou Barras Roebel.....</b>	<b>9</b>
2.1.3	<b>Bobinas de Múltiplas Espiras .....</b>	<b>11</b>
2.2	TIPOS DE ISOLAÇÃO .....	11
2.3	FALHAS NO ISOLAMENTO DO ESTATOR .....	13
2.3.1	<b>Falhas Em Máquinas Rotativas .....</b>	<b>13</b>
2.3.2	<b>Causas de Falhas nos Enrolamentos do Estator .....</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO – DESCARGAS PARCIAIS EM MÁQUINAS ROTATIVAS.....</b>	<b>15</b>
3.1	FÍSICA DAS DESCARGAS PARCIAIS .....	15
3.1.1	<b>Ionização dos Átomos de um Material Isolante.....</b>	<b>15</b>
3.1.2	<b>Forma do Pulso das Descargas Parciais .....</b>	<b>17</b>
3.1.3	<b>Deslocamento do Pulso nos Enrolamentos do Estator .....</b>	<b>18</b>
3.2	CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA CAVIDADE .....	19
3.3	DESCARGAS PARCIAIS NOS ENROLAMENTOS ESTATÓRICOS.....	20
3.3.1	<b>Descargas Internas .....</b>	<b>20</b>
3.3.1.1	Cavidades Internas .....	20
3.3.1.2	Delaminação Interna.....	21
3.3.1.3	Delaminação entre Condutores e a Isolação.....	21

3.3.1.4	Arborescência ( <i>treeing</i> ) Elétrica.....	21
<b>3.3.2</b>	<b>Descargas de Ranhura (<i>Slot Discharges</i>).....</b>	<b>22</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Descargas nos Terminais de Saída do Enrolamento (<i>End-Winding</i>) .....</b>	<b>22</b>
3.3.3.1	Descargas de Superfície .....	22
3.3.3.2	Descargas entre Fases.....	23
<b>3.3.4</b>	<b>Partículas Condutivas .....</b>	<b>23</b>
3.4	GRANDEZAS ASSOCIADAS ÀS DESCARGAS PARCIAIS .....	23
3.4.1	Magnitude de DP com Maior Repetibilidade, $Q_m$ .....	23
3.4.2	Taxa de Repetição de Pulso, $n$ .....	23
3.4.3	Ângulo de Fase das Descargas Parciais e Tempo de Ocorrência dos Pulsos.....	23
3.4.4	Tensão de Início de Descargas Parciais .....	24
3.4.5	Tensão de Extinção de Descargas Parciais.....	24
3.4.6	Frequências de Corte Inferior e Superior, $f_1$ e $f_2$ .....	24
3.4.7	Largura de banda, $\Delta f$ .....	24
3.5	24	
3.6	DESCARGAS PARCIAIS ASSOCIADAS À FASE.....	25
3.7	MEDIÇÃO DO PULSO ELÉTRICO DE DP.....	26
3.8	ACOPLAMENTO CAPACITIVO .....	27
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO – SENSORES ELETROMAGNÉTICOS PARA MEDIÇÃO DE DP .....</b>	<b>29</b>
4.1	CARACTERÍSTICAS DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO SINAL.....	29
4.1.1	Faixas de Baixas Frequências.....	30
4.1.2	Faixa de Altas Frequências.....	30
4.1.3	Faixa de Frequências Muito Altas .....	31
4.1.4	Faixa de Frequências Ultra Altas.....	31
4.2	ANTENAS.....	33
4.2.1	Classificação das Antenas .....	33
4.3	PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DE ANTENAS .....	34
4.3.1	Diagrama de Radiação .....	34
4.3.2	Densidade de Potência Radiada .....	35
4.3.3	Intensidade de Radiação .....	35

4.3.4	<b>Diretividade</b> .....	35
4.3.5	<b>Polarização</b> .....	36
4.3.6	<b>Perda de Retorno</b> .....	36
4.3.7	<b>Regiões de Campo Próximo e Distante</b> .....	36
4.4	<b>SENSORES DE DESCARGAS PARCIAIS</b> .....	37
4.4.1	<b>Acoplador na Ranhura do Estator (<i>Stator Slot Coupler - SSC</i>)</b> .....	37
4.4.2	<b>Acoplador Direcional de Microfita</b> .....	39
4.4.3	<b>Antena Loop</b> .....	40
4.4.4	<b>Antena Log-Periódica</b> .....	41
5	<b>CAPÍTULO – ENSAIO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO</b> .....	43
5.1	<b>ORIGEM DO VET</b> .....	43
5.2	<b>ENSAIO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO</b> .....	45
5.3	<b>ENSAIOS COMPLETARES AO VET</b> .....	46
5.3.1	<b>Resistência de Isolamento em Corrente Contínua (CC)</b> .....	46
5.3.2	<b>Medição de Capacitância</b> .....	48
5.3.3	<b>Medição de Fator de Perdas Dielétricas</b> .....	48
5.4	<b>SISTEMA VET DESENVOLVIDO PELA ELETRONORTE</b> .....	50
5.4.1	<b>Sistema de Controle da Temperatura</b> .....	51
5.4.2	<b>Sistema de Automação e Monitoração do VET</b> .....	51
6	<b>CAPÍTULO – AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E RESULTADOS</b> .....	54
6.1	<b>OBJETOS DE ENSAIOS</b> .....	54
6.1.1	<b>Classe Térmica de Isolação</b> .....	54
6.1.2	<b>Bobina de 6,9 kV de Isolação Mica Asfáltica e Classe Térmica B</b> .....	54
6.1.3	<b>Bobina de 6,9 kV de Isolação Mica Epóxi e Classe Térmica F</b> .....	55
6.2	<b>INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA</b> .....	56
6.2.1	<b>Osciloscópio Digital</b> .....	56
6.2.2	<b>Sistemas de Medição de Descargas Parciais</b> .....	56
6.2.3	<b>Sistema de Medição de Capacitância e Fator de Perdas Dielétricas</b> .....	56
6.2.4	<b>Sistema de Medição de Resistência de Isolamento</b> .....	57
6.3	<b>CÁLCULO DAS REGIÕES DE CAMPO DISTANTE PARA AS ANTENAS</b> .....	58

6.3.1	Antena Loop.....	58
6.3.2	Antena Log-Periódica .....	60
6.4	CARACTERIZAÇÃO DE DIFERENTES FONTES DESCARGAS ATRAVÉS DOS SENSORES ELETROMAGNÉTICOS .....	62
6.4.1	Descargas Internas .....	62
6.4.2	Delaminações .....	65
6.4.3	Corona na Junção de Controle de Estresse de Tensão e Camada Semicondutiva ...	68
6.4.4	Descargas de Ranhura .....	71
6.4.5	Descargas Barra-Barra (Tipo Gap) .....	73
6.4.6	Descargas de Superfície .....	76
6.4.7	Análise do Espectro de Frequência.....	79
6.5	CARACTERÍSTICAS UHF DAS DP DURANTE O ENSAIO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO 80	
6.5.1	Ensaio Dielétricos Antes e Após o VET .....	81
6.5.2	Análise dos Resultados dos Ensaio Dielétricos .....	81
6.5.3	Monitoração das DP Através do Acoplador Direcional de Microfita.....	89
6.6	AVALIAÇÃO DO ACOPLADOR DIRECIONAL EM UM SISTEMA DE DUAS BOBINAS 92	
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	94
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	96

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – (a) Causas raízes de falhas em hidrogeradores; (b) Causas de falhas no sistema de isolamento elétrica.....	2
Figura 2.1 – (a) Estator completo: enrolamentos fixados no núcleo; (b) Rotor completo; (c) Máquina completa: Estator + Rotor. ....	8
Figura 2.2 – (a) Barra Roebel ondulada; (b) Barra Roebel Imbricada. ....	9
Figura 2.3 – Transposição Roebel 360°. ....	10
Figura 2.4 – (a) Estrutura do enrolamento imbricado; (b) Estrutura do enrolamento ondulado. ....	10
Figura 2.5 - Corte de uma ranhura com bobinas de múltiplas espiras. ....	11
Figura 2.6 – Bobina de múltiplas espiras. ....	11
Figura 2.7 – (a) Isolação de bobinas com múltiplas espiras; (b) Isolação de uma barra Roebel.....	12
Figura 2.8 – Desenvolvimento das dimensões dos sistemas de isolamento das máquinas rotativas desde o início.....	13
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. ....	16
Figura 3.2 – Distorção do pulso ao longo do circuito de medição. ....	17
Figura 3.3 – Representação esquemática da rede de indutâncias e capacitâncias distribuídas ao longo dos enrolamentos estatóricos.....	18
Figura 3.4 – (a) Barra Roebel com diversas cavidades; (b) Circuito equivalente. ....	19
Figura 3.5 – Tensões e correntes no circuito equivalente das descargas parciais. ....	20
Figura 3.6 – Seção transversão de uma barra estatórica, onde se podem observar delaminações internas no isolamento. ....	21
Figura 3.7 – Desgaste da parte condutiva de uma barra Roebel. ....	22
Figura 3.8– Descarga parciais associadas a fase. ....	25
Figura 3.9 – Acopladores capacitivos: a) Instalado no interior do enrolamento; b) Instalado na saída de fase. ....	28
Figura 3.10 – Impedância de medição de descargas parciais.....	28
Figura 4.1 - Resposta em frequência de um pulso de DP na fonte e nos terminais da máquina; resposta em frequência para diferentes sistemas de medição: a) faixa de baixas frequências; b) faixa de altas frequências; c) faixa de frequências muito altas. ....	32
Figura 4.2 – Diagrama de radiação: (a) isotrópico; (b) omnidirecional; (c) direcional.....	34
Figura 4.3 – Regiões de campo de uma antena. ....	37
Figura 4.4 – Esquema simplificado do SSC.....	38

Figura 4.5– Acoplador de microfita simulado.....	39
Figura 4.6 – Protótipo do acoplador de microfita fabricado. ....	39
Figura 4.7 – Perdas de retorno ( $S_{11}$ ) simulada e medida do acoplador direcional de microfita. ....	39
Figura 4.9 – Antena loop. (a) Simulada; (b) Protótipo fabricado.....	40
Figura 4.10 – Perda de retorno medida para antena loop. ....	40
Figura 4.11 – Diagrama de radiação 300 MHz antena loop para 300 MHz.....	41
Figura 4.12 – Antena log-periódica.....	41
Figura 4.13 – Perda de retorno medida para antena log-periódica.....	42
Figura 4.14 – Diagrama de radiação da antena log-periódica para 750 MHz. ....	42
Figura 5.1 – Circuito de ensaio de envelhecimento acelerado utilizado pelo Ontario Hydro;.....	44
Figura 5.2 – Placas de aquecimento instaladas em uma barra estatórica. ....	45
Figura 5.3 - Composição da corrente total. ....	47
Figura 5.4 - Diagrama Vetorial e ângulo do fator de perdas ( $\delta$ ) .....	49
Figura 5.5 – Placas de aquecimento instaladas nas bobinas da CUUGH-02. ....	50
Figura 5.6 – Circuito para realização do ensaio de envelhecimento acelerado.....	52
Figura 5.7 – Software SIMME com as principais indicações. ....	53
Figura 6.1 – Bobina de 6,9 kV e classe B. ....	54
Figura 6.2 .....	55
Figura 6.3 – Bobina 6,9 kV e classe F. ....	55
Figura 6.4 – Osciloscópio digital MDO 3104 Tektronix. ....	56
Figura 6.5 – Ponte Schering para medição de capacitância e perdas dielétricas.....	57
Figura 6.6 – Medidor de resistência de isolamento.....	57
Figura 6.7 – Perda de retorno simulada para antena loop. ....	58
Figura 6.8 – Antena loop posicionada para medição de descargas parciais.....	59
Figura 6.9 – Atenuação dos sinais medidos pela antena loop em diferentes posições.....	59
Figura 6.10 – Sinais no domínio do tempo registrados pela antena loop em diferentes posições. ....	60
Figura 6.11 – Espectro de frequência dos sinais medidos pela antena loop em diferentes posições. ....	60
Figura 6.12 – Perda de retorno medida para antena log-periódica.....	61
Figura 6.13 – Antena log-periódica posicionada para medição de descargas parciais.....	61
Figura 6.14 – Layout montado em laboratório para realização dos experimentos.....	62

Figura 6.15 – PRPD característico de descargas internas. ....	63
Figura 6.16 - PRPD obtido em laboratório para descargas internas.....	63
Figura 6.17 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pelo acoplador direcional para descargas internas.....	64
Figura 6.18 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena log-periódica para descargas de internas. ....	64
Figura 6.19 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena loop para descargas de internas.....	65
Figura 6.20 – PRPD característico de delaminações internas. ....	65
Figura 6.21 – Dissecação da bobina e constatação de delaminações. ....	66
Figura 6.22 – PRPD obtido em laboratório para delaminações. ....	66
Figura 6.23 – Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pelo acoplador direcional para descargas de delaminação. ....	67
Figura 6.24 – Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pelo acoplador direcional para descargas de delaminação. ....	67
Figura 6.25 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena loop para descargas de delaminação. ....	67
Figura 6.26 - PRPD característico de descargas Corona.....	68
Figura 6.27 – (a) e (b) Indicativo de desgaste na zona de transição entre as camadas controle do estresse de tensão e semi condutiva em diferentes partes da bobina. ....	68
Figura 6.28 - PRPD obtido em laboratório para descargas corona. ....	69
Figura 6.29 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pelo acoplador direcional para descargas Corona.....	69
Figura 6.30 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena log-periódica para descargas Corona.....	70
Figura 6.31 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena loop para descargas Corona. ....	70
Figura 6.32 – PRPD característico de descargas de ranhura. ....	71
Figura 6.33 – Desgaste de parte da camada semicondutiva para simular descargas de ranhura. ....	71
Figura 6.34 – PRPD obtido em laboratório de descargas de ranhura.....	72
Figura 6.35 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pelo acoplador direcional para descargas de ranhura. ....	72
Figura 6.36 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena loop para descargas de ranhura. ....	73
Figura 6.37 – PRPD característico de descargas tipo gap.....	73
Figura 6.38 – Ocorrências das descargas entre barras com tensões diferentes. ....	74



Figura 6.39 – PRPD obtido em laboratório para descargas tipo gap.....	75
Figura 6.40 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pelo acoplador direcional para descargas de tipo gap.....	75
Figura 6.41 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena log-periódica para descargas de tipo gap.....	76
Figura 6.42 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena loop para descargas tipo gap. ....	76
Figura 6.43 – PRPD característico de descargas de superfície. ....	77
Figura 6.44 - Contaminação da superfície da bobina com uma fita de cobre. ....	77
Figura 6.45 - PRPD obtido em laboratório para descargas de superfície.....	78
Figura 6.46 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pelo acoplador direcional para descargas de superfície.....	78
Figura 6.47 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena log-periódica para descargas de superfície.....	79
Figura 6.48 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena loop para descargas de superfície.....	79
Figura 6.49 – Layout montado em laboratório para realização do ensaio de envelhecimento acelerado. ....	80
Figura 6.50 – Instalação do acoplador direcional.....	80
Figura 6.51 - Resistência de Isolamento da Bobina n° 15 durante o VET.....	83
Figura 6.52 - Resistência de Isolamento da Bobina n° 239 durante o VET.....	83
Figura 6.53 – Pontos de vazamento do asfalto durante o VET. (a) 19 horas de ensaio; (b) 65 horas de ensaio.....	84
Figura 6.54 – Capacitância e fator de perdas dielétricas da bobina n°15 antes e após o VET. (a) Capacitância; (b) Fator de perdas dielétricas. ....	85
Figura 6.55 - Capacitância e fator de perdas dielétricas da bobina n°239 antes e após o VET. (a) Capacitância; (b) Fator de perdas dielétricas. ....	86
Figura 6.56 – Mudança no fator de perdas durante o envelhecimento.....	86
Figura 6.57 – Medição de descargas parciais em 6,9 kV na bobina n° 15 antes e após o VET. (a) Antes do VET; (b) Após o VET. ....	87
Figura 6.58 - Medição de descargas parciais em 6,9 kV na bobina n° 239 antes e após o VET. (a) Antes do VET; (b) Após o VET. ....	87
Figura 6.59 – Corte transversal na bobina n° 15.....	87
Figura 6.60 – Resultados estatísticos da amplitude de DP. (a) antes do envelhecimento; (b) após 900 horas; (c) após 1800 horas; (d) após 2100 horas.....	88
Figura 6.61 – Evolução do nível das DP durante o VET. Sinais medidos pelo Acoplador Direcional versus os Sinais medidos pelo Capacitor de Acoplamento. ....	89

Figura 6.62 - Sinais registrados pelo acoplador direcional de microfita em diferentes momentos do VET. ....	90
Figura 6.63 - Características UHF dos sinais registrados pelo acoplador direcional de microfita.....	90
Figura 6.64 – Evolução do PRPD registrado através do acoplador direcional. ....	91
Figura 6.65 – Desgaste na zona de transição entre as camadas semicondutiva e de estresse de tensão.	91
Figura 6.66 – Esquemático de testes para o sistema de duas bobinas.....	92
Figura 6.67 – PRPD registrados pelo capacitor de acoplamento e acoplador direcional. (a) Descargas internas registradas pelo capacitor de acoplamento na bobina 01; (b) Descargas de delaminações registradas pelo capacitor de acoplamento na bobina 02; (c) PRPD registrado pelo acoplador direcional na bobina 01 antes do acoplamento da bobina 02, defeituosa; (d) PRPD registrado pelo acoplador direcional na bobina 01 após do acoplamento da bobina 02, defeituosa.....	93
Figura 6.68 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pelo acoplador direcional para o sistema de duas bobinas, características de descargas de delaminação.....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tipos de falhas nos enrolamentos do estator.....	14
Tabela 3.1 – Padrões de mapas estatísticos de descargas parciais.....	26
Tabela 4.1 – Especificações técnicas da antena log-periódica.....	41
Tabela 5.1 – Tensões de ensaio para o VET.....	45
Tabela 6.1 – Classe Térmica Segundo IEC 60085-2004.....	54
Tabela 6.2 – Raio da região de campo distante para antena loop.....	58
Tabela 6.3 - Raio da região de campo distante para antena log-periódica.....	61
Tabela 6.4 – Faixa de frequência para cada tipo de descarga.....	79
Tabela 6.5 – Resistência de Isolamento da Bobina n° 239 durante o VET.....	82
Tabela 6.6 - Resistência de Isolamento da Bobina n° 15 durante o VET.....	82

## LISTA DE SIGLAS

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobras.

CIGRÉ – Conseil International des Grands Réseaux Électriques.

DP – Descarga Parcial.

FP – Fator de Perdas Dielétricas.

IEC – Internacional Electrotechnical Commission.

IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineers.

IMA-DP – Instrumento de Monitoração e Análise de Descargas Parciais.

NQN – Normalized Quantity Number.

PRPD – Phase Resolved Partial Discharges.

RF – Radio Frequência.

SSC – Stator Slot Coupler.

UHF – Ultra High Frequency.

VET – Voltage Endurance Testing.

# 1 CAPÍTULO – INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Máquinas síncronas desempenham quase que exclusivamente o papel primordial da geração de energia elétrica no Brasil. Consequentemente, todo esforço técnico em assegurar o seu bom funcionamento se reverte na segurança e confiabilidade da operação de todo o sistema [01].

Diante das necessidades do sistema elétrico, as atividades de manutenção tendem a migrar da manutenção preventiva para a manutenção preditiva, e da manutenção baseada no tempo para a manutenção baseada no estado atual do equipamento. Neste contexto, as técnicas de monitoramento on-line têm sido adotadas como a principal ferramenta para obter informações do sistema ou equipamento a ser mantido, sem colocar em risco a operação segura e a confiabilidade dos equipamentos, permitindo o conhecimento de sua condição durante sua operação, além de poder diagnosticar eventuais não conformidades [02].

Nesse sentido, técnicas como o monitoramento das condições de operação dos equipamentos, seu diagnóstico preditivo e a manutenção centrada na confiabilidade contribuem fortemente na elaboração de programas de manutenção, capazes de melhorar o desempenho e estender a vida útil dos equipamentos assim geridos [01].

Dentre os possíveis modos de falha em máquinas síncronas, quer sejam elas motores ou geradores, as falhas no isolamento elétrico podem causar os mais severos danos pessoais e materiais, além de prejuízos ambientais e econômicos de grande custo. Faz-se necessário, portanto, que a degradação dos sistemas isolantes nestes equipamentos seja detectada e quantificada o quanto antes, de modo que as convenientes ações de reparação possam ser programadas em tempo hábil. Quanto à monitoração dos sistemas de isolamento em máquinas síncronas, a medição e a análise de Descargas Parciais (DP) são as principais técnicas de diagnóstico, utilizada com comprovada eficácia [03,04].

De acordo com a norma da Comissão Eletrotécnica Internacional IEC 60270 [05], Descargas Parciais são descargas elétricas localizadas que percorrem apenas parcialmente o isolamento entre condutores, e que não podem ocorrer adjacientemente a um condutor.

Um estudo internacional do CIGRE [06] sobre causas de falhas em hidrogeradores examinou 69 incidentes em detalhes e concluiu que as principais causas de falhas podem ser categorizadas na seguinte ordem: falhas no sistema de isolamento, defeitos mecânicos, problemas térmicos e por último, falhas devido nos mancais de rolamento. A Figura 1.1 (a), ilustra essa classificação e seus percentuais de ocorrência. As falhas no sistema de isolamento elétrica foram investigadas com mais detalhes e os

resultados são ilustrados na Figura 1.1 (b). As causas mais frequentes de falhas são relativas ao envelhecimento e à contaminação do enrolamento por poeira e umidade. Devido à vibração as barras/bobinas sofrem afrouxamento na sua posição dentro da ranhura.

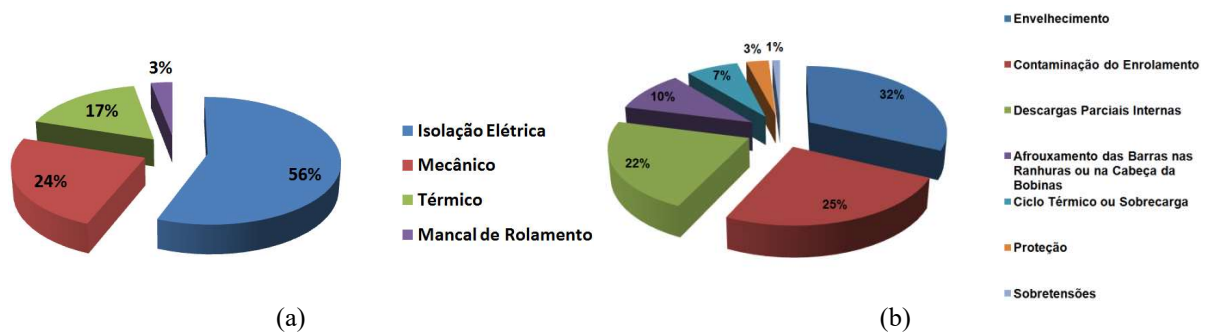


Figura 1.1 – (a) Causas raízes de falhas em hidrogeradores; (b) Causas de falhas no sistema de isolação elétrica.  
Fonte: Adaptado de [06].

De forma geral, a medição de DP fornece informações sobre pontos fracos na isolação da máquina e permite avaliar processos de degradação do dielétrico. Tais informações, articuladas dentro de um programa de manutenções baseado no diagnóstico preditivo, subsidiam decisões importantes quanto as medidas cabíveis de manutenções programando em tempo hábil as intervenções que se fizerem necessárias de acordo com o problema [03, 04].

## 1.2 MOTIVAÇÃO

No modelo atual do setor elétrico, a manutenção preditiva tornou-se grande ferramenta para as concessionárias de energia elétrica na gestão dos seus ativos de produção, pois está cada vez mais difícil desligar um equipamento para realizar manutenção. As concessionárias devem arcar com energia elétrica disponível para atender às demandas da sociedade. Neste modelo, os desligamentos devem ser realizados de maneira programada, de forma a eliminar ou minimizar as perdas. A realização de manutenção preditiva, minimizando as preventivas, busca migrar da condição de manutenção baseada no tempo para a manutenção baseada nas condições do equipamento.

Ao contrário da utilização dos sensores convencionais (acopladores capacitivos) para medição de DP descritos em [05] que para serem instalados, faz-se necessário que haja o desligamento do equipamento que se pretende monitorar, os sensores não convencionais (por exemplo, antenas) podem ser instalados sem o desligamento do equipamento. Ocasionalmente assim uma diminuição considerável nos custos da manutenção.

## 1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

### 1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver e validar experimentalmente sensores eletromagnéticos para medição de descargas parciais nos enrolamentos estatóricos de hidrogeradores.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Para alcance do objetivo geral são propostos os seguintes objetivos específicos:

1. Projetar e confeccionar os seguintes sensores eletromagnéticos: acoplador direcional de microfita e antena loop;
2. Caracterizar os sinais UHF de todos os tipos de descargas encontradas nos hidrogeradores através dos sensores eletromagnéticos desenvolvidos;
3. Comparar os resultados dos sensores desenvolvidos com um sensor eletromagnético comercial (antena log-periódica);
4. Avaliar o comportamento dos sinais UHF durante o ensaio de envelhecimento acelerado.

## 1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A medição das DP em máquinas rotativas já tem sido realizada a mais de 60 anos, de acordo com os trabalhos [07, 08, 09]. A isolação elétrica dos enrolamentos estatóricos é propensa a atividade de DP como resultado de delaminações internas, descargas de superfície e de ranhura. O primeiro trabalho sobre medições de DP é datado de 1951 [07] onde o autor observou, no final dos anos 40, o aparecimento de sinais de alta frequência durante a operação da máquina. A investigação da origem desses sinais revelou que eram devido a descargas de ranhura.

Na pesquisa realizada por [10] foram descritos os efeitos da componente indutiva do acoplamento entre os condutores de um enrolamento através do núcleo de ferro laminado. Este trabalho forneceu um melhor entendimento das distorções que ocorrem nos sinais de DP no caminho entre a fonte e o sistema de medição. Melhorias na sistemática de medição dos sinais de DP no enrolamento do estator foram apresentadas por [11] utilizando métodos de processamento digital de sinais para determinar a fonte mais provável das DP. A técnica baseou-se na análise de altas e baixas frequências dos sinais de DP e sua distribuição no tempo. A partir disso, os autores afirmam que é possível estimar a forma dos sinais de DP pela sua fonte.

Nos trabalhos [12, 13], de 1991, é apresentado o primeiro sensor não convencional para medição das DP nos enrolamentos estatóricos de hidrogeradores, denominado acoplador de ranhura do estator ou

em inglês *Stator Slot Coupler* (SSC), é um acoplador eletromagnético de banda larga que não necessita conexão com a alta tensão dos enrolamentos do estator e pode ser facilmente instalado na ranhura do estator. Este sensor responde numa faixa de frequência de 30 MHz-1GHz.

Em [14], de 1992, através de melhorias na metodologia proposta por [11] conseguiu-se medir valores mais precisos dos sinais de DP. Em [15], de 1993, foram apresentados critérios para medição de DP em máquinas rotativas, como a melhor faixa de frequências para evitar atenuações e ressonância. Em [15], também foram descritos os mecanismos de transferência dos sinais de DP.

Os primeiros padrões de DP para máquinas rotativas utilizando mapas com discriminação por fase, do inglês *Phase Resolved Partial Discharges* (PRPD) foram apresentados em [16], onde foram mostrados padrões de mapas para as descargas de ranhura e nos terminais de saída do enrolamento. Até então, os padrões utilizados eram através da Quantidade de Número Normalizada do inglês *Normalized Quantity Number* (NQN). Na pesquisa de [17], de 1996, foi dado ênfase à compatibilidade eletromagnética nas medições de DP em máquinas rotativas, mostrando a importância dos conectores na redução de ruído, aterramento e utilização de cabos apropriados. Neste mesmo ano, no trabalho de [18] foi mostrada uma preocupação sobre os trabalhos que vinham sendo publicados sobre as distorções que os sinais de DP sofriam nos enrolamentos do estator, pois diferentes grupos de trabalho apresentavam resultados que não concordavam entre si.

A representação dos enrolamentos do estator como uma linha de transmissão, para certa faixa de frequências, foi apresentada em [19], de 1997, onde foram desenvolvidos métodos de ensaio utilizando pulsos de DP de baixa tensão para determinar a faixa de frequências, utilizando análise espectral e técnicas de filtros digitais; também foi mostrado que a velocidade da onda viajante atinge um valor constante que pode ser usado para determinar o tempo de trânsito do pulso no enrolamento. Um modelo para estimação de ondas viajantes foi apresentado por [20]. Neste modelo, cada fase foi simulada pela combinação de elementos  $\pi$  incorporando efeitos de dependência da frequência. Os resultados calculados mostraram um atraso linear na onda viajante e uma moderada atenuação dos sinais de DP nos enrolamentos do estator. Uma análise sobre a propagação dos sinais de DP ao longo dos enrolamentos do estator foi apresentada por [21], na qual foram utilizados modelos teóricos e experimentais utilizando vários geradores. Os resultados de [21] coincidiram com os resultados apresentados por [20].

No trabalho de [22], de 1998, foram desenvolvidas antenas para serem utilizadas como sensores para medição de DP em enrolamentos estáticos de geradores, sendo que estas detectavam sinais da ordem de alguns GHz. Foram realizados testes em laboratório em campo, os resultados foram bastante satisfatórios e mostraram que se podiam realizar medições de descargas parciais sem a parada da máquina para instalação de sensores.

A utilização de sensores eletromagnéticos durante o ensaio de envelhecimento acelerado foi apresentada nos trabalhos de [23, 24, 25, 26]. Nestes artigos são descritos métodos de detecção DP em espécime de barras/bobinas estatóricas de máquinas rotativas submetidas a estresses eléctricos, térmicos e mecânicos de longa duração (até 2000 horas) em ambiente de laboratório. Para detecção das DP foram desenvolvidos sensores de banda ultra larga, na faixa de 10 MHz a 3 GHz. Os resultados mostraram que as componentes UHF, dos pulsos de DP sofrem um aumento e o tempo de subida diminui gradualmente com o envelhecimento da espécime em teste.

No ano 2000 foi lançado o Guia IEEE 1434 [27]. Neste Guia, é apresentada uma revisão da natureza das DP nos enrolamentos do estator, técnicas de medição nas condições da máquina parada (*off-line*) e a máquina em operação (*on-line*), assim como em bobinas de múltiplas espiras e meias bobinas (barras Roebel). Nesse mesmo ano foi lançada a norma internacional IEC 60270 [05] que atualmente rege as medições de descargas parciais em ensaios com alta tensão, através de sensores convencionais. Esta norma apresenta as principais grandezas relacionadas às DP, os tipos de circuitos utilizados para medição e os sistemas de medição e, por fim, os procedimentos utilizados para a calibração do circuito.

Em 2004, no trabalho [28], os autores utilizaram um acoplador de microfita e uma antena Arquimedes para medições de DP em laboratório. Os resultados mostraram que diversos tipos de DP poderiam ser identificados através de sensores UHF, mostraram também que o sinal UHF sofre grande atenuação no ar, enquanto que no cobre sofre pouca.

Novos resultados sobre o comportamento dos sinais UHF originados pelas descargas parciais durante ensaios de envelhecimento acelerado foram apresentados em [29, 30], ambos de 2006, os resultados mostraram que tanto os tempos de subida e de descida vão decrescendo com o tempo de envelhecimento. Verificou-se novamente o aparecimento das frequências mais elevadas (da ordem de 250 MHz).

No ano de 2012, foi lançada norma IEC 60034-27-2 [31] que trata sobre a medição *on-line* de DP em máquinas rotativas. Além apresentar os assuntos já tratados nas normas anteriores, esta norma também apresenta técnicas de supressão de ruído, padrões PRPD e uma seção dedicada as características dos sinais de DP em que são definidas as diferentes faixas de frequência para os sistemas de medição de descargas parciais em máquinas rotativas, que são: baixas frequências de 100 kHz - 3 MHz; altas frequências de 3 MHz a 30 MHz; frequências muito altas de 30 MHz – 300 MHz; ultra altas frequências de 300 MHz – 3 GHz.

Em 2014, foi lançada uma atualização da IEEE 1434 [32], nessa versão é apresentada uma variedade de sensores eletromagnéticos que podem ser utilizados para medição de DP em máquinas



rotativas, que são: a ponta de prova eletromagnética, mais conhecida pela sigla do inglês *Tennessee Valley Authority* (TVA); o SSC e diversas antenas UHF.

Devido a popularização da medição de DP através da radiação UHF nos mais variados equipamentos do sistema elétrico de potência, de acordo com [33], neste ano de 2015 será publicada a norma internacional específica sobre a utilização de sensores não convencionais, denominada *IEC 62478 High-Voltage Test Techniques - Measurement of Partial Discharges by Electromagnetic and Acoustic Methods. Proposed Horizontal Standard*.

### 1.5 PUBLICAÇÕES ORIGINADAS DO PRESENTE TRABALHO

Até o presente momento quatro artigos científicos foram gerados a partir dos resultados desta pesquisa:

1. *Analysis and Comparison of Sensors for Measurements of Partial Discharges in Hydrogenerator Stator Windings* [34]. Aceito para publicação, em 24/09/2015, na revista *JMOE Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*.
2. *Spectral Method for Localization of Multiple Partial Discharges in Dielectric Insulation of Hydro-Generator Coils: Simulation and Experimental Results* [35]. Submetido em janeiro de 2016, na revista *JMOE Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*.
3. Estudo de Técnicas de Medição de Descargas Parciais nos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores [36]. Apresentado no V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu, Paraná – Brasil, 22 a 25/04/2014.
4. Estudo Experimental de Técnicas de Medição de Descargas Parciais nos Enrolamentos do Estator de Hidrogeradores - Validação de um Novo Sensor do Tipo *Stator Slot Coupler* [37]. Apresentado no XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Foz do Iguaçu, Paraná – Brasil, 18 a 21/05/2014.

### 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Dando sequência ao trabalho, o Capítulo 2 apresenta uma visão geral sobre os enrolamentos do estator, com ênfase na isolamento elétrica e nos principais tipos de falhas as quais os enrolamentos são submetidos.

No Capítulo 3 é feito um estudo sobre os principais termos e conceitos relacionados às descargas parciais, relativos a isolamento elétrica dos enrolamentos do estator.

O Capítulo 4 trata especificamente sobre os sensores eletromagnéticos utilizados neste trabalho para medição de descargas parciais. Neste capítulo são apresentados também os instrumentos utilizando para medição de descargas parciais.

O Capítulo 5 apresenta os principais conceitos sobre o ensaio de envelhecimento acelerado, será apresentado também o sistema de automatismo e monitoração desenvolvido pelo Centro de Tecnologia da Eletronorte para realização do referido ensaio.

No Capítulo 6 serão apresentados os principais resultados obtidos, sobre avaliação dos sensores eletromagnéticos utilizados neste trabalho através de ensaios com alta tensão em que foram simuladas em laboratório todos os tipos de descargas presentes nos hidrogeradores. Serão apresentados, também, os resultados do ensaio de envelhecimento acelerado com ênfase na medição e monitoração de descargas parciais através do acoplador direcional.

Por fim, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões mais relevantes obtidas ao longo do desenvolvimento do trabalho e propostas para trabalhos futuros.

## 2 CAPÍTULO – SISTEMA DE ISOLAÇÃO DOS ENROLAMENTOS ESTATÓRICOS

Uma máquina rotativa é composta por dois componentes principais: o estator e o rotor. O rotor tem a função de desenvolver o campo magnético girante e o estator é um conjunto de condutores (bobinas) fixados por um núcleo aterrado, denominado núcleo do estator [38]. A Figura 2.1, a seguir, ilustra com detalhes estes componentes.

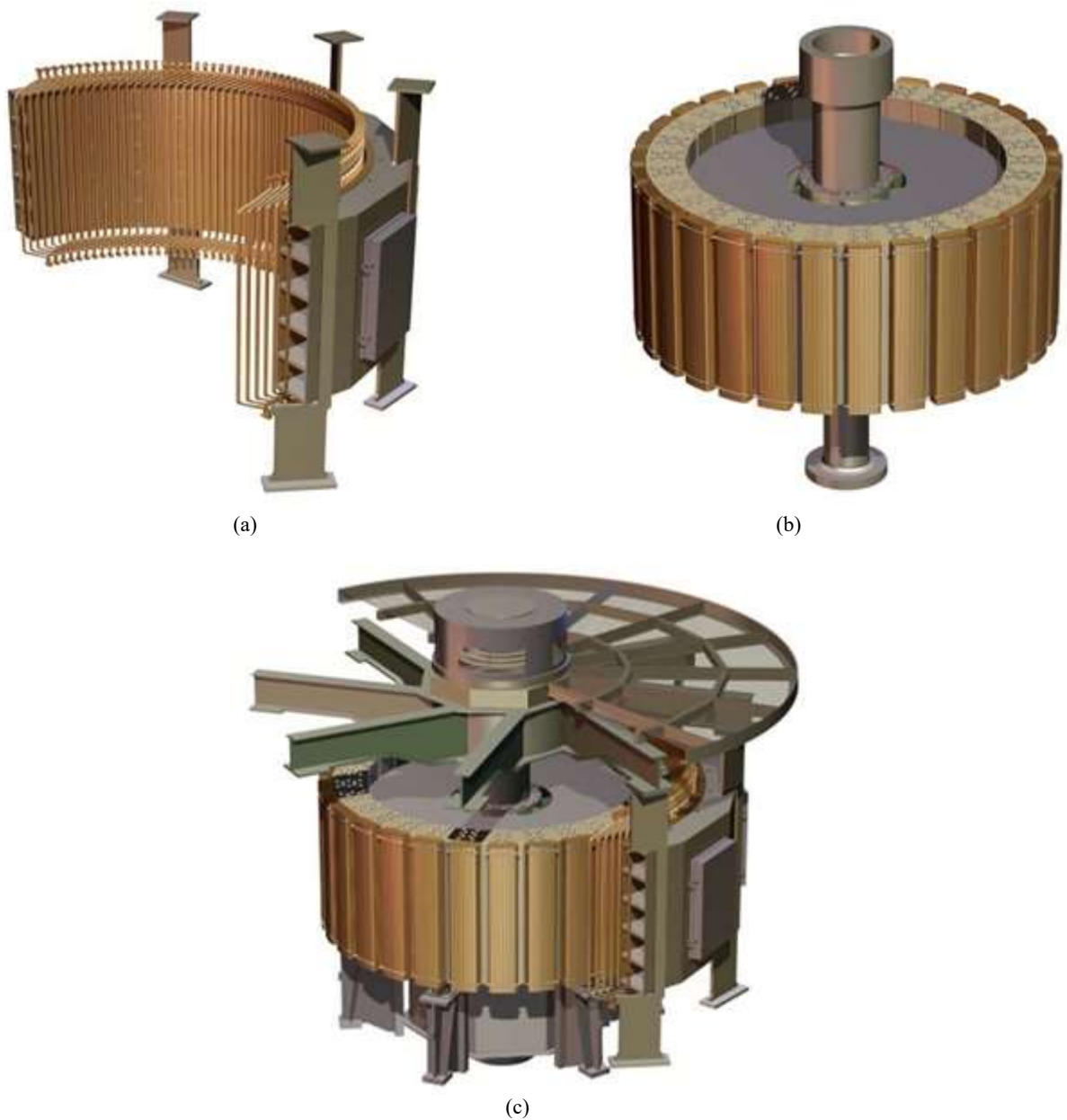


Figura 2.1 – (a) Estator completo: enrolamentos fixados no núcleo; (b) Rotor completo; (c) Máquina completa: Estator + Rotor.

Fonte: Adaptado de [39]

Os enrolamentos funcionam como condutor proporcionando um caminho à eletricidade, enquanto que o núcleo concentra o campo magnético, fixa os enrolamentos e dissipa o calor. Uma vez que a diferença de potencial entre os enrolamentos e núcleo aterrado do estator pode chegar a alguns milhares de volts, faz-se necessário separar essas duas superfícies com um material isolante. Embora extremamente necessário na isolação, suporte e transferência de calor, o material isolante não tem nenhuma função na produção de eletricidade ou torque em si [40]. A isolação é a parte mais fraca e a que envelhece mais rápido, por ação dos mais diversos tipos de estresses (elétricos, mecânicos, químicos e ambientais) que estão presentes em uma máquina em condições operacionais [40].

## 2.1 ESTRUTURA DOS ENROLAMENTOS DO ESTATOR

A principal função dos enrolamentos ou barras do estator é proporcionar um caminho para as correntes induzidas pelo campo magnético girante. Os projetistas de enrolamentos cada vez mais devem se certificar que estão colocando a medida certa de cobre para condução de corrente e mínimo necessário de material isolante na barra ou bobina.

### 2.1.1 Estrutura das Bobinas

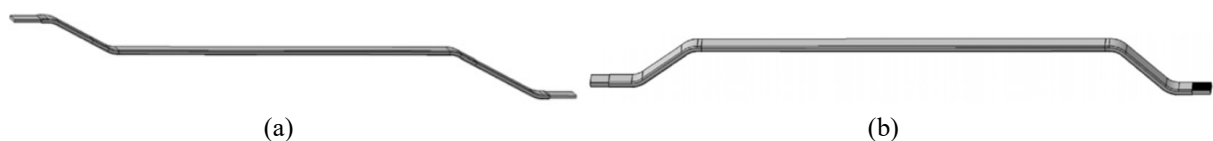
Existem dois modelos de barras largamente utilizados nos enrolamentos do estator:

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

A escolha está baseada nos requisitos de potência de saída e fator de potência desejados para a máquina. Tipicamente, máquinas inferiores a 75 MW são projetadas com bobinas de múltiplas espiras, enquanto que máquinas maiores normalmente possuem barras [40].

### 2.1.2 Barra (Meia Bobina) ou Barras Roebel

Normalmente, em máquinas cujo núcleo é muito longo ou com pequeno diâmetro, onde a montagem com bobinas completas é difícil, utilizam-se barras em duas seções denominadas meia bobina ou barras Roebel (termo dado na teoria eletromagnética, devido ao tipo de montagem, em que a rotação dos condutores internos dentro da barra permite melhor distribuição das correntes pelo efeito da superfície e dissipação de calor), essa barra possui dois tipos de projeto, o ondulado e o imbricado, ilustrados na Figura 2.2, a seguir.



(a) Barra Roebel ondulado; (b) Barra Roebel Imbricada.  
 Fonte: Adaptado de [40].

Esse tipo de barra é formada por vários condutores de seção retangular, normalmente transpostos de  $360^\circ$  de acordo com o sistema Roebel, sendo cada fio isolado independentemente, (ver Figura 2.3). Este processo de transposição distribui a corrente homogeneamente por toda a seção da barra, fazendo com que as perdas por correntes parasitas e pelo Efeito Field sejam minimizadas [36].

Na Figura 2.3 está ilustrado como cada condutor elementar ocupa todas as posições na barra dentro do comprimento do núcleo. Por tal motivo, existe uma limitação construtiva na confecção de barras Roebel imposta pelo comprimento do núcleo estático, uma vez que, para completar a transposição de  $360^\circ$ , faz-se necessário um comprimento mínimo dependente do número e dimensões do fio. Elas geralmente são identificadas por sua posição relativa dentro do núcleo como barra superior ou barra inferior. Essas barras são inseridas nas ranhuras e depois conectadas à outra metade, formando a bobina completa [41].

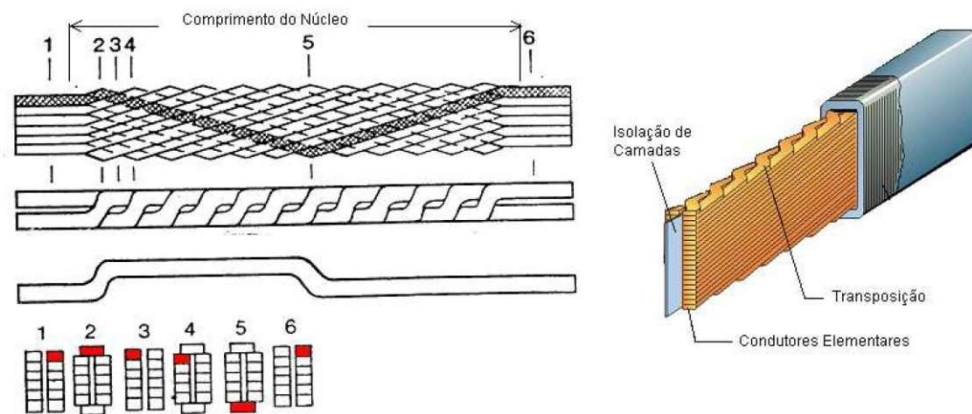


Figura 2.3 – Transposição Roebel  $360^\circ$ .  
Fonte: Adaptado de [36].

A forma com que essas bobinas são ligadas às barras define dois tipos básicos de enrolamentos: o imbricado e o ondulado, que podem ser observados na Figura 2.4. O enrolamento imbricado tem os terminais de suas bobinas ligados às barras vizinhas enquanto no enrolamento ondulado os terminais de suas bobinas estão ligados às barras deslocadas entre si de  $360^\circ$  elétricos, ou seja, dois passos polares [40].

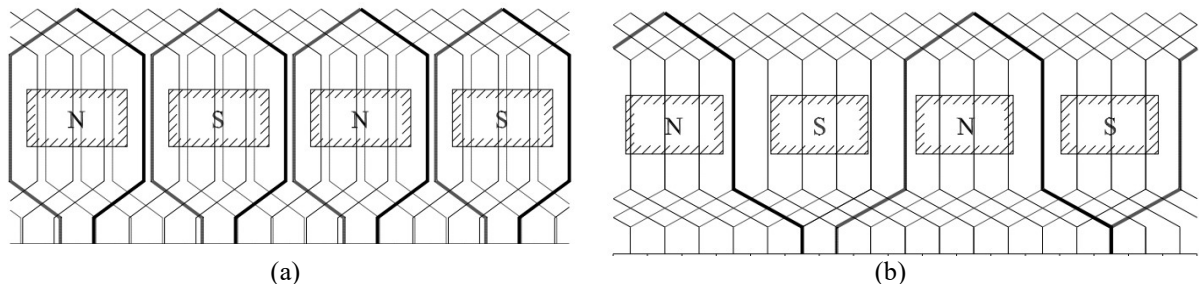


Figura 2.4 – (a) Estrutura do enrolamento imbricado; (b) Estrutura do enrolamento ondulado.  
Fonte: Adaptado de [40].

### 2.1.3 Bobinas de Múltiplas Espiras

Nas bobinas de múltiplas espiras, cada espira é formada por um conjunto de condutores elementares, e cada bobina, conforme necessidade, poderá ter mais de uma espira. A Figura 2.5, a seguir, apresenta o corte da ranhura de um enrolamento de dupla camada formada por bobinas de múltiplas espiras. A bobina da Figura 2.5 é constituída por seis espiras e cada espira é formada por quatro condutores. A Figura 2.6 apresenta este tipo de bobina [41].

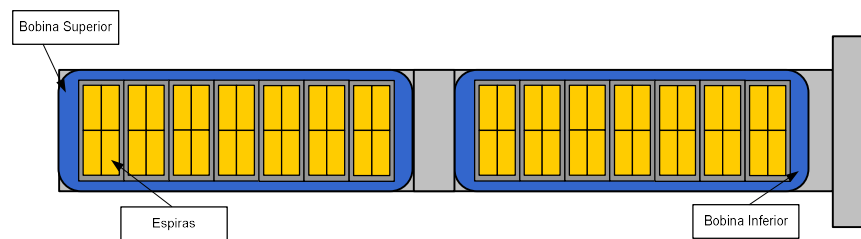


Figura 2.5 - Corte de uma ranhura com bobinas de múltiplas espiras.  
Fonte: Adaptado de [41].



Figura 2.6 – Bobina de múltiplas espiras.  
Fonte: Adaptado de [40].

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

## 2.2 TIPOS DE ISOLAÇÃO

Como mostrado na Figura 2.7, existem três tipos de isolamento em uma bobina de múltiplas espiras: grupos de cobre isolados individualmente (*strand*). Montados em conjuntos também isolados, denominados espiras (*turn*), são arranjados de modo a formar a bobina em formato de “diamante” e isolados externamente (*groundwall*) [40].

Segundo [40] como não há espiras na barra Roebel (meia bobina), pois este tipo de barra possui apenas dois tipos de isolamento: os grupos de cobre isolados individualmente e a isolamento externa, como pode ser observado na Figura 2.8.

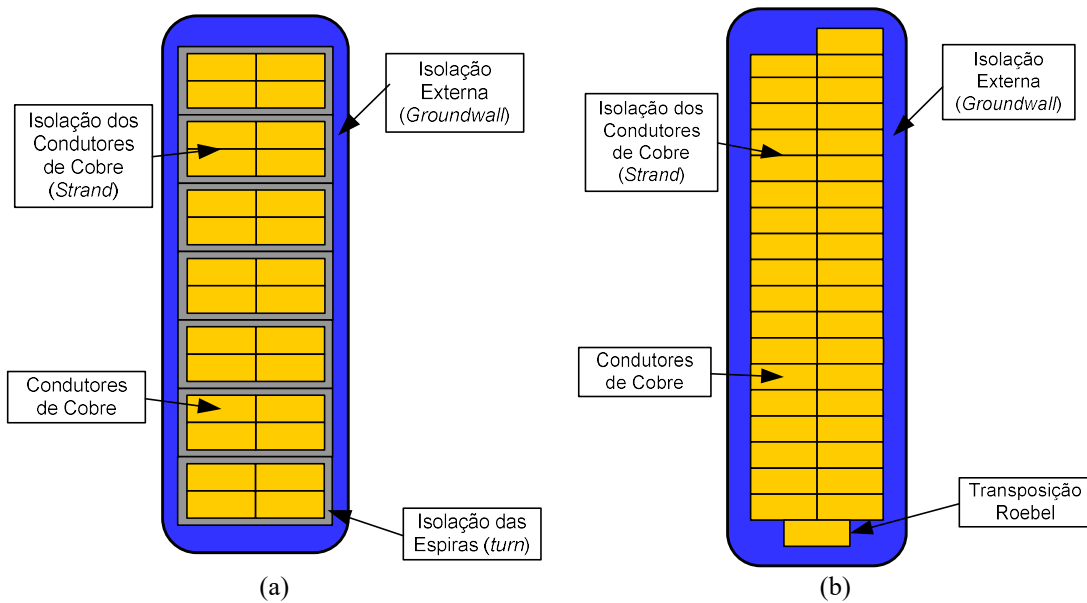


Figura 2.7 – (a) Isolação de bobinas com múltiplas espiras; (b) Isolação de uma barra Roebel.  
Fonte: Adaptado de [40].

A principal função da isolação é separar o condutor do núcleo do estator e permitir que exista a diferença de potencial entre esses dois componentes. Os materiais mais comuns utilizados para possibilitar a isolação elétrica são vidro, mica e papel. Todos estes materiais possuem excelentes propriedades de isolação elétrica. Entretanto, suas propriedades mecânicas não são muito boas. O vidro e a mica tendem a estilhaçar quando submetidos a vibrações entre 100 e 120 Hz, presentes no gerador. Para diminuir o estresse mecânico na isolação, os projetistas escolheram impregnar os materiais utilizados na isolação com um composto orgânico. Os compostos frequentemente utilizados são: asfalto, poliéster e epóxi. O composto utilizado no motor o gerador depende do fabricante do enrolamento e do ano de fabricação.

Os materiais de isolamento elétrico utilizados de hidrogeradores mudaram muito nos últimos 100 anos. Até 1960, os principais sistemas de isolação utilizados em geradores, eram compostos de fitas de papel e lâminas de mica aglutinadas com betume, sistema este denominado *Micafolium asfáltico*, ou, em menor escala de aplicação, o *Micafolium goma-laca*, no qual o betume asfáltico era substituído por uma resina natural. Estes sistemas de isolamento são limitados em sua utilização pela temperatura de trabalho, que é de aproximadamente 95 °C, estando enquadrados na Classe Térmica “B” [42].

No início da década de 60 surgiram os primeiros geradores compostos de folhas de mica, tecido de fibra de vidro impregnado com uma resina sintética, neste caso poliéster, denominada *Micafolium poliéster* que possui propriedades isolantes e características térmicas melhores do que os sistemas anteriores, sendo enquadrado na classe térmica “F”. Com o aperfeiçoamento das resinas sintéticas, a indústria eletroeletrônica começou a aplicar como isolantes de bobinas de geradores, um composto de

fitas de mica e resina epóxi, que possuem um desempenho muito superior, quando comparados aos primeiros de base asfáltica [42].

A Figura 2.8 apresenta o desenvolvimento da construção e progresso das dimensões da isolamento elétrica para máquinas rotativas de alta tensão.

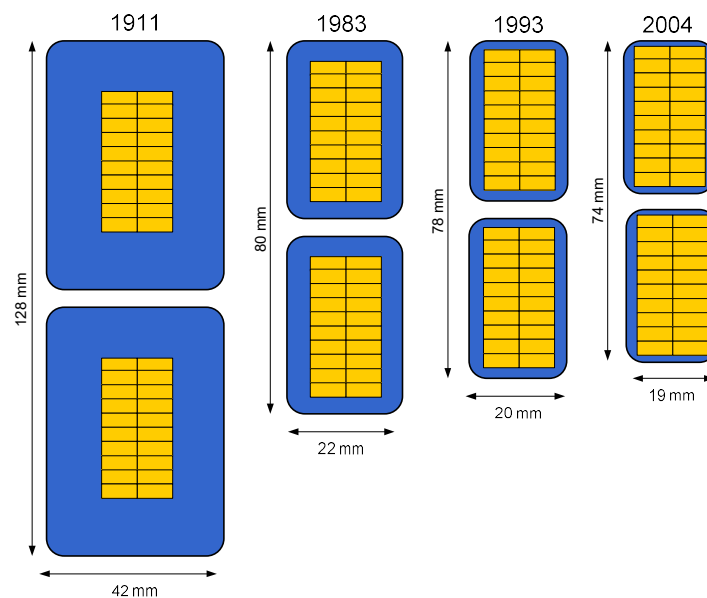


Figura 2.8 – Desenvolvimento das dimensões dos sistemas de isolamento das máquinas rotativas desde o início.  
Fonte: Adaptado de [43].

Como pode ser observado na Figura 2.8, é evidente que as primeiras construções foram grandes e os vários tipos de estresse não levavam ao envelhecimento, como acontece com os sistemas com menos material. Por um lado, a redução da espessura das paredes de isolamento elétrica é cada vez mais importante, no entanto, outros fatores que influenciam no envelhecimento, como vibrações mecânicas e estresse térmico agora têm mais influência [43].

## 2.3 FALHAS NO ISOLAMENTO DO ESTATOR

Uma falha no isolamento do estator é um caminho de baixa impedância entre os condutores que devem ser isolados uns dos outros, tais como entre espiras, barras, fases, ou entre fase e núcleo. Esta seção indica o potencial da manutenção preditiva no isolamento do estator, e lista alguns modos comuns de falha. Mais detalhes serão apresentados em capítulos posteriores sobre o processo de descargas parciais no isolamento do estator.

### 2.3.1 Falhas Em Máquinas Rotativas

De acordo com [44] existem duas formas de classificar as falhas em máquinas rotativas de alta tensão, uma é a condição em que a máquina foi encontrada após a falha; a outra é pela suspeita da causa



raiz que originou a falha. Estudar a causa raiz pode ser muito mais interessante, mas para fins de diagnóstico o mais importante é se o desenvolvimento da falha seria previsível a partir do componente estudado. A distribuição das falhas e causas sobre os componentes varia entre os diferentes tipos de máquinas, porém uma indicação aproximada é apresentada a seguir.

### 2.3.2 Causas de Falhas nos Enrolamentos do Estator

Na pesquisa de [45], foram descritas as falhas nos enrolamentos do estator que ocorrem por estresses elétricos (em função da tensão), mecânicos (vibração), térmicos (sobreaquecimento), químicos e ambientais (contaminação e umidade), que ocasionam a deterioração do isolamento e que apresentam como sintoma a presença de descargas parciais com maiores magnitude e frequências.

Na Tabela 2.1, são apresentados os mecanismos de falha, sintomas, teste de detecção e o tipo da máquina, conforme descrito por [45].

Tabela 2.1 – Tipos de falhas nos enrolamentos do estator.

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

Fonte: Adaptado de [41].

### 3 CAPÍTULO – DESCARGAS PARCIAIS EM MÁQUINAS ROTATIVAS

Este capítulo apresenta os principais termos e conceitos sobre as descargas parciais, mostrando ao leitor um pouco da física destas descargas, principalmente quando os equipamentos são submetidos a alta tensão.

Será dada uma atenção especial para as DP que ocorrem no isolamento do estator, apresentando ao leitor as fontes dessas descargas assim como uma ideia dos típicos padrões de DP para o isolamento do estator.

#### 3.1 FÍSICA DAS DESCARGAS PARCIAIS

##### 3.1.1 Ionização dos Átomos de um Material Isolante

De acordo com [46], para compreender o fenômeno das descargas parciais faz-se necessário entender como são ionizados os átomos de um material dielétrico.

Para casos práticos de simples ionização, deve-se estabelecer a relação entre a diferença de potencial entre dois pontos  $a$  e  $b$  ( $V_{ab}$ ) e o campo elétrico ( $\vec{E}$ ). Essa relação é apresentada na Equação (3.1), em que se considera um dielétrico com comportamento linear, isotrópico e um sistema homogêneo (a permissividade  $\epsilon$  do meio é estática ou é considerada constante para baixas frequências) [47].

$$\nabla V = \nabla \phi = -\vec{E} \quad (3.1)$$

Segundo [46] e [48] o campo elétrico aplicado ao dielétrico exerce uma força nos elétrons da camada de valência mais externa dos átomos do material isolante, na tentativa de “arrancá-los” da camada de valência. No entanto, como os elétrons são fortemente ligados aos seus átomos, o que ocorre é uma polarização dos átomos, ou seja, há um deslocamento de cargas positivas e negativas de suas posições de equilíbrio originais para posições mais periféricas do átomo. Os elétrons ficam sujeitos a forças contrárias ao sentido do campo e o núcleo fica sujeito a forças do mesmo sentido do campo, forças estas que distorcem a estrutura atômica. Neste momento, os átomos comportam-se como dipolos, ou seja, os átomos passam a se comportar como duas cargas pontuais  $+q$  e  $-q$ , representando respectivamente o núcleo e carga eletrônica. Diz-se, então que o material dielétrico está polarizado.

Elevando-se o campo elétrico, as forças internas não serão mais capazes de manter os elétrons da última camada presos aos átomos. Haverá um desprendimento dos elétrons de sua órbita. Neste momento, o átomo ficará com mais cargas positivas (ionizado positivamente) e o elétron liberado encontra-se livre pelo dielétrico [48].

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 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, ou seja, não haverá transferência de energia. Entretanto, se a intensidade do campo 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 suficiente para deslocar outro elétron de sua órbita e ionizar o átomo [46].

De acordo com [46], o elétron inicial, que perdeu a maior parte da sua velocidade na colisão, e o elétron expulso da molécula de ar que também possui uma velocidade baixa é acelerado pelo campo elétrico, e na próxima colisão cada elétron é capaz de ionizar uma molécula de ar. Após a segunda colisão, existem quatro elétrons capazes de ionizar outros átomos e assim sucessivamente, com o número dobrando a cada colisão. Este processo é conhecido como avalanche de elétrons, sendo sempre iniciado com um elétron livre submetido a um campo elétrico intenso. A Figura 3.1 ilustra a sequência de ionização dos átomos.

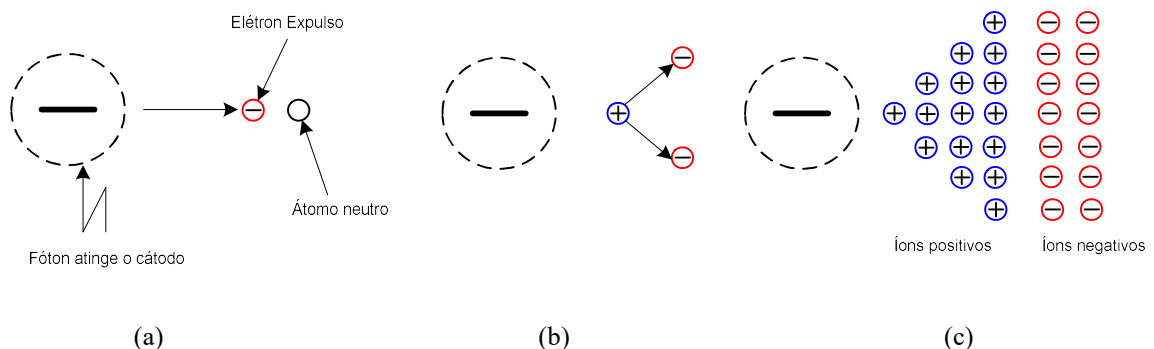


Figura 3.1 – Processo de avalanche de elétrons iniciado a partir de um eletrodo negativo. a) Início; b) Formação de um par de elétrons – impacto de um elétron com um átomo neutro libera um elétron adicional e deixa um íon positivo para trás; c) Multiplicação – os elétrons se movem criando íons positivos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

Fonte: Adaptado de [46].

Os íons positivos deixados para trás no processo de avalanche de elétrons se movem na direção do eletrodo negativo. No entanto, eles se movem com uma baixa velocidade, devido a sua massa, que é aproximadamente cinquenta mil vezes maior que a massa do elétron. Tendo uma carga positiva, esses íons atraem elétrons que livres, e quando algum desses elétrons é capturado é formada outra molécula neutra de ar. O nível de energia de uma molécula neutra é menor do que o do íon positivo correspondente. Logo, quando um elétron livre é capturado, um quantum de energia é emitido pela molécula. Esse quantum de energia é exatamente igual em magnitude à energia que inicialmente foi requerida para deslocar o elétron inicial para fora de sua molécula. Uma onda eletromagnética é irradiada e, para moléculas de ar como oxigênio e nitrogênio, essa radiação está dentro da faixa de luz visível

[46]. Se não houver mais uma fonte de energia, o processo de ionização cessará, mas a recombinação continuará até que não haja mais elétrons livres nem íons positivos.

Os elétrons e íons positivos provenientes deste processo são suficientes para conduzir corrente entre os eletrodos e absorver uma quantidade relativamente grande de potência da fonte, fazendo com que uma centelha surja entre os eletrodos. Quando ocorre o centelhamento, diz-se que há uma ruptura do material dielétrico. Como essa centelha normalmente não atravessa completamente o material dielétrico entre os eletrodos, é chamada de descarga parcial [46].

A avalanche de elétrons ilustrada na Figura 3.1 possui certo número de elétrons por segundo, que pode variar de centenas de elétrons por segundo até  $10^{22}$  elétrons por segundo, em um período típico de 100 nano segundos. Para quantificar melhor a carga, utiliza-se como unidade o Coulomb, que é equivalente a uma carga de  $6,2 \times 10^{18}$  elétrons. Como um Ampère é definido como um fluxo de carga de um Coulomb por segundo, a corrente da avalanche de elétrons pode variar de  $10^{-17}$  A até alguns milhares de Ampères [46].

### 3.1.2 Forma do Pulso das Descargas Parciais

De acordo com [32] o pulso de uma descarga parcial possui um tempo de subida extremamente rápido e uma largura curta. O período de oscilação, o tempo de subida e as magnitudes dos picos subsequentes variam para cada pulso. Essas características normalmente dependem da geometria da máquina, da localização dos pulsos e do material isolante.

Os sinais de DP medidos terão características distintas em função das propriedades de cada enrolamento, bem como da localização e do tipo da fonte de DP. Além do mais, as DP estão sujeitas a uma forte atenuação ao propagar-se pelo enrolamento, podendo, dependendo da sua localização, tornarem-se indetectáveis pelo circuito de medição. A Figura 3.2, a seguir, adaptada do trabalho de [49] mostra como o pulso de DP é atenuado com a distância (em metros) e seu tempo de subida aumenta à medida que o mesmo se propaga até o circuito de medição.

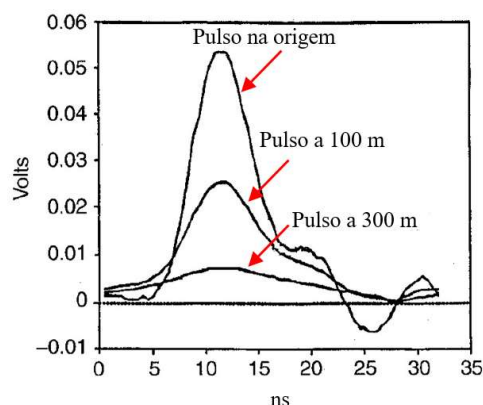


Figura 3.2 – Distorção do pulso ao longo do circuito de medição.  
Fonte: Adaptado de [49].

### 3.1.3 Deslocamento do Pulso nos Enrolamentos do Estator

Para pulsos com componentes de altas frequências, o enrolamento estatórico é modelado como um circuito de parâmetros distribuído, uma linha de transmissão na qual os pulsos de DP se propagam desde o seu local de origem até o circuito de medição, como mostra o esquema simplificado na Figura 3.3 [50]. Desde o seu ponto de origem (que é, a princípio, ignorado) até o circuito de medição, o pulso de DP se propaga por uma rede de parâmetros distribuídos, composta por indutâncias em série, capacitâncias em paralelo e capacitâncias *shunt* para a terra.

Devido a fenômenos como atenuação, distorção, e acoplamento entre fases de ondas viajantes, a amplitude e a forma de onda das DP captadas pelo circuito de medição diferem sensivelmente daquelas ocorridas onde a DP se originou.

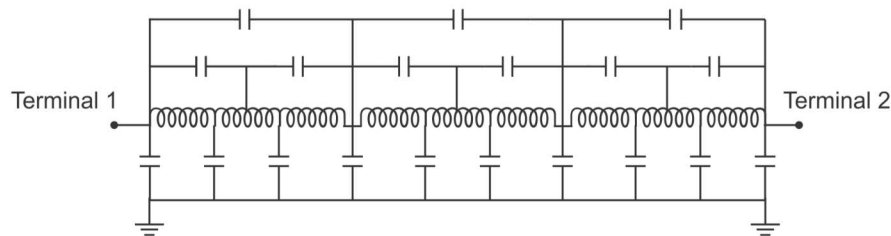


Figura 3.3 – Representação esquemática da rede de indutâncias e capacitâncias distribuídas ao longo dos enrolamentos estatóricos.

Fonte: Adaptado de [50].

A função de transferência entre a fonte de DP e o circuito de medição é, portanto, desconhecida, e depende do projeto específico de cada máquina, que determina a resposta em frequência do enrolamento estatórico. Assim sendo, nota-se que a energia na origem da DP não pode ser medida diretamente. Este fato impede a calibração da medição de DP em máquinas síncronas. Por esse motivo, a medição em máquinas síncronas registra usualmente a amplitude das DP em mV, e não em pC como recomenda a norma IEC 60270 [05] para isolamentos modelados com parâmetros concentrados [01].

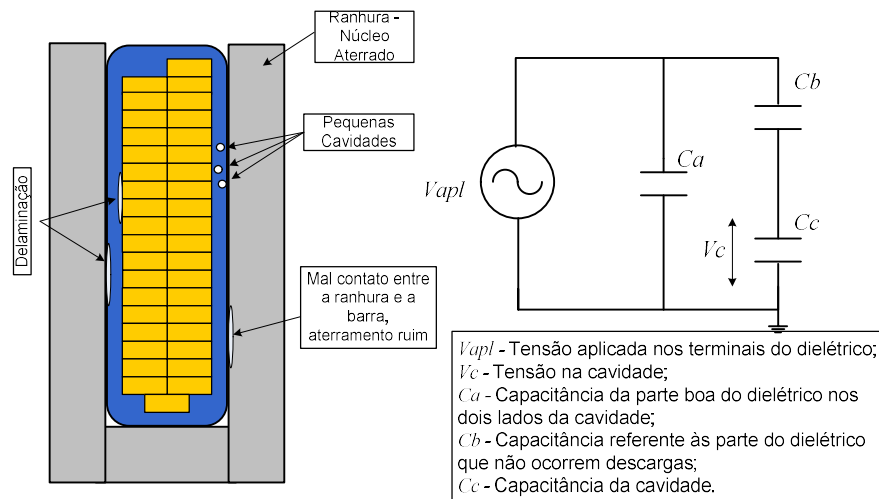
### 3.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA CAVIDADE

Sempre que existir uma cavidade no interior ou na superfície de uma isolação, uma diferença de potencial irá se formar através dela. A magnitude dessa diferença de potencial dependerá da tensão aplicada nos terminais da isolação e da capacitância da cavidade. A tensão que irá aparecer através da cavidade é modelada pelo circuito equivalente na Figura 3.4.

A descarga apenas ocorrerá quando o estresse elétrico (V/mm) exceder a tensão de ruptura do gás no interior da cavidade, tal como estabelecido pela a Lei de Paschen, que estabelece que a tensão de ruptura do gás, varia de acordo com a Equação 3.2, ou seja, é função do produto entre o diâmetro  $d$  da cavidade e a pressão  $p$  a que o gás, no interior dela, está submetido [47].

$$V = f(pd) \quad (3.2)$$

Para simplificar, costuma-se considerar uma única cavidade de contorno de plano, pois as várias partes do dielétrico podem ser simuladas idealmente por capacitores de placas paralelas. O circuito equivalente simplificado da Figura 3.4 (b) mostra a representação elétrica do comportamento de DP internas ao isolante submetido a 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 boa do dielétrico nos dois lados da cavidade.



(a) (b)  
 Figura 3.4 – (a) Barra Roebel com diversas cavidades; (b) Circuito equivalente.  
 Fonte: Adaptado de [40].

De acordo com [50] quando o circuito da Figura 3.4 (b) é submetido a alta tensão designada por  $V_{apl}$ , a cavidade associada a capacitância  $C_c$  fica submetida a uma tensão  $V_c$  e quando a tensão  $V_c$  atinge a de tensão de ruptura da rigidez dielétrica da cavidade  $U^+$ , ocorre um curto-circuito através da

capacitância  $C_c$ , ou em outras palavras, uma descarga parcial, o que significa uma diminuição da tensão nos terminais do dielétrico e da cavidade  $C_c$ , a Figura 3.5 ilustra este processo. 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.

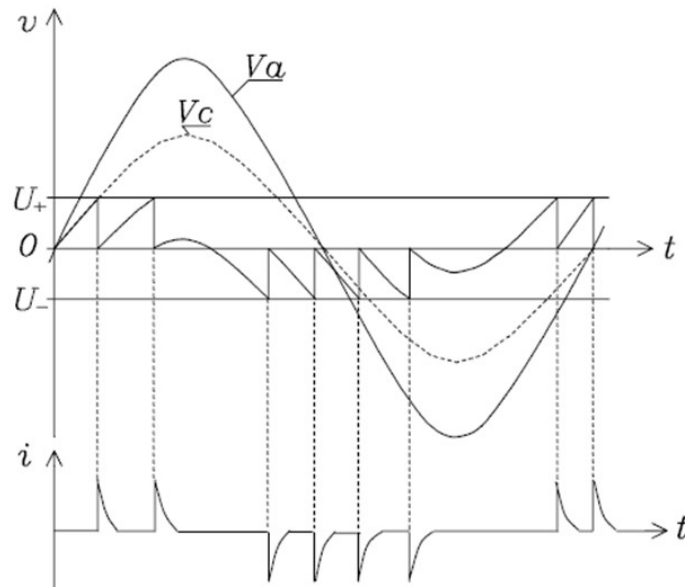


Figura 3.5 – Tensões e correntes no circuito equivalente das descargas parciais.  
Fonte: Adaptado de [50].

### 3.3 DESCARGAS PARCIAIS NOS ENROLAMENTOS ESTATÓRICOS

O objetivo dessa seção é fornecer uma ideia dos típicos padrões de DP que podem ocorrer isolamento do estator. As diversas características das diferentes fontes de DP encontradas dentro do isolamento do estator são importantes durante a utilização de diferentes métodos de diagnóstico.

De acordo com [31] as fontes de DP em hidrogeradores são classificadas em quatro grupos: descargas internas, descargas de ranhura, descargas na cabeça da bobina e descargas por partículas condutivas.

#### 3.3.1 Descargas Internas

##### 3.3.1.1 Cavidades Internas

Embora os processos de fabricação objetivem minimizar cavidades internas, estas não são completamente eliminadas. Por exemplo, sistema de isolamento compostos de folhas de mica, tecido de fibra de vidro impregnado com uma resina sintética, comumente utilizado em máquinas rotativas de alta tensão. A mica presente no sistema de isolamento impede que as descargas parciais evoluam e causem o rompimento completo do dielétrico. A confiabilidade operacional não é comprometida caso essas cavidades forem pequenas e não aumentem significativamente com o passar do tempo.

### 3.3.1.2 Delaminação Interna

A delaminação interna no isolamento do estator pode ser causada durante o processo de fabricação ou pelo sobreaquecimento das bobinas, onde à medida que o sistema de isolamento é exposto continuamente a esse sobreaquecimento, as resinas orgânicas tendem a perder sua rigidez mecânica, ocorrendo assim o descolamento das camadas da isolação, acarretando um fenômeno conhecido como delaminação das camadas.

Quando ocorre a delaminação das camadas da isolação, os condutores internos de cobre ficam livres para vibrar e então ocorrem descargas parciais de alta energia que podem comprometer significativamente a isolação.

A delaminação irá reduzir a condutividade térmica da isolação o que pode levar a o envelhecimento acelerado, por esse motivo a delaminação necessita de atenção especial quando detectada.

### 3.3.1.3 Delaminação entre Condutores e a Isolação

O ciclo térmico pode causar delaminação na interface do condutor e a isolação principal. Esse processo de delaminação pode resultar em descargas parciais que rapidamente podem levar a falha especialmente em bobinas de múltiplas espiras. A Figura 3.6, a seguir, apresenta exemplos de delaminação em uma barra estatórica.

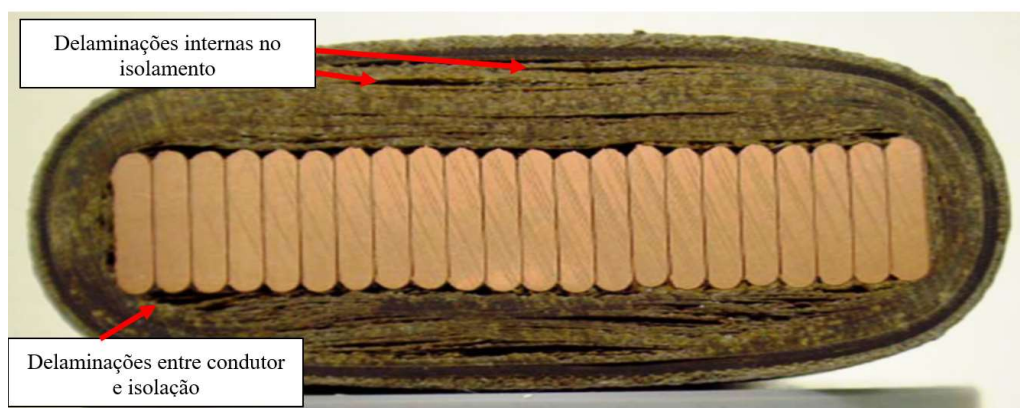


Figura 3.6 – Seção transversão de uma barra estatórica, onde se podem observar delaminações internas no isolamento.

### 3.3.1.4 Arborescência (*treeing*) Elétrica

A arborescência (*treeing*) elétrica na isolação da máquina é um processo de envelhecimento em que finos canais se propagam através do epóxi em torno das barreiras de mica e pode finalmente levar a falha elétrica do isolamento principal. Esse processo é associado a atividade de descargas parciais internas.



### 3.3.2 Descargas de Ranhura (*Slot Discharges*)

Descargas de ranhura em hidrogeradores ocorrem quando o revestimento da parte semi condutiva na ranhura se danifica devido ao movimento da barra ou bobina na ranhura, conforme pode ser observado na Figura 3.7. Altos níveis de descargas aparecerão quando sérios danos mecânicos já estão presentes, que pode resultar em um dano adicional à isolação principal e eventualmente em uma falha na isolação. As descargas de ranhura são geralmente causadas pela concentração de campo elétrico local, esse processo ocorre apenas nos terminais de alta tensão de cada fase.

O tempo absoluto entre a detecção deste fenômeno e a falha total da isolação geralmente é desconhecido. Entretanto, comparado com outros efeitos de deteriorização típicos esse tempo geralmente pode ser curto, especialmente na presença da vibração das barras ou bobinas. Deste modo, uma detecção confiável nos estágios iniciais se faz necessária para decidir que ações de manutenção devem ser tomadas.



Figura 3.7 – Desgaste da parte condutiva de uma barra Roebel.

### 3.3.3 Descargas nos Terminais de Saída do Enrolamento (*End-Winding*)

Descargas corona na área da cabeça da bobina podem ocorrer em diversos locais com alta concentração de campo elétrico. Tais descargas normalmente ocorrem nas interfaces entre diferentes elementos da cabeça da bobina dos enrolamentos do estator.

#### 3.3.3.1 Descargas de Superfície

As descargas de superfície geralmente se iniciam quando o campo elétrico ao longo da superfície excede o valor da rigidez dielétrica do gás ou líquido que está ao redor. Esse fenômeno pode acontecer quando nenhum revestimento para controle de estresse for aplicado na cabeça da bobina ou o revestimento aplicado se tornar ineficiente devido a contaminação por sujeira ou umidade, porosidade, efeitos térmicos, entre outros.

Este tipo de descarga normalmente é um mecanismo de falha muito lento, mesmo que o comportamento das DP esteja sujeito a alterações relativamente rápidas devido aos efeitos da superfície. Descargas de superfície normalmente resultam em uma falta fase-terra.

### 3.3.3.2 Descargas entre Fases

Descargas parciais podem ocorrer entre fases, por exemplo, devido a inadequada distância de isolamento entre fases ou utilização de sistemas suporte da cabeça da bobina inadequado. Dependendo do projeto essas descargas podem ter magnitudes elevadas e podem ocorrer como descargas de superfícies ou descargas internas. Descargas entre fases podem resultar em uma falha fase-fase.

### 3.3.4 Partículas Condutivas

A presença de partículas condutivas, especialmente pequenas partículas, por exemplo, devido à contaminação do enrolamento, podem resultar em uma grande concentração de descargas parciais. Isso pode resultar em pequenas cavidades na isolação.

## 3.4 GRANDEZAS ASSOCIADAS ÀS DESCARGAS PARCIAIS

A seguir, serão apresentadas algumas definições de grandezas para medição de descargas parciais, segundo as normas internacionais [05, 31, 32].

### 3.4.1 Magnitude de DP com Maior Repetibilidade, $Q_m$

É definida como magnitude registrada por um sistema de medição que tem a resposta ao trem de pulsos de acordo a IEC 60270 [05], ou a magnitude associada a uma taxa de repetição dos pulsos de um determinado número de pulsos por segundo. A taxa de repetição de pulso recomendada é de 10 pulsos por segundo.

### 3.4.2 Taxa de Repetição de Pulso, $n$

Número médio de pulsos de descargas por segundo, medido num intervalo de tempo escolhido. Na prática, geralmente se levam em consideração somente pulsos acima de uma intensidade específica.

### 3.4.3 Ângulo de Fase das Descargas Parciais e Tempo de Ocorrência dos Pulsos

É a posição do pulso de descarga em relação ao período  $T$  da onda de tensão aplicada a frequência industrial, é dado pela Equação 3.3.

$$\varphi_i = 360 \left( \frac{t_i}{T} \right) \quad (3.3)$$

Em que:  $\varphi_i$ : é o ângulo de fase (°);

$t_i$ : é o tempo de ocorrência dos pulsos de descargas parciais;

$T$ : é o período da tensão de teste;

#### **3.4.4 Tensão de Início de Descargas Parciais**

Mais baixa tensão na qual são observadas descargas parciais, quando a tensão aplicada no objeto sob ensaio é gradualmente aumentada a partir de um valor baixo no qual não são observadas descargas parciais.

#### **3.4.5 Tensão de Extinção de Descargas Parciais**

Mais alta tensão na qual cessam as descargas parciais, quando a tensão é gradualmente diminuída a partir de um valor superior a tensão de início de descarga.

Na prática, para fins de determinação das tensões de início e de extinção, levam-se em consideração apenas DP de intensidade superior a um valor baixo especificado.

#### **3.4.6 Frequências de Corte Inferior e Superior, $f_1$ e $f_2$ .**

São as frequências nas quais a resposta de um circuito decai em 3 dB em relação a um valor constante e que limitam a faixa dentro da qual a resposta do circuito de medição é aproximadamente constante.

#### **3.4.7 Largura de banda, $\Delta f$ .**

Diferença entre as frequências de corte inferior e superior, da pela Equação (3.4).

$$\Delta f = f_1 - f_2 \quad (3.4)$$

### 3.5 DESCARGAS PARCIAIS ASSOCIADAS À FASE

Segundo [47] a análise de associação à fase das descargas parciais atualmente é considerada umas das metodologias mais eficientes para a identificação das fontes de DP e foi incorporada aos mais modernos instrumentos de medição de DP.

Na análise de associação à fase inicialmente supõe-se que a tensão de ensaio ou sistema é constante e os ângulos de fase desta onda são discretizados em faixas. O instrumento de medição de DP mede a amplitudes das DP, relacionadas ao ângulo de fase ( $\varphi_i$ ) da tensão de ensaio ou do sistema, durante certo intervalo de tempo. Durante esse intervalo de tempo, os valores das amplitudes são acumulados e podem ser expressos pela razão da taxa de ocorrência ( $n$ ), esses dados de DP são classificados como descargas parciais associadas à fase ou PRPD. Os *softwares* de análise exibem essas informações como distribuições bivariadas, do tipo  $(\varphi_i, q, n)$ , como exemplificado na Figura 3.8.

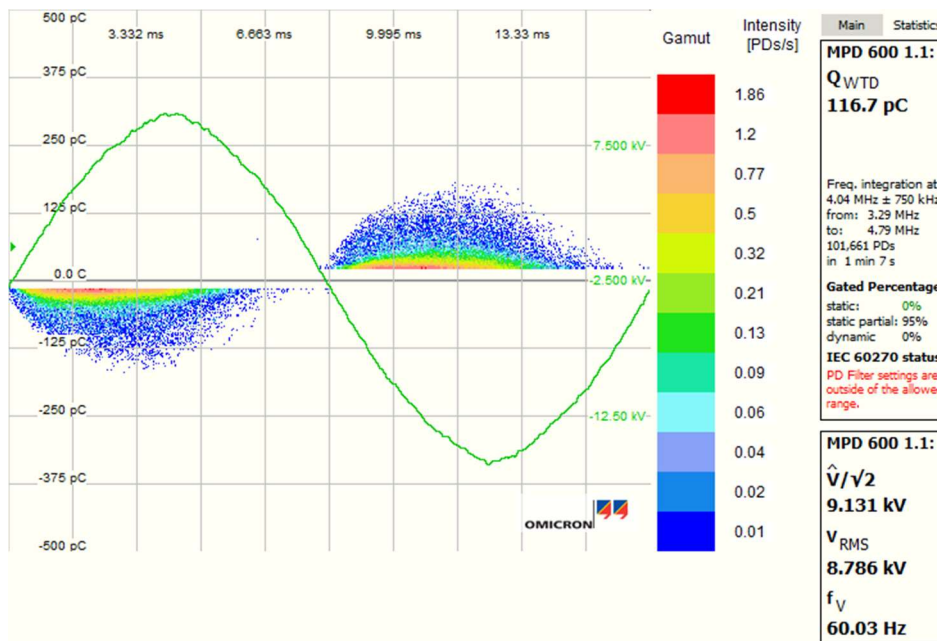
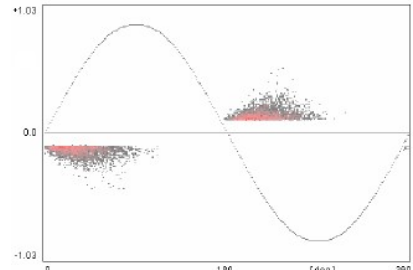
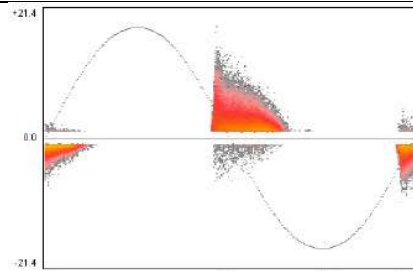
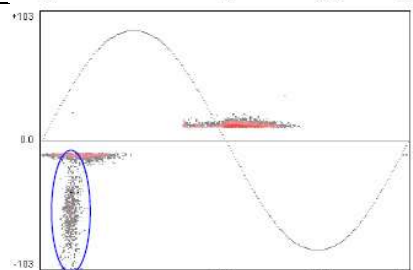
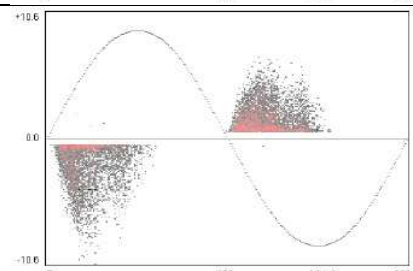


Figura 3.8– Descarga parciais associadas a fase.

A Tabela 3.1, a seguir, apresenta alguns padrões de mapas estatísticos de descargas parciais extraídos da literatura.

Tabela 3.1 – Padrões de mapas estatísticos de descargas parciais.

Tipo de Descarga	Mapa Estatístico
Descargas Internas	
Descargas de Ranhura	
Descargas de Superfície	
Delaminação	

Fonte: Adaptado de [51].

### 3.6 MEDIÇÃO DO PULSO ELÉTRICO DE DP

Pelo fato da DP envolver um fluxo de elétrons e íons ao longo de uma distância muito pequena e em um curto período de tempo, uma pequena corrente elétrica flui ao longo do enrolamento da máquina toda vez que ocorre uma DP. A corrente total será governada pelo transporte de certo número de cargas em pico Coulomb (pC). Esse fluxo de corrente cria uma tensão elétrica detectável.

Um dos meios de detectar essa descarga é medindo o pulso da pequena tensão que a acompanha ou o pulso de corrente resultante. Essas quantidades são medidas em circuitos remotos à descarga. Vale

ressaltar que no enrolamento ou na barra de um hidrogerador pode haver centenas de descargas ocorrendo por segundo, portanto várias centenas de pulsos elétricos podem ser detectadas em cada segundo.

Os pulsos de tensão podem ser detectados por meio de capacitores de acoplamento de alta tensão, que normalmente são conectados ao terminal fase ou no enrolamento. O capacitor tem uma alta impedância para a tensão a frequência industrial, mas funciona como uma baixa impedância para pulsos de tensão de alta frequência das DP.

A saída dos acopladores são pulsos de tensão que podem ser medidos com um osciloscópio, analisador de espectro ou um medidor de descargas parciais.

### 3.7 ACOPLAMENTO CAPACITIVO

Conforme o [52] o capacitor de acoplamento tem a função de transferir o espectro de alta frequência dos sinais de DP do enrolamento até o dispositivo de acoplamento, simultaneamente atenua a tensão do sistema para baixas magnitudes. O capacitor de acoplamento deve ser livre de DP na tensão do sistema e deve possuir baixa indutância para poder transmitir os pulsos de DP sem oscilações.

De acordo com [53] a definição do valor capacitor de acoplamento deve levar em conta a capacitância do objeto a ser avaliado bem como a faixa de frequência que se deseja realizar a medição. Na realidade, o capacitor de acoplamento funciona como um filtro passa alta quando conectado ao enrolamento do estator, e fazendo uma terminação com um resistor, que pode variar de 500 até 2000  $\Omega$ . Comercialmente alguns valores de capacitores de acoplamento foram estabelecidos como certa padronização. Assim, é possível encontrar capacitores de 80 pF, 220 pF, 550 pF e até 1000 pF. Como exemplo, uma configuração típica no sistema elétrico brasileiro é usando um acoplador de 80pF com uma resistência de 690  $\Omega$ . Esta configuração apresenta uma frequência de corte inferior aproximada de 2,8 MHz, o que significa que sinais abaixo desta frequência serão significativamente atenuados, o que pode representar perdas nos sinais de DP.

A instalação e o número de acopladores também é um fator que deve ser bem analisado e discutido, tanto no âmbito técnico como econômico. A definição do número de acopladores está relacionada com a dimensão física da máquina, pois como dito anteriormente os sinais de alta frequência sofrem forte atenuação nos enrolamentos do estator. Desta forma, caso se deseje aumentar a área analisada do enrolamento, um número maior de acopladores deve ser instalado. Entretanto, na maioria dos casos, em máquinas de pequeno e médio porte, um acoplador em cada fase é o suficiente para uma boa avaliação do estado do isolamento [53].

A Figura 4.2, a seguir, apresenta os dois tipos de acoplamento possíveis, um no interior do enrolamento, Figura 4.2 (a) e outro na saída de fase Figura 4.2 (b).



Figura 3.9 – Acopladores capacitivos: a) Instalado no interior do enrolamento; b) Instalado na saída de fase.  
Fonte: Próprio autor.

Associada ao capacitor de acoplamento, tem-se a impedância de medição que pode ser desde uma simples resistência de um valor comercial até um circuito envolvendo capacitores, indutores e resistores, que tenha como função, além de capturar os sinais de DP, prover o sinal de referência de tensão na frequência nominal. O conceito simples é relacionar o parâmetro à sua característica em frequência, ou seja, para as altas frequências o indutor ( $L_m$ ) funciona como um circuito aberto, enquanto que o capacitor como um curto ( $C_m$ ); e, por outro lado, para baixas frequências o capacitor é um circuito aberto e o indutor um curto [53].

Assim, o capacitor ( $C_m$ ) em série com o conjunto paralelo indutor ( $L_m$ ) e resistor ( $R_m$ ), forma um sistema de divisor de tensão na frequência de 60Hz, sendo o indutor um curto. Nas altas frequências, ele é um circuito aberto e somente a resistência é útil neste caso, onde é possível capturar os sinais de DP, a Figura 4.3, a seguir, apresenta um exemplo de impedância de medição.

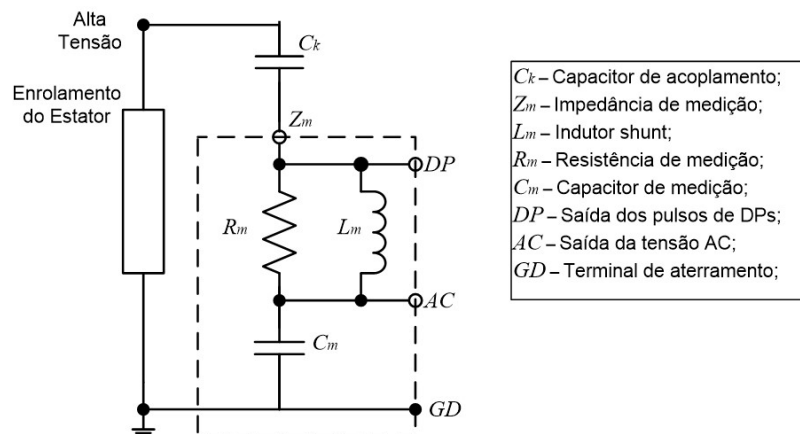


Figura 3.10 – Impedância de medição de descargas parciais.  
Fonte: Adaptado de [52]

## 4 CAPÍTULO – SENSORES ELETROMAGNÉTICOS PARA MEDIÇÃO DE DP

De acordo com [32] as descargas parciais são acompanhadas por várias manifestações físicas, tais como: pulsos elétricos e pulsos de rádio frequências (RF), perturbações acústicas, luz, assim como reações químicas em gases de resfriamento que podem ser o ar ou o hidrogênio. No entanto, este capítulo tratará apenas do método elétrico de medição de DP, pois este método é o único normatizado para avaliação da condição do isolamento dos enrolamentos de máquinas rotativas.

A medição elétrica pode ser realizada utilizando sensores de DP que detecte as componentes dos sinais dos pulsos que se deslocam através dos enrolamentos do estator ou por antenas que detectam as componentes do sinal irradiadas eletromagneticamente [31]. Sendo que a detecção por antenas ainda não é normatizada.

Em adição à criação de pulsos de tensão e de corrente nos enrolamentos do estator, a centelha provocada pela descarga também gera algumas ondas eletromagnéticas de rádio frequência que se propagam para além da fonte que originou a descarga parcial.

A perturbação eletromagnética gerada por uma DP tem frequências de RF de 100 kHz até várias centenas de MHz, com uma antena apropriada pode-se detectar as ocorrências de DP.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO SINAL

A Figura 4.1, mais adiante, mostra esquematicamente a resposta em frequência de um pulso ideal de descargas parciais na fonte de origem (frequência de corte superior  $f_{2DPo}$ ) e a resposta em frequência ideal nos terminais da máquina (frequência de corte superior  $f_{2DPt}$ ) após o deslocamento do pulso da fonte de origem, através dos enrolamentos, até os terminais.

Devido à considerável atenuação das componentes de alta frequência, a frequência de corte superior de um sinal de DP que chega aos terminais ( $f_{2DPt}$ ) será significativamente menor que  $f_{2DPo}$  do pulso original de DP.

Os sistemas de medição de DP, incluindo o sensor de DP, cabos e instrumentos de medição, apresentam filtros passa-banda com características específicas de frequências de corte superior e inferior, que dependem do projeto do sensor e da impedância de medição do instrumento. Na Figura 4.1, três exemplos a), b) e c) mostram as respostas em frequência para diferentes instrumentos de medição. As frequências de corte e largura de banda podem variar de uma grande faixa de frequências para os sistemas disponíveis comercialmente. A característica da resposta em frequência de um sistema de



medição completo tem um impacto considerável na sensibilidade global de detecção e nas propriedades do sinal.

Deve ser notado que a Figura 4.1 apenas descreve as relações fundamentais pela apresentação de curvas ideais. Dependendo do projeto do enrolamento e do sistema de medição utilizado, em casos práticos, pode haver diversos efeitos que irão influenciar na exata forma das curvas da resposta em frequência e, portanto, podem influenciar nos resultados das DP.

Para medições de DP *on-line* em máquinas rotativas podem ser definidas as seguintes faixas de frequências de acordo com a norma [21]:

#### **4.1.1 Faixas de Baixas Frequências**

Possui largura de banda de aproximadamente 1 MHz ou de algumas centenas de kHz, conforme [05], é utilizada com baixas frequências de corte, normalmente acima de 100 kHz e abaixo de 3 MHz. Medições realizadas nessa faixa de frequência asseguram boa sensibilidade não apenas para descargas parciais em barras ou bobinas próximas ao sensor de DP, mas também para aquelas que estão distantes no enrolamento. Entretanto, as baixas faixas de frequências estão sujeitas ruídos e perturbações, que estão presentes durante as medições *on-line*, por essa razão, procedimentos especiais para separação de ruídos e perturbações são necessários. Os instrumentos de medição que trabalham nas faixas de baixas frequências basicamente detectam a parte constante da resposta em frequência do pulso de DP.

Considerando que a frequência de corte superior da banda de passagem do instrumento de medição é significativamente menor que a frequência de corte superior da resposta em frequência do pulso de DP, então os pulsos detectados são diretamente proporcionais à carga aparente da corrente do pulso de DP.

#### **4.1.2 Faixa de Altas Frequências**

Esta faixa utiliza largura de banda de 3 MHz até 30 MHz, as frequências de corte inferior podem também ser sintonizadas abaixo de 1 MHz para assegurar uma boa sensibilidade para a medição. Entretanto, geralmente frequências corte inferior acima de 1 MHz são utilizadas para melhorar a supressão de sinais de ruídos que estão presentes na faixa de baixas frequências.

A detecção de DP em altas frequências é menos susceptível a ruídos e pode ser utilizada para caracterizar os pulsos de DP que chegam ao sensor, de acordo com a forma do pulso e podendo discriminar entre diferentes fontes de DP, de acordo com a forma do sinal. No caso em que a frequência de corte superior do sistema de medição está bem acima da frequência de corte superior do pulso de DP que chega ao sensor, o pulso não mais será diretamente proporcional a carga aparente do pulso de DP.

Deste modo, os resultados das medições de DP em faixas de altas frequências são normalmente expressos em unidades de tensão, Volts (V) ou miliVolts (mV).

#### **4.1.3 Faixa de Frequências Muito Altas**

Essa faixa utiliza uma largura de banda típica de algumas centenas de MHz, para frequências de corte inferior ao valor utilizado é tipicamente 30 MHz e para frequência de corte superior até 300 MHz.

Como mostrado na Figura 4.1 a resposta em frequência de cada sistema mostra sobreposições acentuadas com a resposta em frequência do pulso original de DP, portanto, medições realizadas em faixas de frequências muito altas asseguram uma boa sensibilidade para os sinais originados próximos ao sensor de DP.

O sensor de DP deve ser instalado nos terminais de alta tensão e assim próximo as barras com maior estresse elétrico no enrolamento. A faixa de frequências muito altas também fornece uma boa relação sinal ruído e desta forma é menos susceptível a ruídos. Como a frequência de corte superior do sistema de medição está bem acima da frequência de corte superior do pulso de DP que chega ao sensor, o pulso não mais será diretamente proporcional à carga aparente do pulso de DP. Deste modo, os resultados das medições de DP em faixas de altas frequências são normalmente expressos em unidades de tensão, Volts (V) ou miliVolts (mV).

#### **4.1.4 Faixa de Frequências Ultra Altas**

Nesta faixa são utilizadas frequências de corte inferior de aproximadamente 300 MHz e frequências de corte superior de até 3 GHz. Os sensores de DP que trabalham nessa faixa de frequência são antenas que detectam os sinais dos pulsos irradiados eletromagneticamente. A energia dos sinais detectados por esses sensores assim como a sensibilidade da medição depende principalmente da localização da antena, a distância entre a antena e a fonte de DP e a largura de banda do sistema de medição.

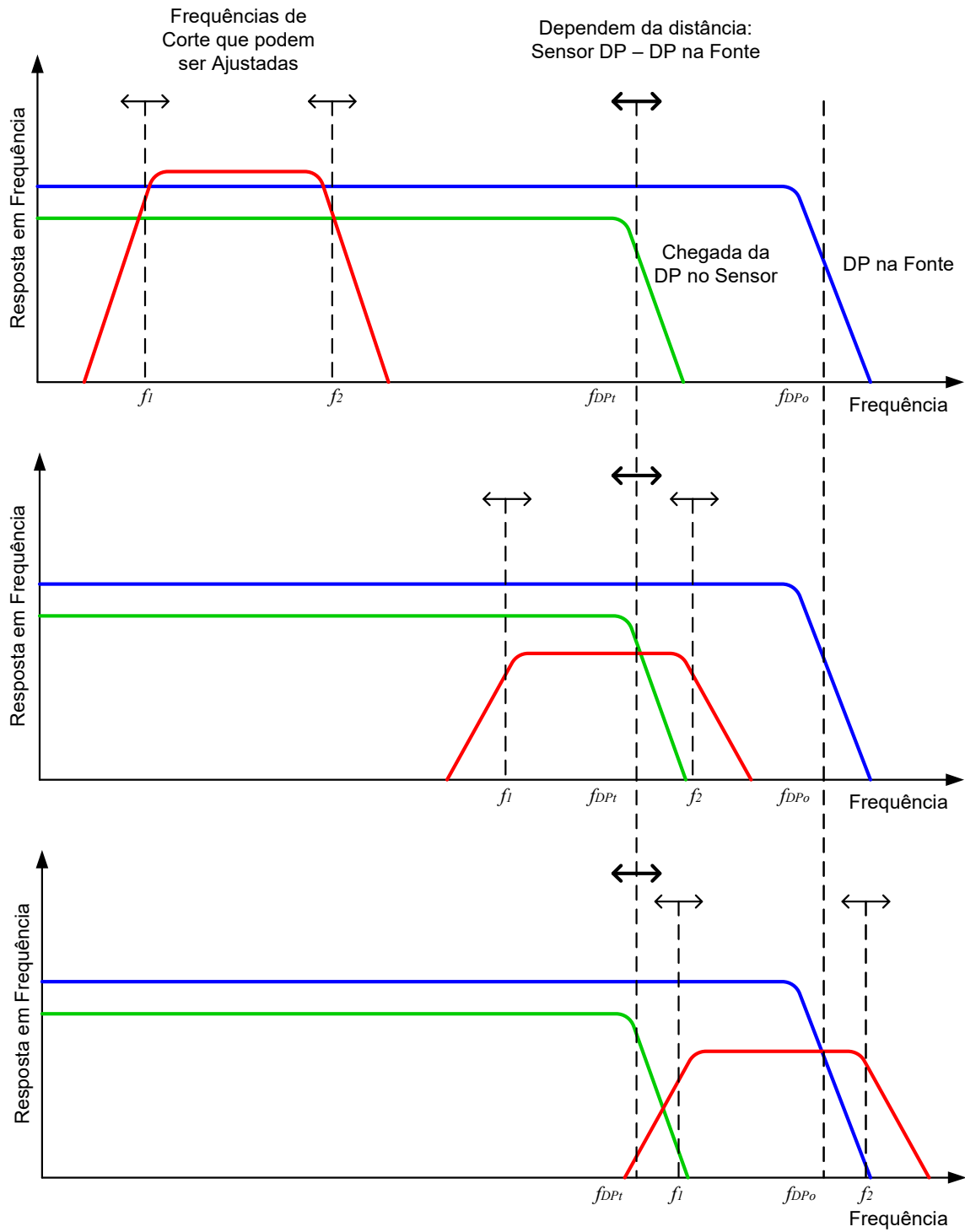


Figura 4.1 - Resposta em frequência de um pulso de DP na fonte e nos terminais da máquina; resposta em frequência para diferentes sistemas de medição: a) faixa de baixas frequências; b) faixa de altas frequências; c) faixa de frequências muito altas.

Fonte: Adaptado de [31].

## 4.2 ANTENAS

Segundo a norma internacional IEEE 145 de 2014 [54] que define os termos para as antenas, uma antena é definida como um dispositivo para radiação ou recepção de ondas de rádio. A Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), em sua Resolução de número 610 de 2013 [55] define antena, como um dispositivo para, em sistema de telecomunicações, radiar ou captar ondas eletromagnéticas no espaço. Pode incluir qualquer circuito que a ela esteja incorporado, o qual atribua ou interfira em suas características radiantes.

Em um sistema de transmissão existem basicamente três elementos: as antenas (receptora e emissora) e o meio em que se propagam as ondas [56]. Nas diversas aplicações dos sistemas típicos de comunicações por RF, a antena transmissora é a que necessita de mais energia, por isso seu projeto é mais crítico. O sinal emitido pela antena transmissora deve ter potência suficiente e estar bem orientado para que a antena receptora seja capaz de captar o sinal e se estabeleça uma correta comunicação [33].

Porém, quando são utilizadas antenas para medição de descargas parciais, deve-se estudar seu comportamento na recepção do sinal. Para isso, considera-se que as propriedades das antenas transmissoras e receptoras são as mesmas pelo princípio da reciprocidade [33]. Para que a antena receptora receba máxima potência radiada pela DP é necessário que os máximos dos diagramas de radiação tanto da emissão da DP como da recepção estejam alinhados. Isto é, a antena receptora deve ser orientada para fonte de emissão de DP para que a onda eletromagnética recebida gere a máxima tensão nos seus terminais e conseqüentemente é possível captar um maior valor de energia [33].

Para se conhecer o comportamento de uma antena deve-se definir o diagrama de radiação, a potência radiada, a intensidade de radiação, a diretividade, o ganho, largura de banda, largura de feixe, eficiência, polarização, impedância de entrada da antena e outros parâmetros adicionais. E finalmente, o conhecimento do parâmetro  $S_{11}$ , que será explicado mais adiante, permite conhecer a resposta em frequência da antena.

### 4.2.1 Classificação das Antenas

De acordo com [56], as antenas podem ser classificadas conforme o tipo de construção:

- a) Antenas Filamentares: há vários formatos dessas antenas como a de fio reto (dipolo), de quadro (tanto circular como quadrado) e helicoidal;
- b) Antenas de Abertura: podem ser do tipo corneta cônica ou piramidal e guias de onda;
- c) Antenas de Microfita: essas antenas consistem em uma linha de transmissão metálica colocada sobre um substrato aterrado;

- d) Conjuntos de Antenas: são compostas por vários elementos simples, através deste tipo de configuração, pode-se conseguir diversos tipos de antenas, a partir de conjuntos de dipolos, como as do tipo Yagi-Uda ou logaritmo-periódicas.
- e) Antenas Refletoras: como as parabólicas utilizadas para transmissão de sinais a longas distancias;
- f) Antenas-Lentes: São utilizadas para colimar (tornar paralelas) ondas incidentes divergentes, evitando que se espalhe em direções indesejadas.

### 4.3 PARÂMETROS FUNDAMENTAIS DE ANTENAS

#### 4.3.1 Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação de uma antena, ou simplesmente o diagrama da antena, é definido como uma função matemática ou representação gráfica das propriedades de radiação da antena em função de coordenadas espaciais [56]. Os diagramas de radiação podem ser classificados em isotrópicos, direcionais e omnidirecionais.

Um radiador isotrópico é definido como uma antena hipotética sem perdas que tem a mesma radiação em todas as direções. Uma antena direcional é aquela que tem a propriedade de radiar ou receber ondas mais eficientemente em algumas direções que outras. E uma antena omnidirecional é definida como aquela que tem o diagrama essencialmente não-direcional em um dado plano e um diagrama direcional em qualquer plano ortogonal, um diagrama omnidirecional é um tipo especial de diagrama direcional. As Figuras 4.2 (a), (b), (c).

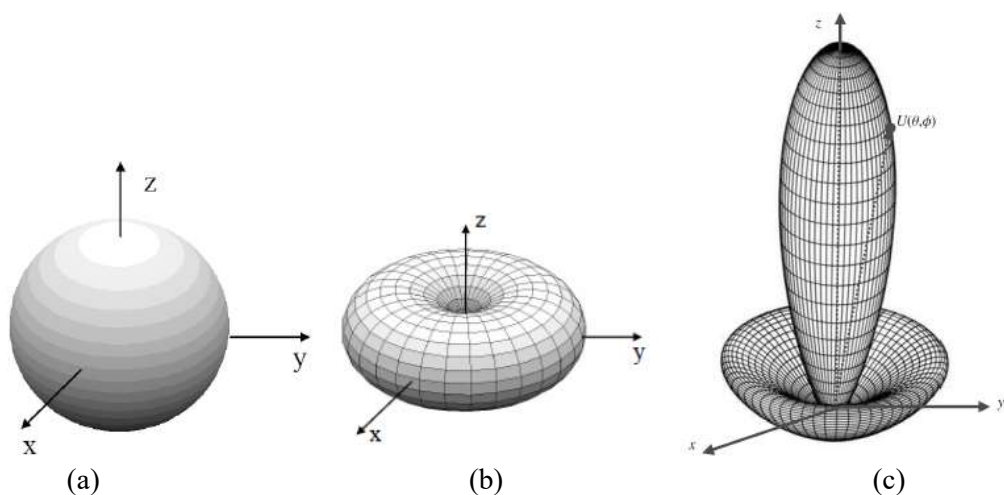


Figura 4.2 – Diagrama de radiação: (a) isotrópico; (b) omnidirecional; (c) direcional.

Fonte: Adaptado de [56].

### 4.3.2 Densidade de Potência Radiada

A quantidade usada para descrever a potência associada às ondas eletromagnéticas é o vetor de Poynting instantâneo,  $\vec{W}$  (W/m<sup>2</sup>), é definida como o produto vetorial entre a intensidade do campo elétrico instantâneo (V/m) e a intensidade de campo magnético instantâneo (A/m), matematicamente pode ser escrito segundo a Equação (4.1), a seguir.

$$\vec{W} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (4.1)$$

A potência media radiada (potência radiada),  $P_{rad}$ , pode ser escrita segundo a Equação (4.2).

$$P_{rad} = \oiint_S \vec{W}_{rad} \cdot d\vec{s} \quad (4.2)$$

Em que,  $\vec{W}_{rad} = \frac{1}{2} Re[\vec{E} \times \vec{H}^*]$ .

### 4.3.3 Intensidade de Radiação

A intensidade de radiação em uma dada direção é definida como “a potência radiada pela antena por unidade de ângulo sólido”. A intensidade de radiação ( $U$ ) é um parâmetro de campo distante e pode ser obtida pelo produto da densidade de radiação e o quadrado da distância, conforme a Equação 4.3.

$$U = r^2 W_{rad} \quad (4.3)$$

### 4.3.4 Diretividade

A diretividade de uma antena é definida como a razão entre a intensidade de radiação em uma dada direção e a intensidade de radiação média. Matematicamente pode ser escrita como a relação entre a intensidade de radiação de uma antena na direção do máximo valor do diagrama de radiação e a intensidade de radiação de uma antena isotrópica que radia com a mesma potência total, conforme Equação 4.4. Pode ser entendida como uma habilidade da antena em concentrar a potência radiada em uma determinada direção [33].

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_0} \quad (4.4)$$

Em que,  $D$  = diretividade (adimensional);

$U$  = intensidade de radiação (W/unidade de ângulo sólido);

$U_0$  = intensidade de radiação de uma fonte isotrópica (W/unidade de ângulo sólido);

$P_{rad}$  = potência radiada total (W);

### 4.3.5 Polarização

A polarização de uma onda radiada é definida como uma propriedade de uma onda eletromagnética que descreve a direção e amplitude, variantes no tempo, do vetor de campo elétrico. A polarização de uma antena em uma dada direção é definida como a polarização da onda transmitida (radiada) pela antena. Na prática, a polarização da energia radiada varia com a direção do centro da antena, de modo que partes do diagrama (lóbulos) podem ter polarizações diferentes.

### 4.3.6 Perda de Retorno

A perda retorno ou coeficiente de reflexão ( $\Gamma$ ) ou simplesmente parâmetro S11 é o parâmetro que descreve a porção do sinal que irá passar através da porta e a porção do sinal que será rejeitada (perda) quando a porta da antena é terminada em uma carga casada. Este parâmetro indica o grau de casamento atingido entre a antena e a linha de transmissão. A perda de retorno é expressa pela equação:

$$RL = -20 \log|\Gamma| \text{ (dB)} \quad (4.4)$$

### 4.3.7 Regiões de Campo Próximo e Distante

De acordo com [56], o espaço que envolve uma antena é usualmente subdividido em três regiões: (a) região de campo próximo reativo, (b) região de campo próximo radiante (região de Fresnel) e (c) região de campo distante (região de Fraunhofer), como ilustrado na Figura 4.3. As fronteiras que separam as três regiões não são únicas, e diversos critérios foram estabelecidos, e são comumente utilizados, para identificá-las. Na prática, a medida dos sinais em RF são realizados no campo distante, para que todas as características da antena sejam conhecidas [33].

A região de campo próximo reativo é definida como a “porção da região de campo próximo imediatamente ao redor da antena, onde predomina o campo reativo”. Para a maioria das antenas, a fronteira externa desta região é geralmente estabelecida à distância  $R < 0,62\sqrt{D^3/\lambda}$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda e D é a maior dimensão da antena. Para um dipolo muito curto ou elemento radiador equivalente, a fronteira externa é comumente estabelecida à distância de  $\lambda/2\pi$  da superfície da antena.

A região de campo próximo radiante (região de Fresnel) é definida como a região de campo de uma antena entre a região de campo próximo reativo e a região de campo distante, na qual predomina o campo radiante e a distribuição angular dos campos depende da distância da antena. A fronteira interna desta região é a distância  $R \geq 0,62\sqrt{D^3/\lambda}$ , e a fronteira externa é a distância  $R < 2D^2/\lambda$ .

A região de campo distante (região de Fraunhofer) é definida como a região de campo de uma antena onde a distribuição angular dos campos independe da distância à antena. A região de campo

distante é geralmente estabelecida para distância maiores que  $2D^2/\lambda$  da antena. Na região de campo distante o diagrama de radiação está bem definido, consistindo de uns tanto lóbulos secundários e um ou mais lóbulos primários.

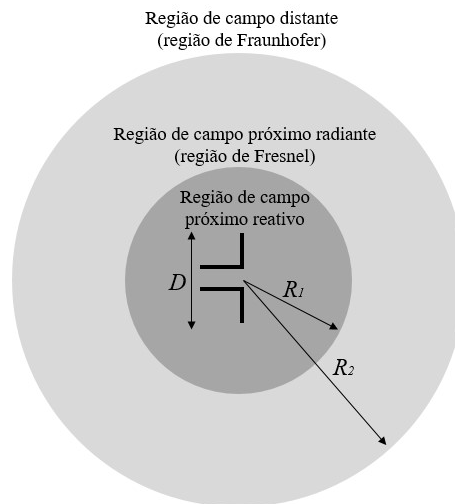


Figura 4.3 – Regiões de campo de uma antena.  
Fonte: Adaptado de [56].

#### 4.4 SENSORES DE DESCARGAS PARCIAIS

A princípio as descargas parciais podem ser detectadas através de pulsos conduzidos ou irradiados eletromagneticamente. Os sensores que detectam sinais de pulsos conduzidos consistem tipicamente de capacitores de alta tensão acoplados em séries com dispositivos de baixa tensão, esse arranjo é conhecido na literatura como acoplamento capacitivo. Já os sensores que detectam sinais de pulsos irradiados eletromagneticamente são tipicamente antenas que apresentam uma sensibilidade significativa dependendo do local em que estão instaladas e de sua específica função de resposta em frequência.

##### 4.4.1 Acoplador na Ranhura do Estator (*Stator Slot Coupler - SSC*)

O SSC é, essencialmente, um acoplador direcional e, de acordo com a norma [32], trabalha na faixa de frequência de 30 MHz até 1 GHz. A norma [31] salienta que o SSC deve ser instalado o mais próximo possível da região do enrolamento que está mais sujeita a atividade de DP.

O SSC consiste de um plano de terra e uma linha sensora com cabos coaxiais em cada extremidade da saída, como ilustrado na Figura 4.4. Assim, toda a vez que uma onda eletromagnética, como um pulso de DP, se propagar ao longo do SSC, próximo à linha sensora, ele produzirá um pulso de saída em cada extremidade.



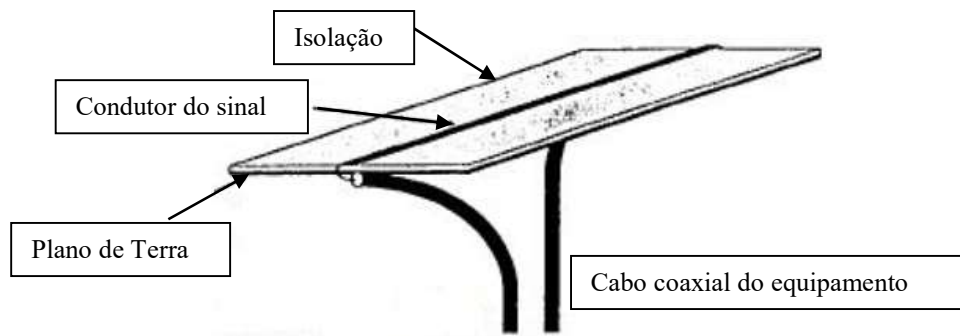


Figura 4.4 – Esquema simplificado do SSC.  
Fonte: Adaptado de [54].

A impedância característica do SSC é, geralmente de  $50 \Omega$ , casando com a impedância dos cabos coaxiais de saída padrão utilizados em medidores. A presença das duas saídas permite determinar a direção de propagação do pulso de DP e, talvez, sua localização. Isso é possível usando uma instrumentação capaz de medir em qual extremidade do SSC é detectado o primeiro sinal.

De acordo com [57] a principal vantagem do SSC é a sua habilidade em produzir pulsos de respostas significativamente diferente para as DP e para o ruído elétrico, permitindo a rejeição desse ruído. Isso se deve aos efeitos naturais de filtragem do enrolamento do estator, em que todos os pulsos que não são originados por DP têm uma largura que excede 20 ns, conforme descrito na norma [32]. Logo, os ruídos mais comuns criam pulsos de tensão com duração relativamente longa quando comparados com os sinais de DP.

#### 4.4.2 Acoplador Direcional de Microfita

Foi desenvolvido um novo modelo, baseado no SSC, com alimentação perpendicular e com um dielétrico de permissividade relativa de 4.4. O acoplador apresenta dimensão de  $250 \times 20 \text{ mm}^2$  com espessura de 1.5 mm. A largura da linha de alimentação é de 3 mm para fornecer o casamento de 50 Ohms, Figuras 4.5 e 4.6.

Os resultados medidos de perdas de retorno estão de acordo com a simulação como ilustrado na Figura 4.7, observa-se que o acoplador desenvolvido apresenta uma excelente resposta (inferior a -10 dB) em toda a faixa de frequência medida (0-2000 MHz).

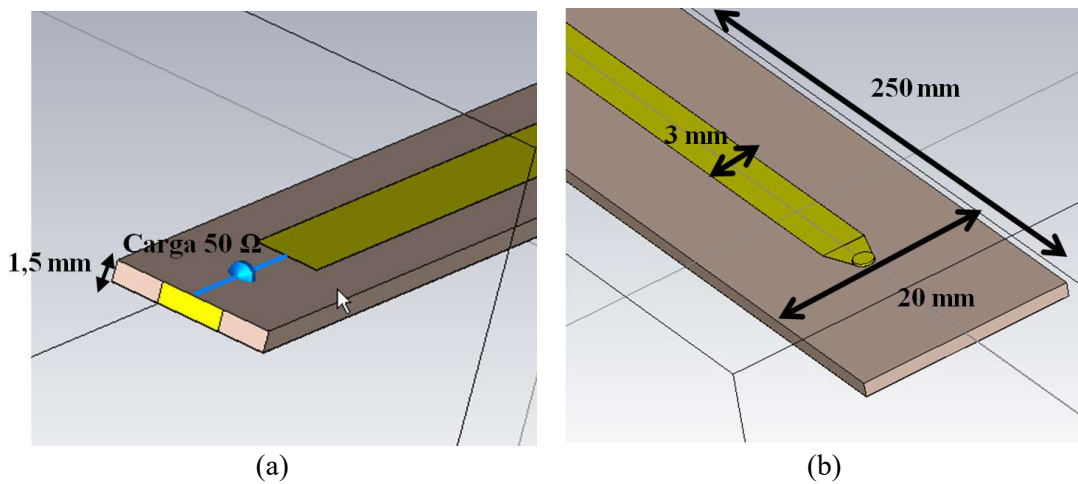


Figura 4.5– Acoplador de microfita simulado.



Figura 4.6 – Protótipo do acoplador de microfita fabricado.

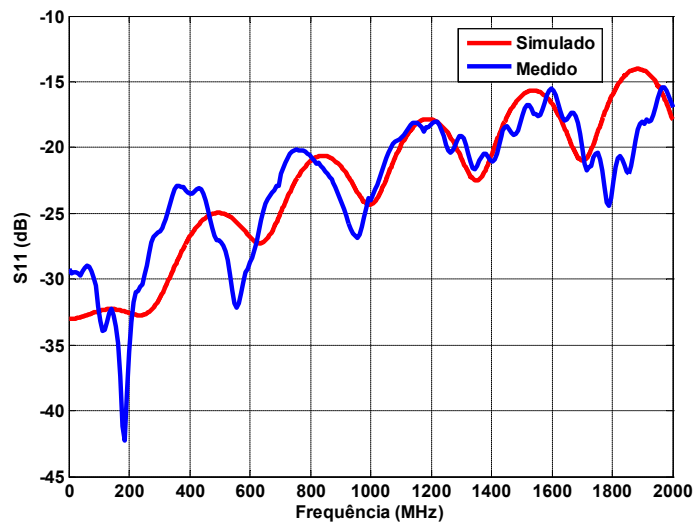
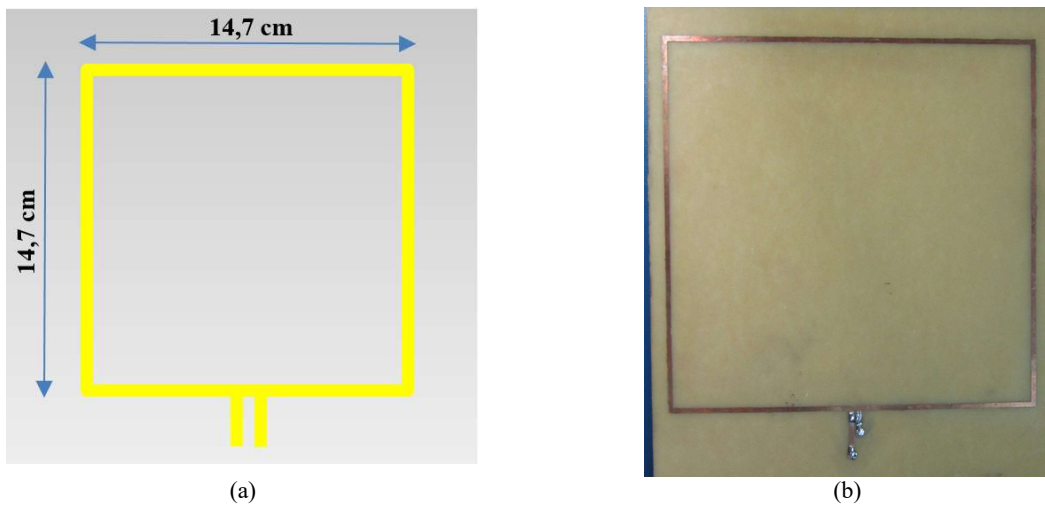


Figura 4.7 – Perdas de retorno ( $S_{11}$ ) simulada e medida do acoplador direcional de microfita.

### 4.4.3 Antena Loop

Antenas loop têm sido utilizadas para a detecção de DP, conforme os trabalhos [58, 59]. Neste sentido uma antena loop foi desenvolvida, podendo ser utilizado em contato com a barra como acoplador ou à distância como antena, as dimensões da antena são apresentadas na Figura 4.9 (a) e a Figura 4.9 (b) apresenta o protótipo fabricado. A medição da perda de retorno, Figura 4.10, mostrou que antena loop apresenta boa resposta para frequência abaixo de 800 MHz. O diagrama de radiação para 300 MHz é apresentado na Figura 4.11, onde pode-se observar a direcionalidade da antena.



(a) (b)  
 Figura 4.8 – Antena loop. (a) Simulada; (b) Protótipo fabricado.

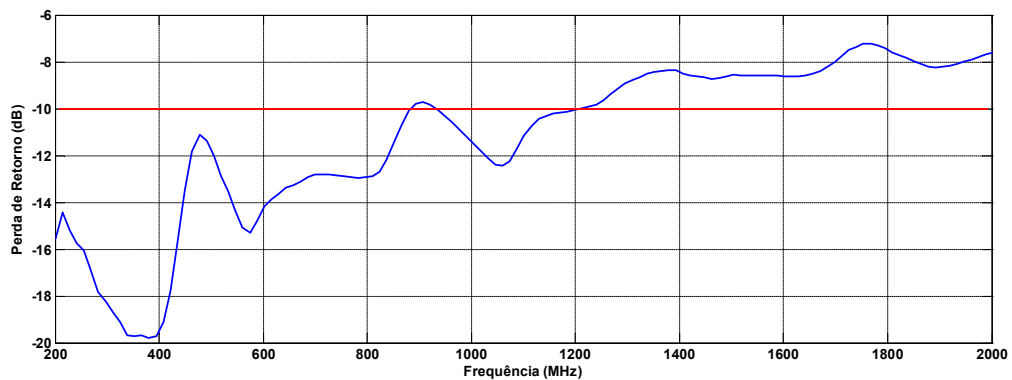


Figura 4.9 – Perda de retorno medida para antena loop.

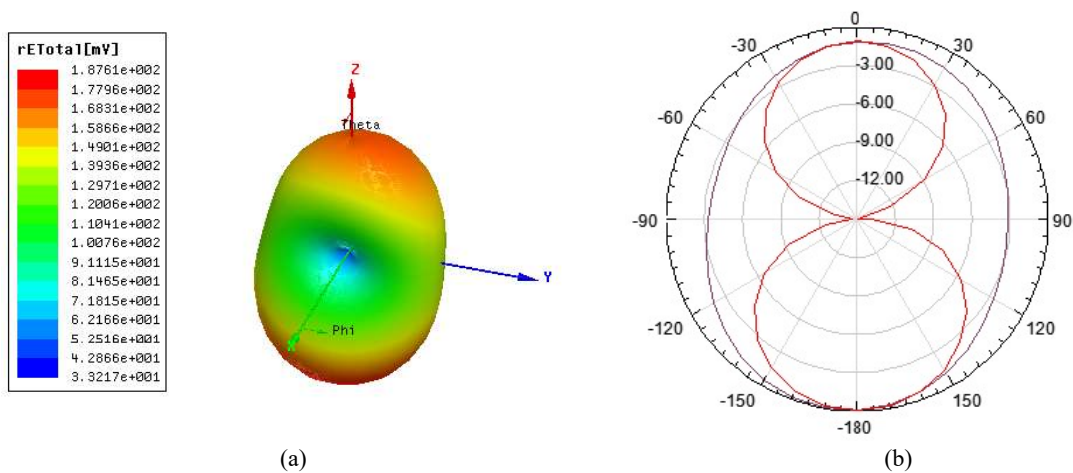


Figura 4.10 – Diagrama de radiação 300 MHz antena loop para 300 MHz.

#### 4.4.4 Antena Log-Periódica

Com o objetivo de realizar comparações entre as medições realizadas pelo acoplador direcional e a antena loop, foi utilizada uma terceira antena comercial do tipo log-periódica, apresentada na Figura 4.11, as características da antena são apresentadas na Tabela 4.1. Segundo [60, 61], antenas log-periódicas podem ser utilizadas para detecção de descargas parciais. O resultado da medição da perda de retorno é apresentado na Figura 4.12, observa-se que ela apresenta boa resposta (inferior a -10 dB) até 1300 MHz. O diagrama de radiação é apresentado na Figura 4.13, onde constata-se a direcionalidade da antena.

Tabela 4.1 – Especificações técnicas da antena log-periódica.

<b>Faixa de Frequência</b>	200-1300 MHz
<b>Polarização</b>	Linear
<b>Impedância de Entrada</b>	50 $\Omega$
<b>Dimensões</b>	765 mm $\times$ 120 mm $\times$ 710 mm

Fonte: Adaptado de [62]



Figura 4.11 – Antena log-periódica.

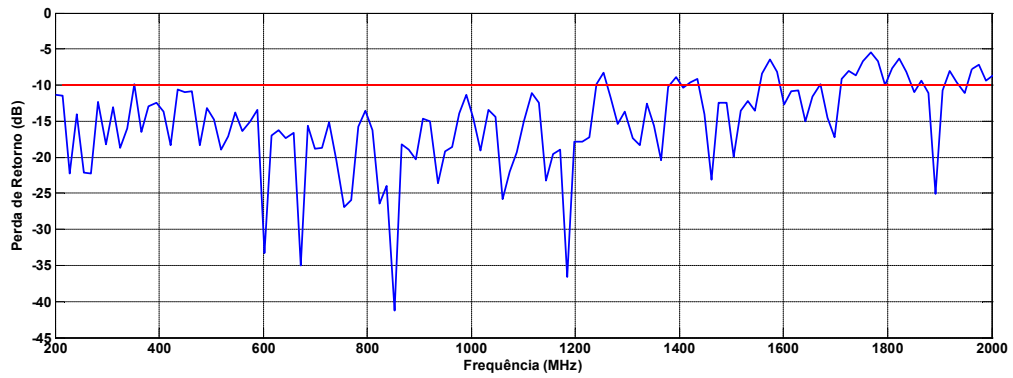


Figura 4.12 – Perda de retorno medida para antena log-periódica.

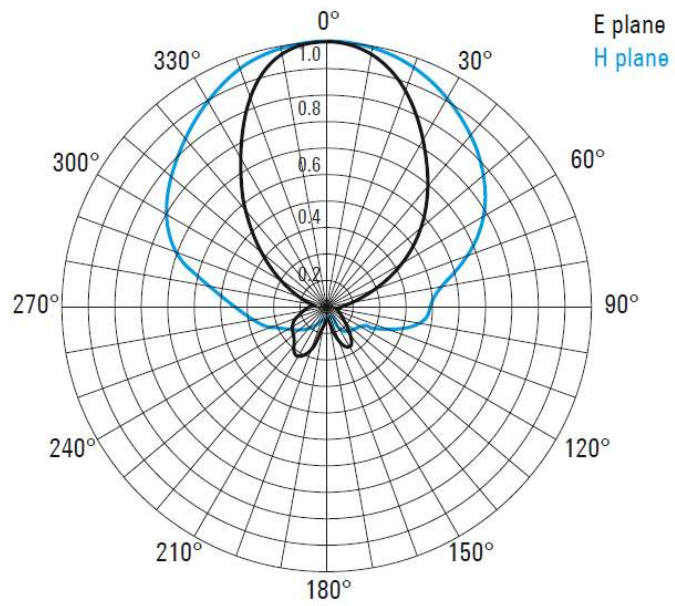


Figura 4.13 – Diagrama de radiação da antena log-periódica para 750 MHz.  
Fonte: Adaptado [62].

## 5 CAPÍTULO – ENSAIO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

O Ensaio de Envelhecimento Acelerado do inglês *Voltage Endurance Testing* (VET), normatizado pelas IEEE 1043-1996 [63] e IEEE 1553-2002 [64], tem como finalidade avaliar a expectativa de vida de barras ou bobinas estatóricas de máquinas elétricas rotativas.

A seguir, será apresentado um breve histórico sobre a origem do VET, o circuito de ensaio desenvolvido pelo Centro de Tecnologia da Eletronorte e por fim, serão apresentados os principais parâmetros utilizados para avaliar a degradação do isolamento elétrico das barras ou bobinas submetidas ao VET.

### 5.1 ORIGEM DO VET

Em meados da década de cinquenta, formou-se uma parceria entre o Subcomitê de Isolação de Máquinas Rotativas do Instituto Americano de Engenheiros Eletricista (AIEE) e a Divisão de Pesquisa da Hidrelétrica de Ontário (Ontario Hydro), para desenvolver uma metodologia de ensaio para avaliar o envelhecimento da isolação elétrica de barras e bobinas estatóricas, este trabalho contou com o apoio de vários fabricantes da época [65]. A partir desta associação, as indústrias de máquinas rotativas, para fins de estudos, começaram a fornecer amostras de seus produtos. Essas amostras eram tanto da linha de produção comum, quanto desenvolvidas com novos componentes e materiais que estavam em desenvolvimento na época [65].

Segundo [65] a maior causa da degradação da isolação elétrica das máquinas rotativas é a ação da ionização. Deterioração por ionização dentro da isolação principal faz com que o condutor comece a vibrar, causando delaminações e o descolamentos no material isolante. A deterioração por ionização é capaz de causar danos graves na isolação quando por motivos de movimento térmico, vibrações mecânicas ou deterioração térmica do isolamento, o material sofre algum tipo de afrouxamento ou descolamento. Porém, esses parâmetros de temperatura e vibração não têm sido classificados com problemas na isolação, e sim apenas depois da ação da ionização. A partir dessas informações, pode-se afirmar que existem dois parâmetros críticos para avaliação da degradação da isolação, que seriam o grau de ionização e a resistência dos materiais a ação da ionização.

O estresse por alta tensão é uma das principais formas de envelhecimento que conduz os enrolamentos do estator à falha a partir de ionizações e conseqüentemente descargas parciais no qual degradam a isolação [66]. Assim, o aumento da tensão aplicada na isolação principal irá reduzir o tempo até a falha se as DP estiverem presentes. Então o VET acelera o processo de envelhecimento da isolação pelo aumento de tensão aplicada, dessa forma uma falha que poderia levar anos ou décadas, o que é esperado para uma isolação com tensão em seus valores nominais, se dará no tempo de dias ou semanas,

o que é ideal para efeito de ensaios. Além disso, os níveis de tensão aplicada não devem ser tão altos, e também o processo do ensaio até a falha deve ser bem parecido com o que seria realizado em valores de tensões nominais, ou seja, a isolação que leva mais tempo a falhar no ensaio, será a que durará mais tempo em operação em condições nominais de operação. Em vez de os testes serem realizados em todas as amostras das bobinas ou barras, a tendência foi o uso de algumas amostras escolhidas aleatoriamente do mesmo lote de fabricação.

Nos primeiros testes realizados na Ontario Hydro foram utilizadas barras, que haviam sido inicialmente aquecidas, através de placas de aquecimento controladas por termostatos, até valores entre 90°C e 135°C. Em todos os testes, foram utilizadas as amostras barras de tensão nominal 13,8kV. A tensão aplicada de teste foi de 35kV a frequência de 60Hz, a Figura 5.1, a seguir, apresenta o primeiro registro fotográfico de um dos primeiros Ensaios de Envelhecimento Acelerado realizado na Ontario Hydro. Este teste foi usado pela Ontario Hydro com objetivo de avaliar a isolação elétrica dos principais fornecedores de bobinas e barras e também ter um controle de qualidade do lote fornecido. As empresas produtoras das bobinas ou barras teriam de produzir duas amostras extras para a avaliação perante o VET, pois elas seriam destruídas durante o ensaio [66].

A Ontario Hydro junto com vários fabricantes usou os resultados dos ensaios para melhorar o desenvolvimento de isolação elétrica dos enrolamentos estatóricos. Além disso, a realização do VET se mostrou eficiente para que a frequência de reparo dos enrolamentos devido ao envelhecimento diminuísse em relação a maioria dos hidrogeradores utilitários da América do Norte.

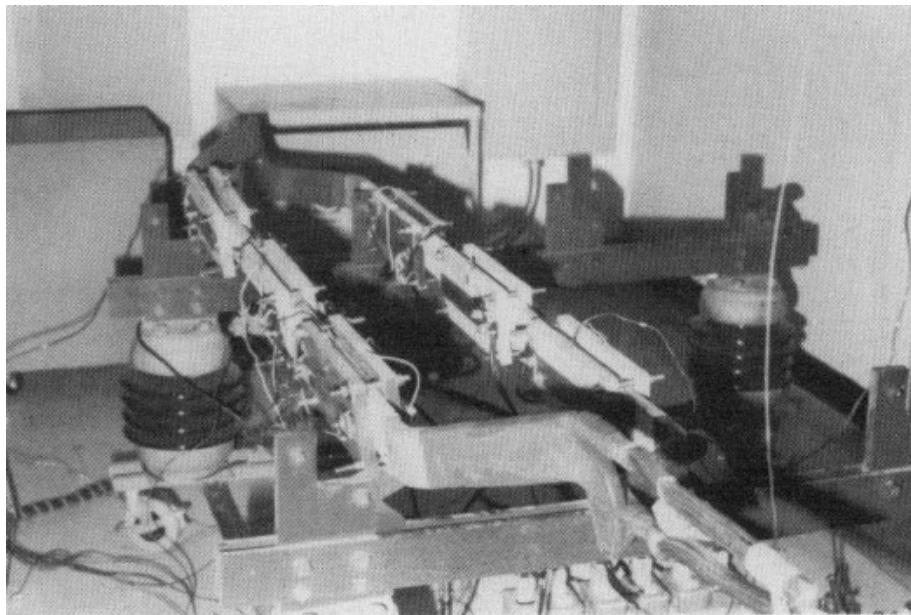


Figura 5.1 – Circuito de ensaio de envelhecimento acelerado utilizado pelo Ontario Hydro;  
Fonte: Adaptado de [65]

## 5.2 ENSAIO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

A norma IEEE 1043 [63] define a tensão de envelhecimento como sendo o tempo de falha da isolação principal quando submetida a um alto estresse elétrico (alta tensão). A alta tensão é aplicada entre o condutor de núcleo de cobre da barra ou bobina e a camada condutiva que envolve a parte reta da mesma, que deve ser aterrada, ressalta-se que esta tensão pode variar na faixa de  $\pm 1,5\%$ . Então, o campo elétrico formado na isolação principal é similar a situação real de operação do equipamento.

O estresse térmico é fornecido através de placas de aquecimento dispostas ao longo da barra/bobina, instaladas sobre a camada condutiva espaçadas de uma distância menor ou igual a 15 cm, por onde flui o calor para o interior da barra/bobina [67], como mostrado na Figura 5.2.

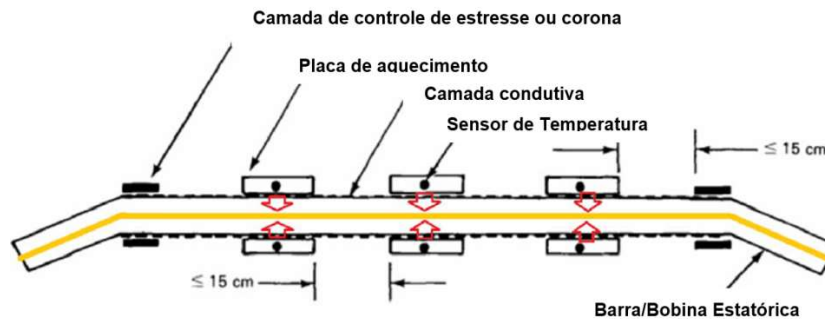


Figura 5.2 – Placas de aquecimento instaladas em uma barra estatórica.  
Fonte: Adaptado de [67].

A tensão de ensaio deve ser selecionada através de um dos dois critérios de ensaio apresentados na Tabela 5.1 adaptada de [64], que devem ser previamente acordados entre fabricante e comprador.

Tabela 5.1 – Tensões de ensaio para o VET.

Tensão Fase-Fase (kV)	Tensão Fase-Terra (kV)	Critério A	Critério B
		400 horas	250 horas
Tensão de Ensaio para o VET (kV)			
4,0	2,31	8,7	10,1
6,6	3,81	14,3	16,7
11,0	6,35	23,9	27,9
11,5	6,64	25,0	29,1
12,0	6,93	26,1	30,4
12,5	7,22	27,1	31,7
13,8	7,97	30,0	35,0
15,0	8,66	32,6	38,0
15,5	8,95	33,6	39,3
16,0	9,24	34,7	40,6
17,0	9,82	36,9	43,1
18,0	10,39	39,1	*
19,0	10,97	41,2	*
22,0	12,7	*	*

\*Estes valores devem ser acordados entre comprador e fabricante.

Fonte: Adaptado de [64].



### 5.3 ENSAIOS COMPLETARES AO VET

A Norma [64] recomenda a realização de quatro ensaios antes e após as amostras serem submetidas ao ensaio de envelhecimento acelerado, estes ensaios têm como objetivo avaliar comportamento de parâmetros da isolamento elétrica das barras ou bobinas estatóricas ao longo do VET, os ensaios recomendados são os seguintes:

- Medição de descargas parciais;
- Medição da resistência de isolamento em corrente contínua;
- Medição de capacitância;
- Medição de fator de perdas dielétricas (FP).

Será feita uma breve apresentação sobre medição de resistência de isolamento, capacitância e fator de perdas dielétricas, como a medição de descargas parciais foi amplamente abortada nos primeiros capítulos deste trabalho, este tema não será discutido nesta seção.

#### 5.3.1 Resistência de Isolamento em Corrente Contínua (CC)

Este ensaio mede a resistência do isolamento elétrico (RI) entre os condutores de cobre e o núcleo do estator ou do rotor. Idealmente, esta resistência deve ser infinita uma vez que, apesar de tudo, o objetivo do isolamento é de bloquear o fluxo de corrente entre o cobre e o núcleo. Na prática, a RI não é infinitamente alta, normalmente, quanto menor a resistência de isolamento, o mais provável é que existe um problema com o isolamento [40].

O índice de polarização IP é uma variação do ensaio de RI. O IP é a relação entre o RI medida após a tensão ter sido aplicada durante 10 minutos ( $R_{10}$ ) e RI medida após o primeiro minuto ( $R_1$ ), conforme apresentado na Equação 5.1. O índice IP pode mostrar se os enrolamentos estão contaminados ou com presença de umidade.

$$IP = \frac{R_{10}}{R_1} \quad (5.1)$$

No ensaio, uma tensão CC relativamente alta é aplicada entre o enrolamento de cobre e o estator. A corrente que flui no circuito, então, é medida. Através da Lei de Ohm, Equação 5.2, com o valor de tensão aplicada CC e o valor medido de corrente total circulando no circuito, obtêm-se o valor de resistência medido em t minutos:

$$R_t = \frac{V}{I_t} \quad (5.2)$$

Em que,  $I_t$ , de acordo com a IEEE 43 (2000) [68], é a soma de quatro diferentes correntes: de absorção ( $I_A$ ), capacitiva ( $I_C$ ), de condução ( $I_G$ ) e de fuga ( $I_L$ ). O comportamento dessas correntes na Figura 5.3.

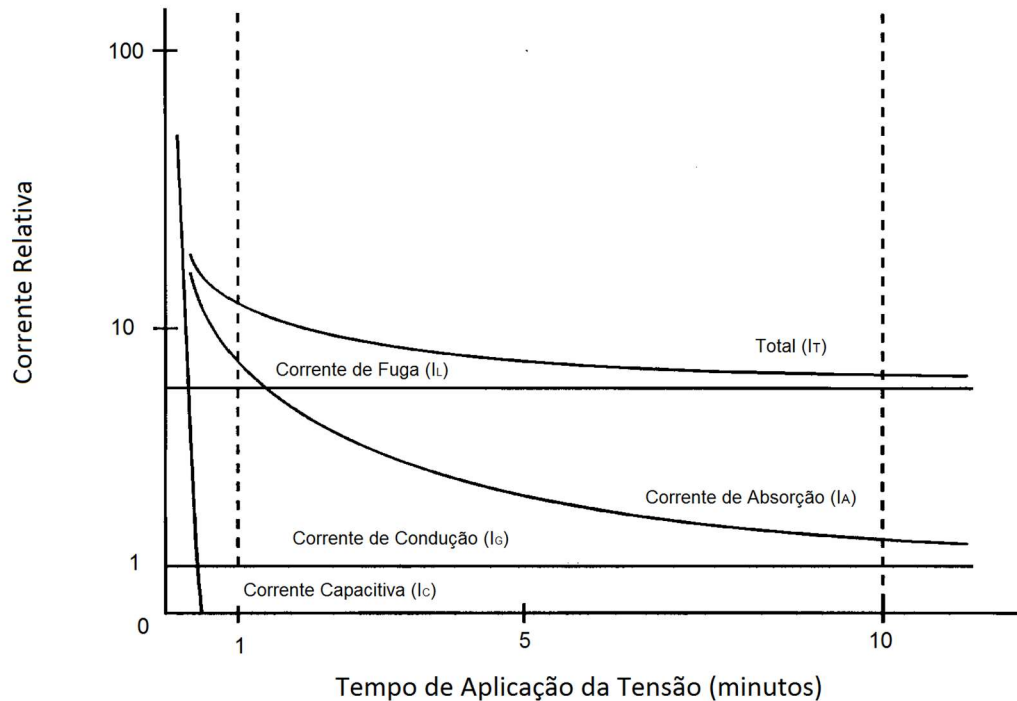


Figura 5.3 - Composição da corrente total.  
Fonte: Adaptado de [63].

A corrente de carga capacitiva ( $I_C$ ) é aquela que surge no instante inicial da energização e possui a mesma função que uma corrente de carga de um capacitor devido ao efeito capacitivo existente entre condutores ou entre condutor e a terra. Dependendo do tipo e da forma do material isolante. Nota-se, que ela assume o valor máximo quando da energização e decresce rapidamente a um valor desprezível depois que a isolação foi carregada eletricamente por completo [68].

A corrente de absorção ( $I_A$ ) é aquela responsável pela polarização dos dipolos elétricos que constituem a massa do dielétrico. Em equipamentos de baixa capacitância, a corrente é alta pelos primeiros segundos e decresce vagarosamente a quase zero. Ao ensaiar equipamentos de alta capacitância ou isolação com teor de umidade elevado e contaminada, não haverá decréscimo na corrente de absorção por um longo período [68].

A corrente de dispersão ou de fuga ( $I_L$ ), por meio do dielétrico, flui pela superfície e pelo interior da massa do dielétrico, entre condutores ou de um condutor para a terra e é de caráter irreversível. Constitui-se no componente mais importante na medição do ensaio de isolamento em corrente contínua quando se deseja avaliar o estado em que se encontra o isolamento. Tal corrente não varia com o tempo

de aplicação de tensão e, nestas condições, se houver alguma elevação de seu nível é indicativo que o isolamento pode vir a falhar [68].

A corrente de condução ( $I_G$ ) é uma corrente constante no tempo, que circula através da isolação principal para o condutor de alta tensão e que depende do tipo de material utilizado no sistema de isolação. Em sistemas de isolação de resina epóxi e mica é essencialmente zero [68].

### 5.3.2 Medição de Capacitância

Alguns processos de deterioração mudam a natureza da isolação do enrolamento. Se a bobina em questão sofre deterioração por sobreaquecimento, geralmente a isolação principal vai sofrer delaminações e de acordo com o material utilizado na confecção dessa isolação, ele pode deteriorar com o aparecimento de gases, geralmente ar. A constante dielétrica do ar é menor que a constante dielétrica dos materiais sólidos da isolação principal, e com a deterioração térmica a constante dielétrica da isolação total tenderá a diminuir, o resultado disso é o valor da capacitância diminuir de acordo com [40], e também de acordo com a Equação 5.3 abaixo.

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (5.3)$$

Da mesma forma, se a massa da isolação principal estiver saturada em água ou umidade a capacitância irá aumentar, pois partículas condutivas estarão depositadas ao longo da superfície da isolação melhorando a condução entre o núcleo e os condutores da bobina. Assim aumentando a área da superfície, teremos segundo a Equação 5.3 o aumento da capacitância.

Na produção de barras e bobinas geralmente medição de capacitância monitora a impregnação e o processo de cura. As resinas que compõem a isolação, quando estão no estado líquido têm uma alta constante dielétrica, assim a bobina terá um alto valor de capacitância. Com o processo de cura, a resina vai ganhando textura, impregnando-se nos materiais isolantes como mica e papel, e começa a mudar para o estado sólido, assim diminuindo os espaços vazios e diminuindo a constante dielétrica teremos a diminuição dos valores de capacitância da bobina.

### 5.3.3 Medição de Fator de Perdas Dielétricas

O fator de perdas, também conhecido como tangente  $\delta$  ( $\tan \delta$ ) fornece um indicador das perdas dielétricas na isolação. Esse indicador pode mostrar processos de deterioração, desde uma deterioração térmica até a absorção de umidade pela isolação. Assim, essa indicação de perdas dielétricas irá mostrar com o tempo problemas na isolação.

A  $\tan \delta$  é também um parâmetro que quantifica o fluxo de corrente resistiva (corrente de perdas) à frequência industrial que é drenado pelo dielétrico atuante como isolamento para as tensões elevadas,

isto é, a  $\tan\delta$  está diretamente associada com a qualidade do isolamento em uma determinada condição de uso. Uma boa característica isolante fornece baixos valores de perdas dielétricas. A corrente resistiva surge devido à condutividade residual do dielétrico, ao trabalho friccional feito pelos dipolos e íons (perda de polarização) ou perdas causadas por descargas parciais. Uma vez que os ensaios dielétricos podem também afetar as características isolantes, a medição da  $\tan\delta$  também é usada para avaliar a performance após os ensaios de solitação como o VET [47].

Como em condições normais de uso, os dielétricos sofrem um processo de degradação pequena e contínua ao longo de sua vida útil, as variações de  $\tan\delta$  são mais significativas após ensaios de longa duração nos equipamentos [47].

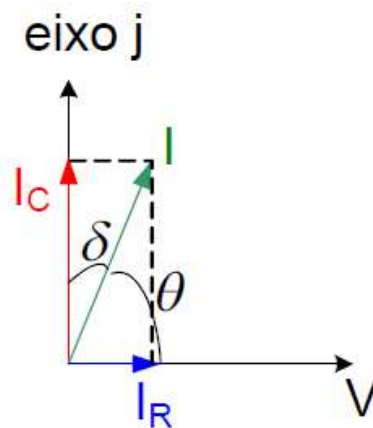


Figura 5.4 - Diagrama Vetorial e ângulo do fator de perdas ( $\delta$ )  
Fonte: [47]

O ângulo  $\delta$ , ou o valor de sua tangente ( $\tan\delta$ ), é um indicativo da energia dissipada na estrutura do dielétrico, caracterizando a qualidade de dielétrico como tal. O ângulo de perdas contém informações sobre as perdas por condução, polarização e ionização. Se as perdas dielétricas acima das admissíveis levam a um aquecimento do isolante, podendo atingir à sua destruição, uma vez que as propriedades isolantes são praticamente todas afetadas pela elevação de temperatura, e cada isolante tem, assim, uma temperatura limite, acima da qual o material não deve mais ser utilizado até os valores plenos das suas características [47].

As medições de fator de perdas são geralmente feitas juntamente com os testes de capacitância, e podem ser feitos diagnósticos com base na análise dos dois parâmetros. No caso de a capacitância e o fator de perdas  $\tan\delta$  aumentarem, temos um indicativo de contaminação por umidade, já se a capacitância diminuir e o fator de perdas aumentar têm-se um indicativo de deterioração térmica. Apenas com a medição de fator de perdas, com o aumento significativo ao longo da vida útil da isolação, temos apenas um indicativo de envelhecimento ou de contaminação.

O teste de fator de perdas é também geralmente usado na fabricação de bobinas e barras para monitoração do processo de impregnação das resinas, também chamado de cura. No processo de

fabricação, a isolação é submetida a procedimentos onde são aplicadas resinas líquidas, onde o fator de perdas das mesmas é bastante alto. Com o processo de cura ou impregnação das resinas na bobina, temos uma diminuição considerável do fator de perdas. O valor do fator de perdas da bobina já curada é menor do que com a bobina em processo de impregnação [40].

#### 5.4 SISTEMA VET DESENVOLVIDO PELA ELETRONORTE

Foi desenvolvido pelo Centro de Tecnologia da Eletronorte um sistema automático e com monitoramento *on-line* para realização do ensaio de envelhecimento acelerado que será descrito com maiores detalhes. A Figura 5.5, a seguir, apresenta o arranjo laboratorial desenvolvido com a indicação dos principais componentes do circuito de ensaio:

- Fonte de alta tensão;
- Placas de aquecimento;
- Sensores de temperatura;
- Bobinas de 6,9 kV que foram submetidas ao VET.

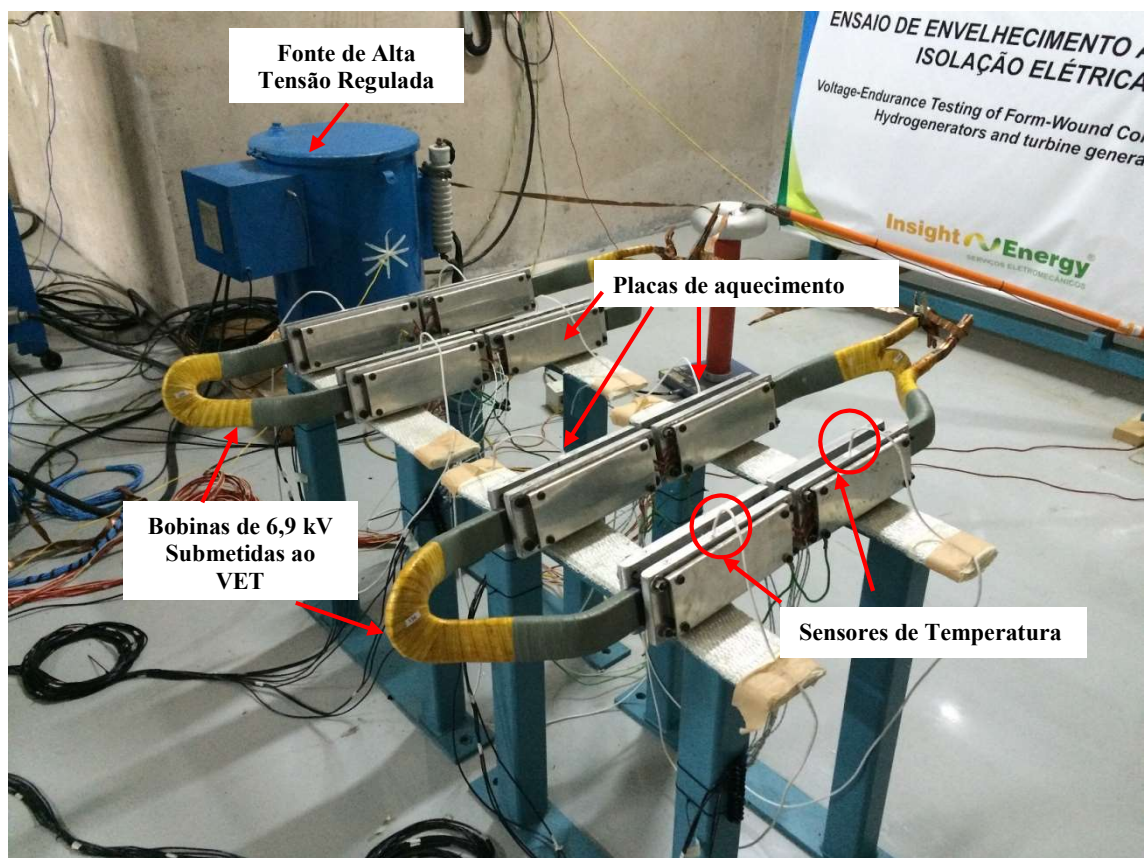


Figura 5.5 – Placas de aquecimento instaladas nas bobinas da CUUGH-02.  
Fonte: Próprio autor.

#### **5.4.1 Sistema de Controle da Temperatura**

De acordo com IEEE 1043 [63] se os testes forem realizados com temperaturas elevada, estas devem ser controladas para permanecerem numa faixa de  $\pm 2$  °C. Este controle é feito através de placas aquecidas que são fixadas na parte reta da bobina, região que fica fixada na ranhura. Recomenda-se que as placas sejam de pelo menos 1 cm de espessura para obter um bom contato térmico ao longo do comprimento das placas e para permitir que a medição de temperatura (ver Figura 5.2). Estas placas também fornecem a ligação ao aterramento.

O sistema de medição tem a seguinte configuração: Para cada par de placas tem-se um sensor pt100 com um controlador de temperatura, este retransmite o sinal de temperatura através de uma corrente (4 a 20 mA) para o sistema de aquisição de dados, que é monitorado pelo sistema descrito no próximo tópico.

#### **5.4.2 Sistema de Automação e Monitoração do VET**

A Figura 5.6 ilustra a estrutura utilizada na automação do ensaio que foi projetada de maneira a permitir a máxima utilização de recursos já disponíveis no Centro de Tecnologia, seja de equipamentos ou de softwares de desenvolvimento próprio, para execução do ensaio, devido ao seu longo tempo de execução (400 horas). O sistema de ensaio é composto por placas de aquecimento, relés de estado sólido, termopares, controladores de temperatura, relés de tensão, fonte de alta tensão de até 20 kV, divisor de tensão capacitivo para medição de tensão, osciloscópio digital, sistema de aquisição de dados de 60 canais que se comunicam por GPIB com o Software SIMME sigla para “Sistema de Monitoramento de Máquinas Elétricas”, de desenvolvimento próprio do Centro de Tecnologia e já utilizado para monitoramento de vibração de máquinas rotativas na Eletrobras Eletronorte.

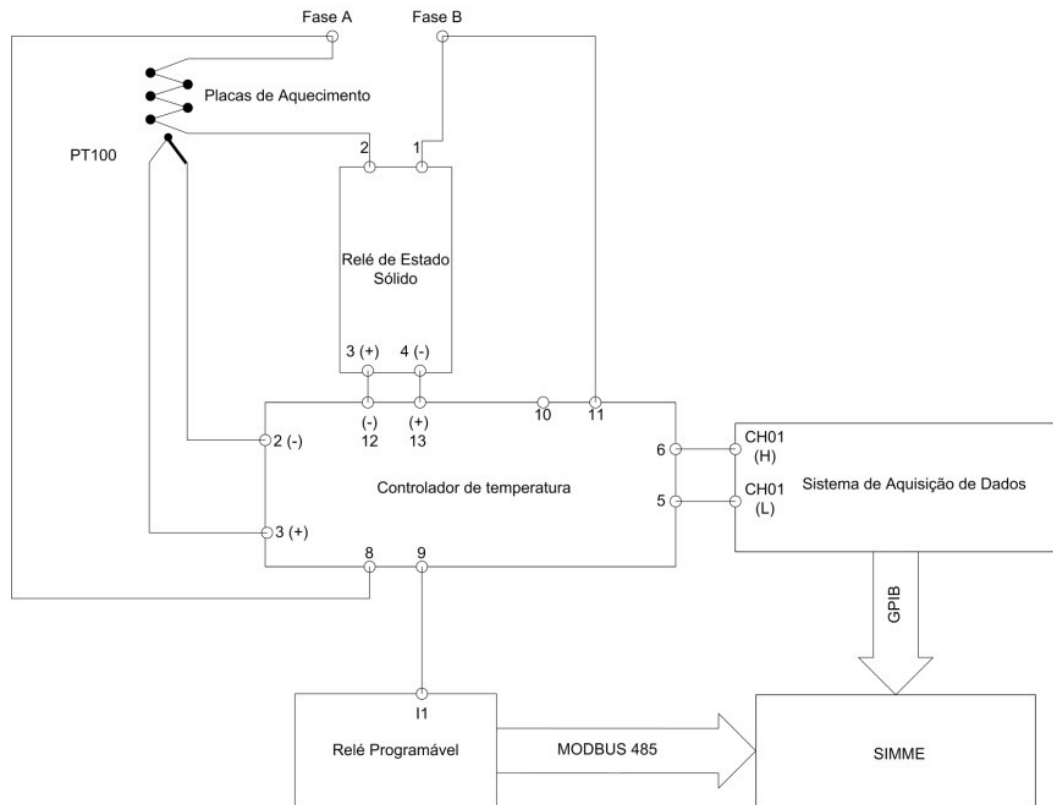


Figura 5.6 – Circuito para realização do ensaio de envelhecimento acelerado.  
Fonte: Adaptado de [62]

Para registro dos alarmes, e conseqüentemente automação da fonte de alta tensão, utilizou-se um relé programável que se comunica com o SIMME por protocolo Modbus 485, o que permite a interrupção do ensaio por temperatura fora de faixa e sobre tensões transitórias devido a falha na isolação.

O software SIMME, Figura 5.7, também foi utilizado como base de tempo única para o ensaio, como um concentrador e registrador de todos os dados de medição, para posterior avaliação, bem como um registrador de eventos, visando avaliar durante e ao final do ensaio quais eventos ocorreram, e se os mesmos podem ou não ter influência no resultado final do teste. Como exemplo destes eventos pode-se citar temperaturas fora da faixa especificada; picos de tensão; rompimento da isolação de determinada barra ou bobina; todos com registro do tempo de ensaio onde o evento ocorreu.

A Lógica de condição de execução de ensaio é realizada toda dentro do relé programável, que envia as informações por protocolo Modbus 485 para que o SIMME faça o registro dos dados e gere os devidos eventos para visualização posterior.

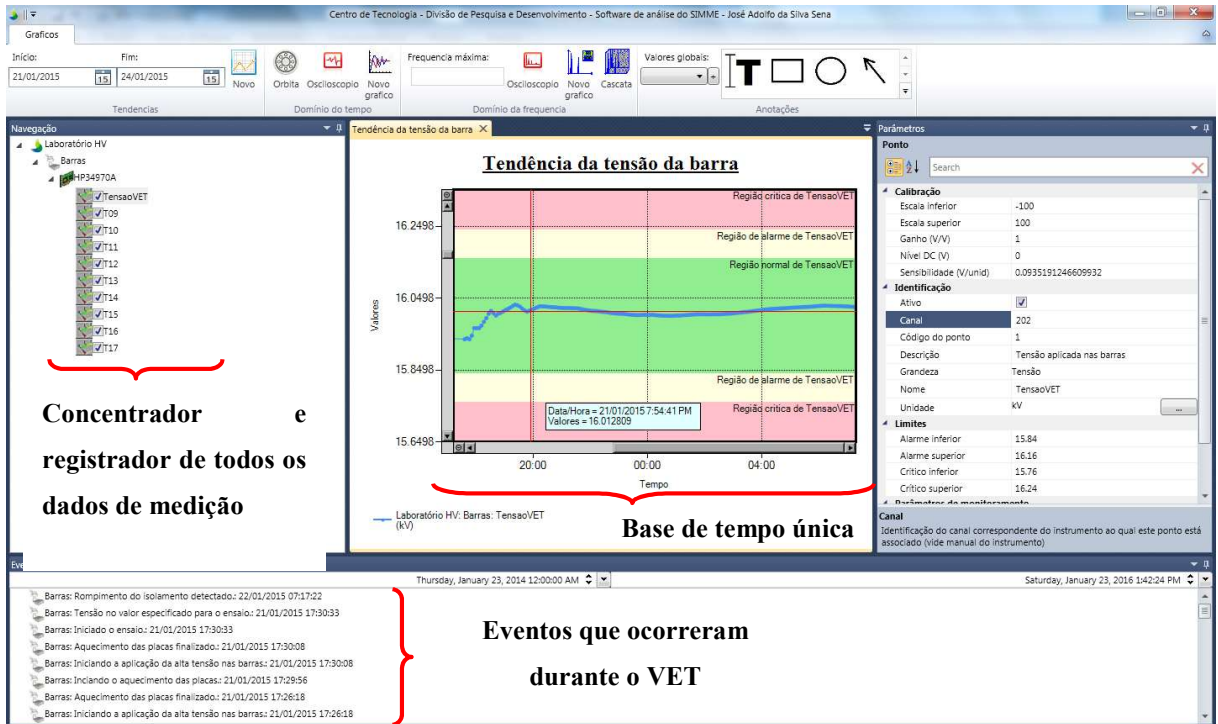


Figura 5.7 – Software SIMME com as principais indicações.

Fonte: Próprio autor.



## 6 CAPÍTULO – AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

### 6.1 OBJETOS DE ENSAIOS

#### 6.1.1 Classe Térmica de Isolação

A IEC 60085-2004 [69] define a classe térmica da isolação dos materiais utilizados nos sistemas de isolamento de acordo com a Tabela 6.1, a seguir. Neste trabalho foram utilizadas bobinas de classes térmicas B e F.

Tabela 6.1 – Classe Térmica Segundo IEC 60085-2004.

Classe Térmica	Temperatura (°C)
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	>180

#### 6.1.2 Bobina de 6,9 kV de Isolação Mica Asfáltica e Classe Térmica B

Os sistemas de isolação compostos por mica asfáltica foram utilizados até meados da década de 1970 [40], esta isolação era aplicada de forma contínua em toda a bobina, através de uma fita ou cinta de mica. Conforme a bobina era enrolada com a fita de mica se aplicava um verniz de asfalto, depois era submetida a um processo de impregnação através de vácuo e pressão. O maior problema deste sistema de isolação era sua fragilidade mecânica quando submetidos a estresses térmicos e de vibração [70]

Neste trabalho foram utilizadas duas bobinas de 6,9 kV com isolação de mica asfáltica e classe térmica B, que foram retiradas de uma unidade de geração hidráulica que estava em operação desde 1975. Estas bobinas foram submetidas ao ensaio de envelhecimento acelerado, a Figura 6.1, apresenta uma das bobinas preparada para ser ensaiada.



Figura 6.1 – Bobina de 6,9 kV e classe B.

### 6.1.3 Bobina de 6,9 kV de Isolação Mica Epóxi e Classe Térmica F

Os sistemas de isolação mica epóxi começaram a ser utilizados no mercado no final da década de 1970 [40], de forma similar a isolação composta de mica asfáltica, a isolação de mica epóxi é aplicada continuamente em toda a bobina. Primeiramente, a bobina é envolvida por camadas fita de mica, depois por uma camada de fita de fibra de vidro, após essa etapa é feita a pintura com tinta semicondutiva na reta da bobina (parte que fica presa na ranhura do estator), e finalmente é aplicada a resina epóxi na parte curva da bobina, por fim, a mesma é submetida a um processo de impregnação através de vácuo e pressão.

Após o processo de impregnação, a parte curva da bobina deve ser envolvida com fitas anticorona para suportar o estresse de tensão que ocorre na saída da ranhura do estator [71]. Figura 6.2, a seguir, ilustra todas as camadas de isolação da bobina e a Figura 6.3 apresenta uma das bobinas utilizadas nos testes deste trabalho.

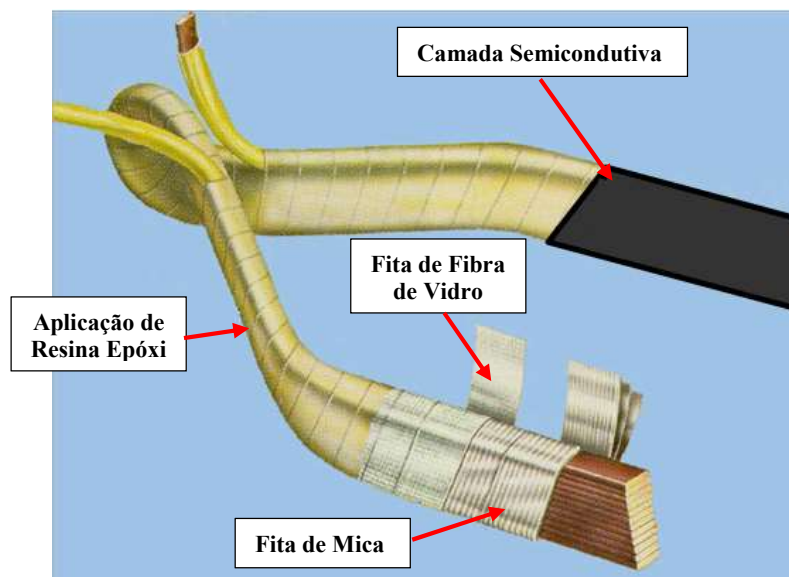


Figura 6.2  
Fonte: Adaptado de [72].



Figura 6.3 – Bobina 6,9 kV e classe F.

## 6.2 INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

### 6.2.1 Osciloscópio Digital

Foi utilizado um osciloscópio digital, modelo MDO 3104 de fabricação Tektronix, Figura 6.4, para visualização e aquisição dos sinais das DP no domínio do tempo. Este osciloscópio possui largura de banda de 1 GHz e taxa de amostragem de 5 GS/s. Cada sinal de DP foi registrado após o processamento da média de 128 amostras.



Figura 6.4 – Osciloscópio digital MDO 3104 Tektronix.

### 6.2.2 Sistemas de Medição de Descargas Parciais

Neste estudo foram utilizados dois sistemas de medição de descargas parciais, um comercial, o MPD 600 de fabricação da OMICRON, e o sistema IMA-DP autônomo desenvolvido através de Projeto Institucional entre Cepel e Eletronorte. O MPD 600 foi utilizado para medições utilizando o capacitor de acoplamento, de acordo com a IEC 60270 (2000) [05] e IEC 60034-27-1 (2006) [73], já o sistema IMA-DP foi utilizado tanto para as medições envolvendo o capacitor de acoplamento como para as medições com os sensores eletromagnéticos.

### 6.2.3 Sistema de Medição de Capacitância e Fator de Perdas Dielétricas

No ensaio de envelhecimento acelerado foram realizadas medições de capacitância e fator de perdas dielétricas antes e depois do ensaio, para medição desses parâmetros, conforme requisitos estabelecidos pela norma internacional IEEE 286 de 2000 [74], foi utilizada uma Ponte Schering de fabricação Tettex, modelo 2809 A, apresentada na Figura 6.5.



Figura 6.5 – Ponte Schering para medição de capacitância e perdas dielétricas.

#### 6.2.4 Sistema de Medição de Resistência de Isolamento

A resistência de isolamento foi medida antes, durante e após o ensaio de envelhecimento acelerado através do sistema de medição de fabricação Megger, modelo MIT 1025, apresentado na Figura 6.6.



Figura 6.6 – Medidor de resistência de isolamento.

## 6.3 CÁLCULO DAS REGIÕES DE CAMPO DISTANTE PARA AS ANTENAS

### 6.3.1 Antena Loop

Primeiramente, definiu-se a distância que antena loop deveria ficar posicionada em relação a fonte emissora de descargas parciais, para isso foi calculado o raio da região de campo distante (Região de Fraunhofer) para a frequência de ressonância no gráfico da perda de retorno, de acordo com Figura 6.7, essas frequências estão na faixa de 350-400 MHz. A Tabela 6.1, a seguir, apresenta os valores calculados para a região de campo distante, onde,  $c$  é a velocidade da luz,  $3 \times 10^8$  m/s, e  $D$  é a maior dimensão da antena, como todos os lados tem comprimento  $l=14,7$  cm, logo  $D$  é a diagonal da antena, ou seja,  $D = 14,7\sqrt{2} = 20,78$  cm.

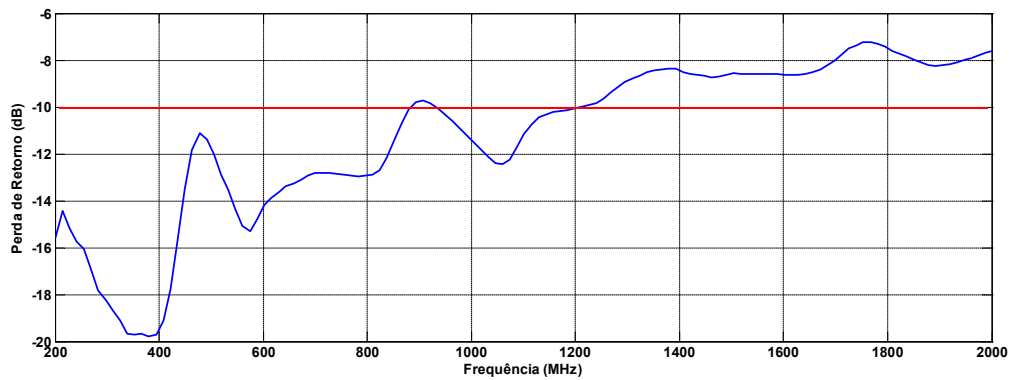


Figura 6.7 – Perda de retorno simulada para antena loop.

Tabela 6.2 – Raio da região de campo distante para antena loop.

Frequência (MHz)	Comprimento de Onda $\lambda$ (m) $\lambda = \frac{c}{f}$	Região de Campo Distante (Região de Fraunhofer) $R > 2D^2/\lambda$ (cm)
350	0,85	10,08
400	0,75	11,52

O valor de 11,52 cm, calculado na Tabela 6.2, representa a distância mínima que a antena deve ser posicionada em relação a fonte de emissão de descargas parciais para que a mesma possa estar na região de campo distante. E associada a uma margem de segurança para aplicação de alta tensão, definiu-se a distância de 30 cm para o posicionamento da antena em relação ao objeto de ensaio durante os experimentos, conforme Figura 6.8.

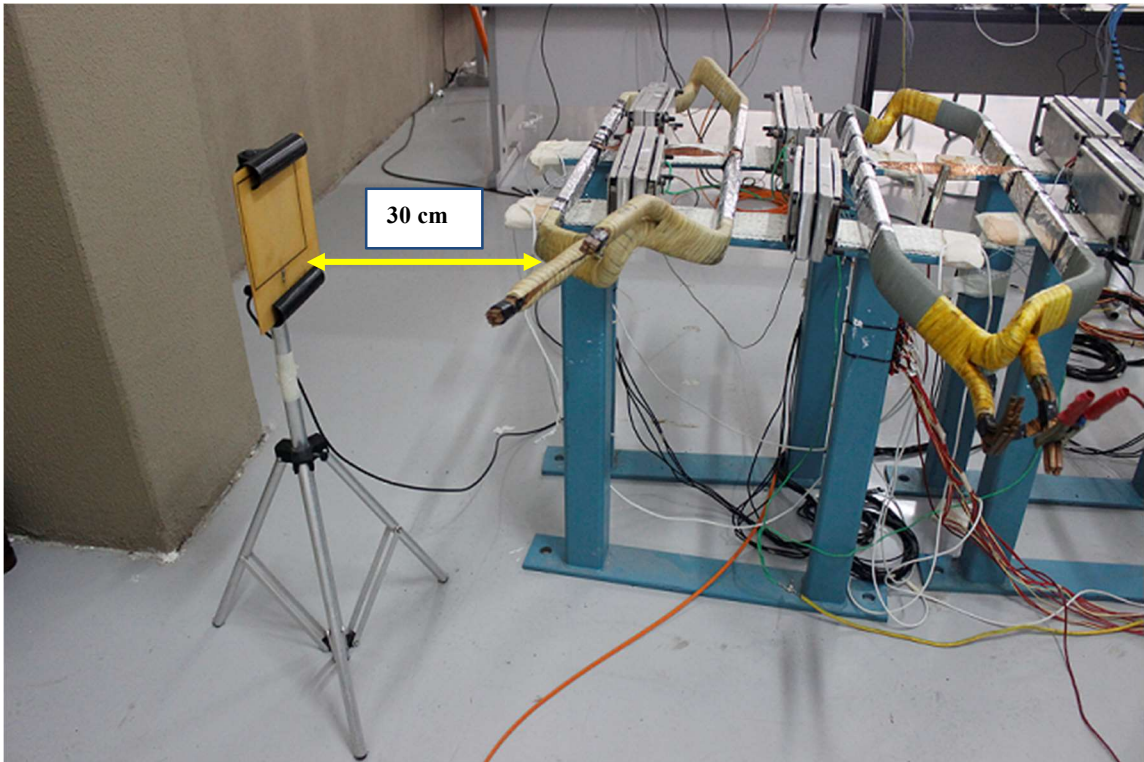


Figura 6.8 – Antena loop posicionada para medição de descargas parciais.

Foi realizada uma análise dos sinais medidos pela antena loop quando se variava a distância da mesma em relação a fonte de emissão de descargas parciais. Foram realizadas medições em quatro pontos, nas distâncias de 15, 30, 60 e 100 cm, os resultados são apresentados nas Figuras 6.9 e 6.10, observa-se que os sinais sofrem forte atenuação para distâncias superiores a 60 cm, já os gráficos do espectro de frequência não mostraram mudança significativa com aumento da distância, conforme Figura 6.11.

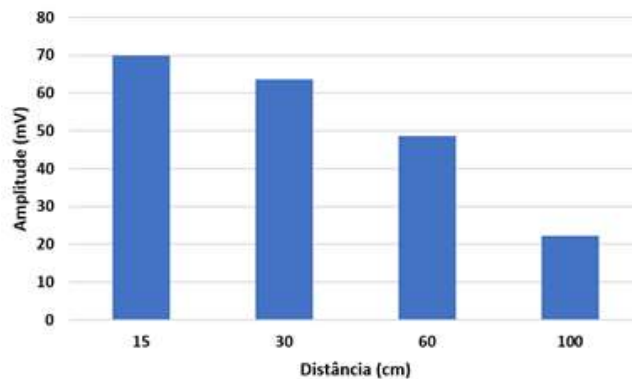


Figura 6.9 – Atenuação dos sinais medidos pela antena loop em diferentes posições.

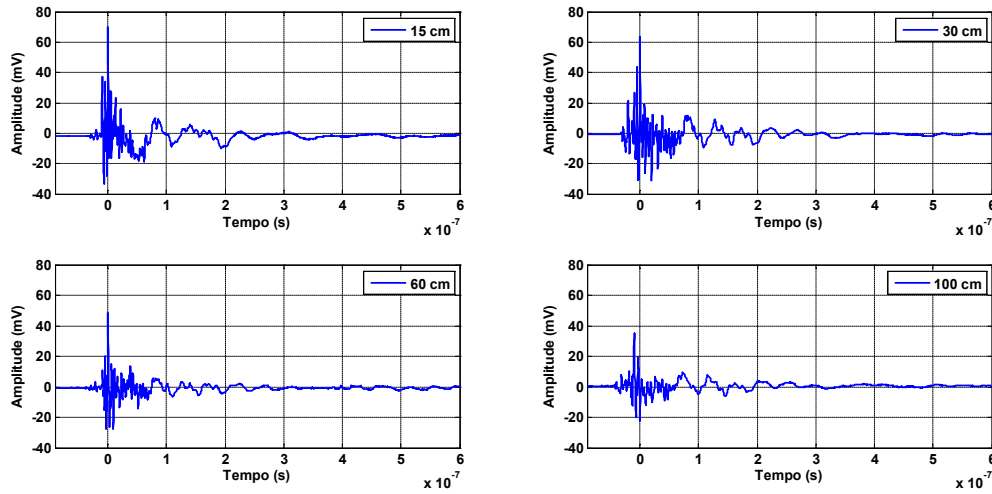


Figura 6.10 – Sinais no domínio do tempo registrados pela antena loop em diferentes posições.

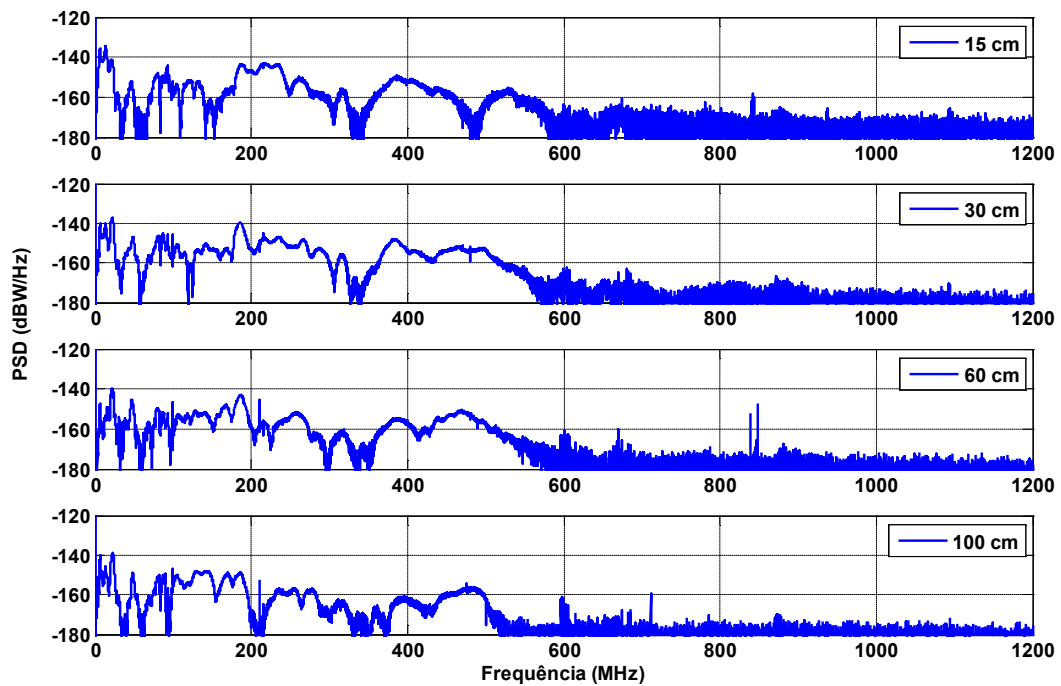


Figura 6.11 – Espectro de frequência dos sinais medidos pela antena loop em diferentes posições.

### 6.3.2 Antena Log-Periódica

Foi definida a distância que a antena log-periódica deveria ficar posicionada em relação a fonte emissora de descargas parciais, para isso foi calculado o raio da região de campo distante (Região de Fraunhofer) para algumas frequências do gráfico da perda de retorno, de acordo com Figura 6.12, essas frequências são 400, 500, 600 e 750 MHz.

A Tabela 6.3, a seguir, apresenta os valores calculados para a região de campo distante, onde,  $c$  é a velocidade da luz,  $3 \times 10^8$  m/s, e  $D$  é a maior dimensão da antena, para a antena log-periódica 76,5

cm. Como a máxima distância entre a antena log-periódica e fonte emissora de DP disponível no laboratório era de 1,70 m, esta foi definida como o raio da região de campo distante para esta antena, a Figura 6.13 apresenta a antena posicionada para medição de descargas parciais.

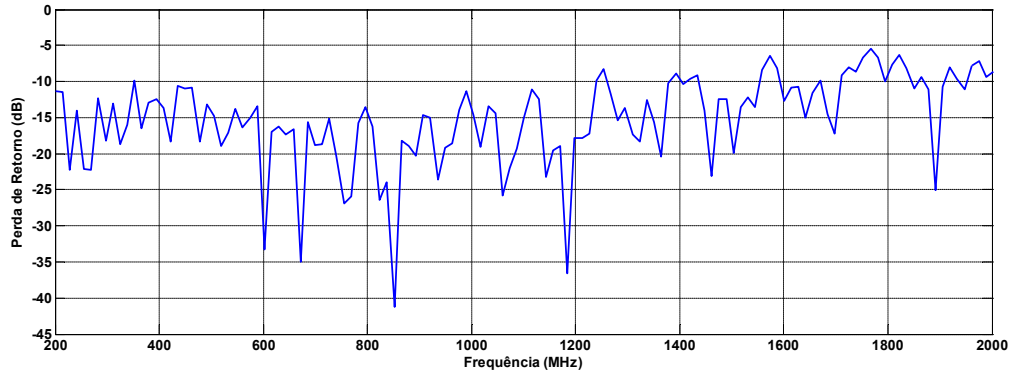


Figura 6.12 – Perda de retorno medida para antena log-periódica.

Tabela 6.3 - Raio da região de campo distante para antena log-periódica.

Frequência (MHz)	Comprimento de Onda $\lambda$ (m) $\lambda = \frac{c}{f}$	Região de Campo Distante (Região de Fraunhofer) $R > 2D^2/\lambda$ (m)
400	0,75	1,56
500	0,60	1,95
600	0,50	2,34
750	0,40	2,92

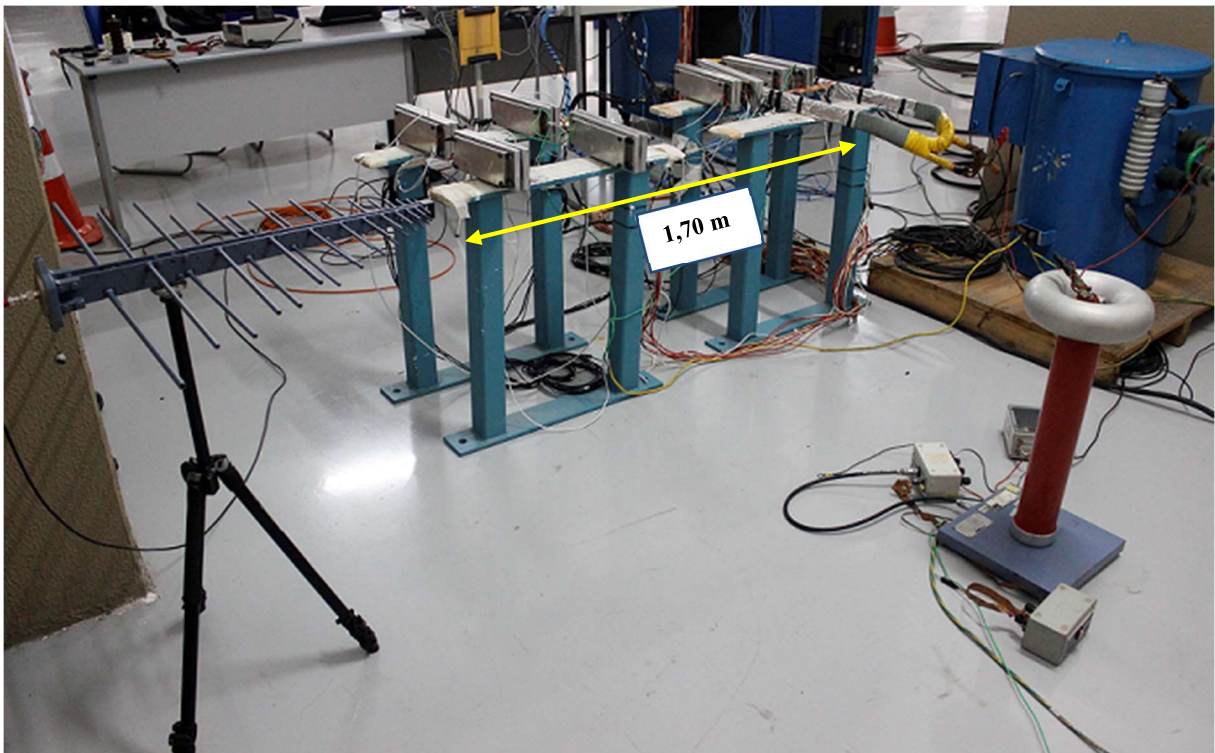


Figura 6.13 – Antena log-periódica posicionada para medição de descargas parciais.



## 6.4 CARACTERIZAÇÃO DE DIFERENTES FONTES DESCARGAS ATRAVÉS DOS SENSORES ELETROMAGNÉTICOS

As diferentes fontes de atividade das descargas parciais que ocorrem em hidrogeradores foram simuladas em laboratório sob condições bem controladas. Cada fonte foi avaliada individualmente e seu PRPD foi registrado através do sistema MPD 600, os sinais de DP medidos pelo acoplador direcional e antena loop foram registrados através do osciloscópio digital MDO 3104. A Figura 6.14, apresenta o layout montado em laboratório para a realização dos experimentos.

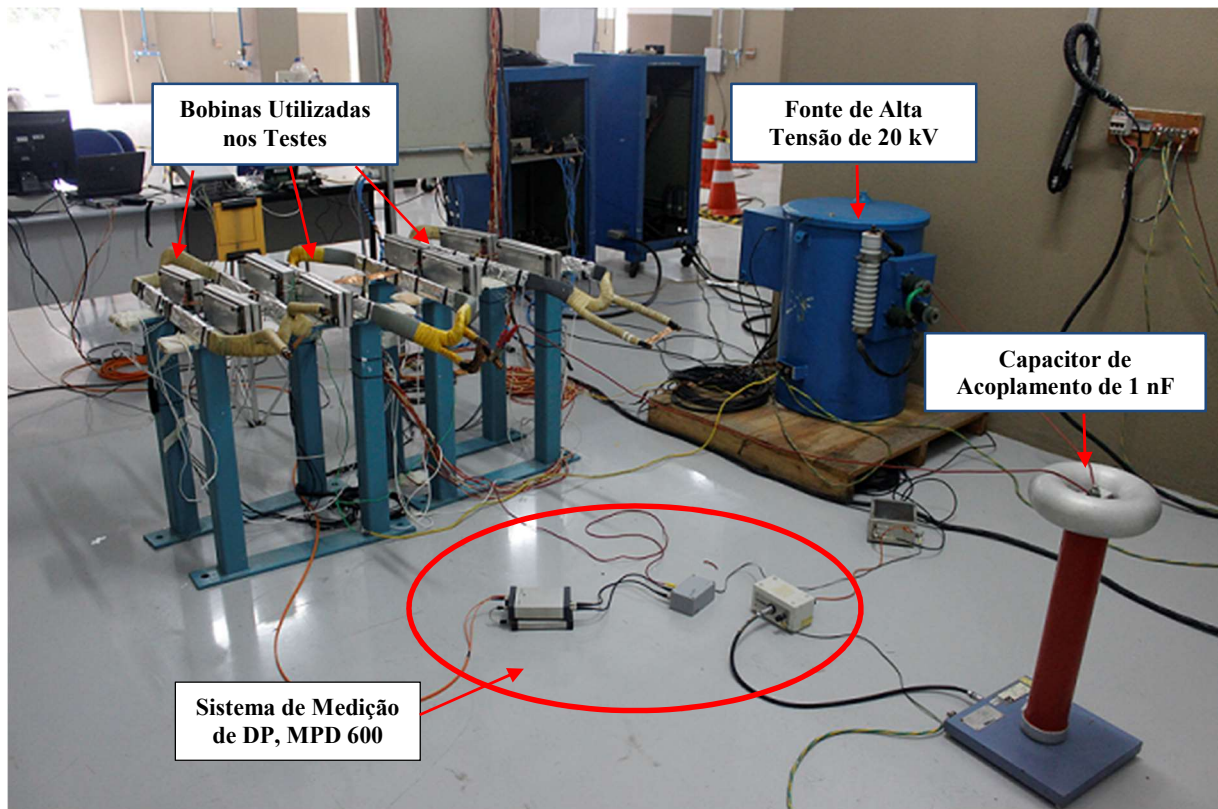


Figura 6.14 – Layout montado em laboratório para realização dos experimentos.

### 6.4.1 Descargas Internas

A descargas parciais internas são geradas em pequenas cavidades na isolação principal preenchidas com de ar ou gás. Elas são originadas durante o processo de fabricação e não indicam fatores de envelhecimento. Sob circunstâncias normais, descargas internas não levam a um envelhecimento acentuado. A principal característica do padrão PRPD de descargas internas é a simetria entre as DP positiva e negativa, combinadas com uma forma arredondada, conforme Figura 6.15.

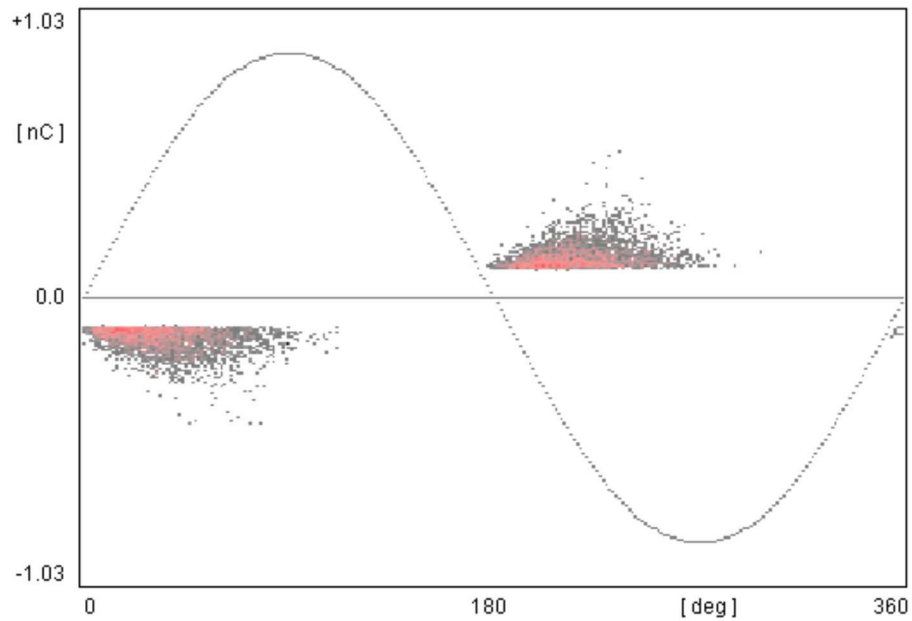


Figura 6.15 – PRPD característico de descargas internas.  
Fonte: Adaptado de [73]

Essa atividade foi observada em laboratório através de medições de descargas parciais em que se registrou o PRPD característico de descargas interna. O PRPD, Figura 6.16, obtido em laboratório mostra a simetria entre as DP positiva e negativa, combinadas com uma forma arredondada. As Figuras 6.17, 6.18 e 6.19, apresentam o sinal no domínio do tempo e o espectro de frequência registrados pelo acoplador direcional, antenas log-periódica e loop, observa-se que os três sensores registram sinais com espectro de frequência de até 600 MHz.

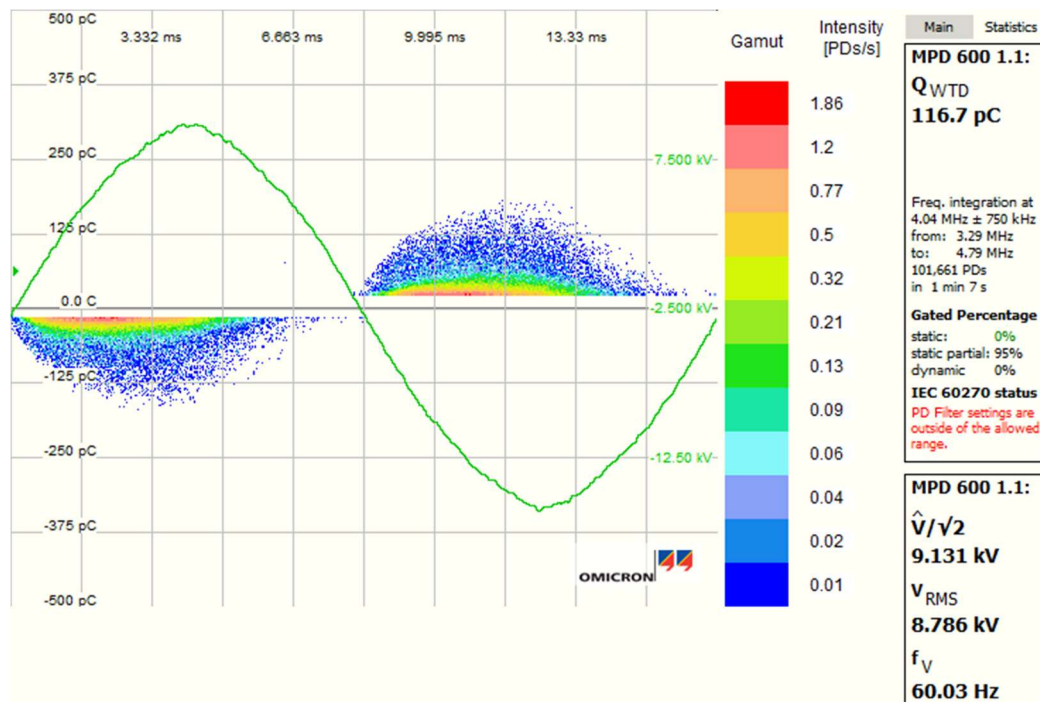


Figura 6.16 - PRPD obtido em laboratório para descargas internas.

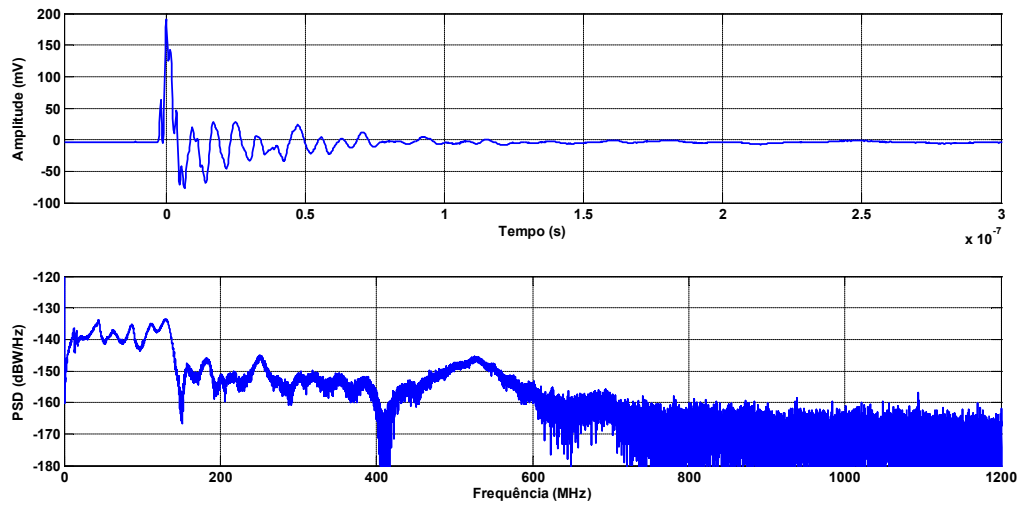


Figura 6.17 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pelo acoplador direcional para descargas internas.

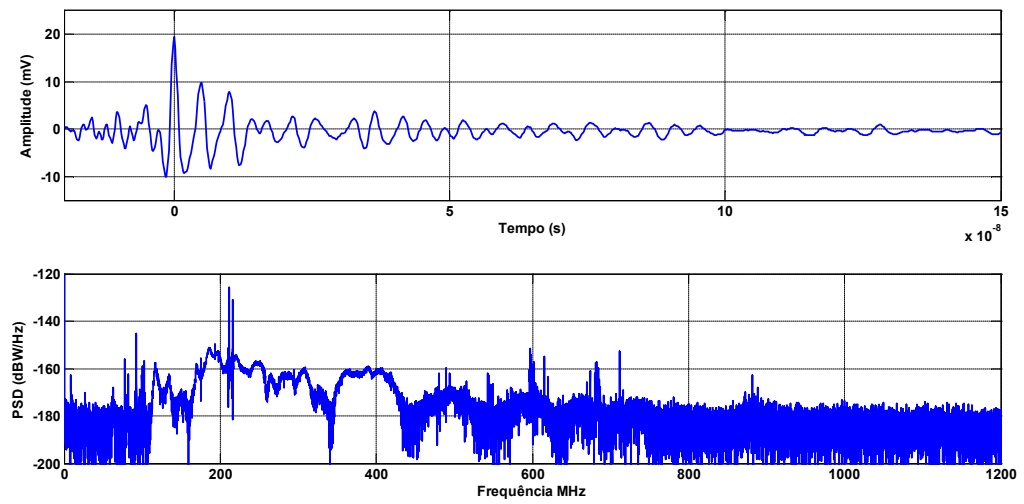


Figura 6.18 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena log-periódica para descargas de internas.

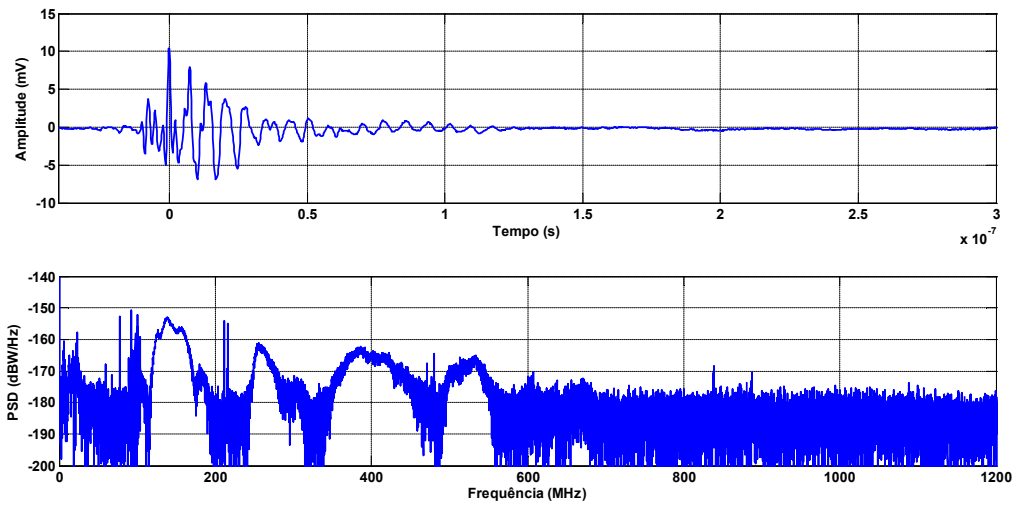


Figura 6.19 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antenna loop para descargas de internas.

#### 6.4.2 Delaminações

A delaminação interna no isolamento do estator pode ser causada durante o processo de fabricação ou pelo sobreaquecimento das bobinas, onde à medida que o sistema de isolamento é exposto continuamente a esse sobreaquecimento, as resinas orgânicas tendem a perder sua rigidez mecânica, ocorrendo assim o descolamento das camadas da isolamento, acarretando um fenômeno conhecido como delaminação das camadas. A principal característica do PRPD de uma atividade de descarga de delaminação interna é a simetria entre as DP positiva e negativa, combinadas com uma forma triangular, conforme ilustrado na Figura 6.20.

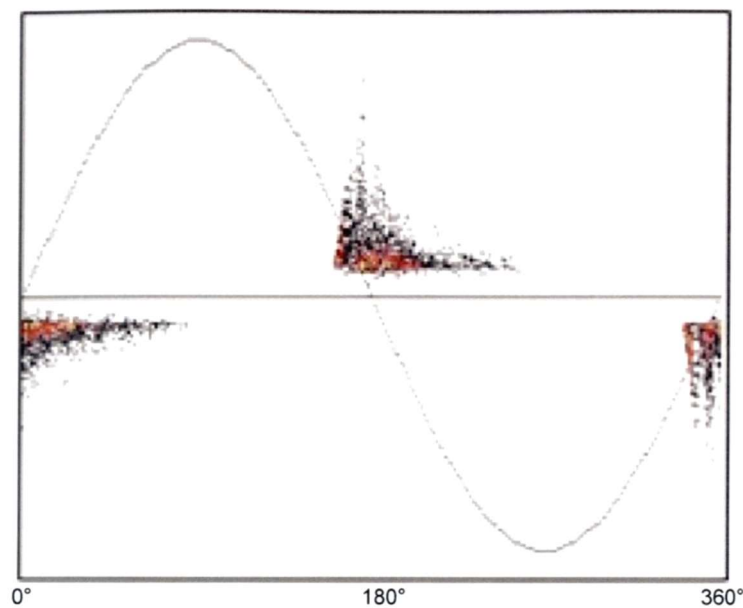


Figura 6.20 – PRPD característico de delaminações internas.  
Fonte: Adaptado de [73]

Essa atividade foi observada em laboratório através de medições descargas parciais em que se registrou o PRPD característico de delaminação interna. Após dissecação da bobina e inspeção visual foi constatado a presença de delaminações entre as camadas de isolamento, conforme apresentado na Figura 6.21. O PRPD, Figura 6.22, obtido em laboratório mostra a simetria entre as DP positiva e negativa, combinadas com uma forma triangular. As Figuras 6.23, 6.24 e 6.25, apresentam o sinal no domínio do tempo e o espectro de frequência registrados pelo acoplador direcional, antenas log-periódica e loop, observa-se que os três sensores registram sinais com espectro de frequência de até 800 MHz.

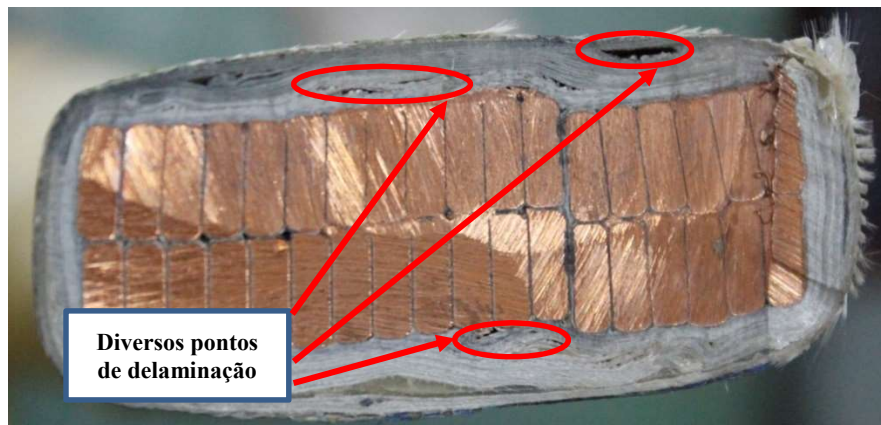


Figura 6.21 – Dissecção da bobina e constatação de delaminações.

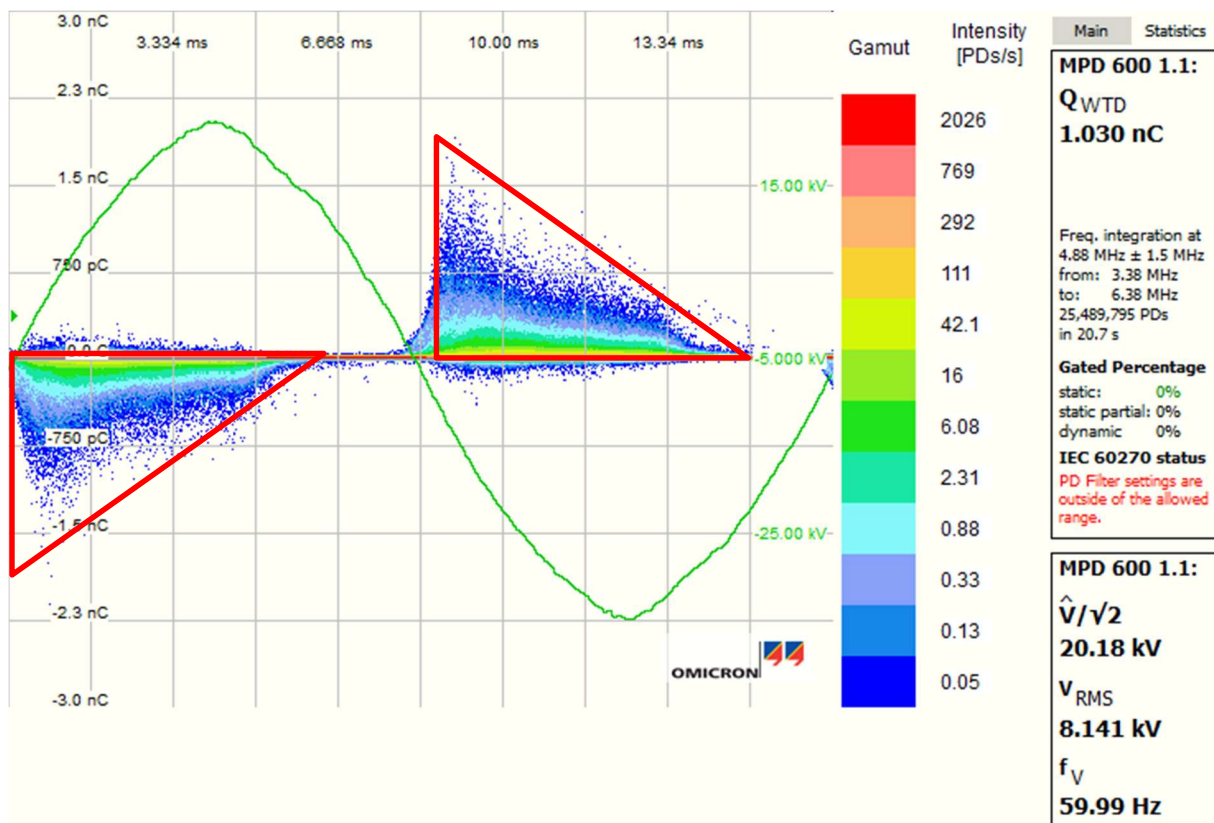


Figura 6.22 – PRPD obtido em laboratório para delaminações.

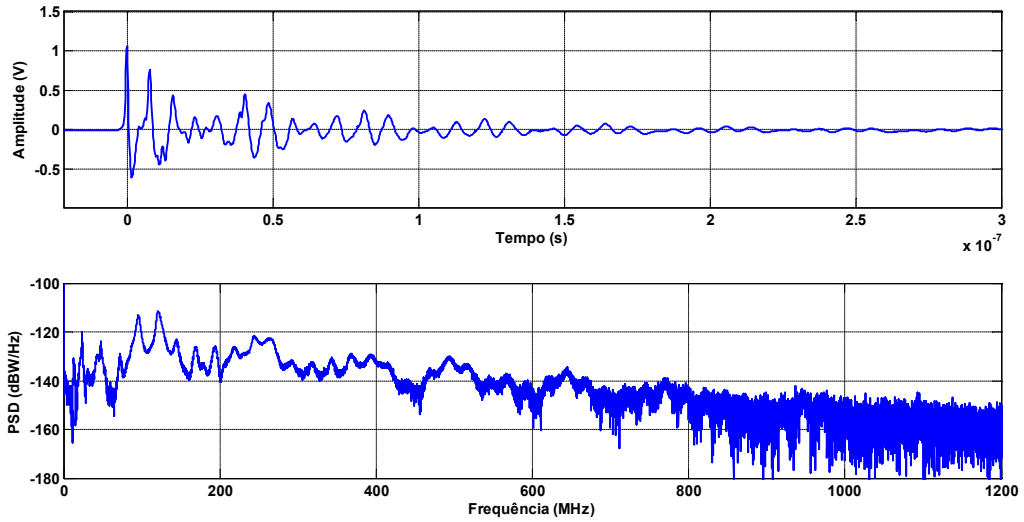


Figura 6.23 – Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pelo acoplador direcional para descargas de delaminação.

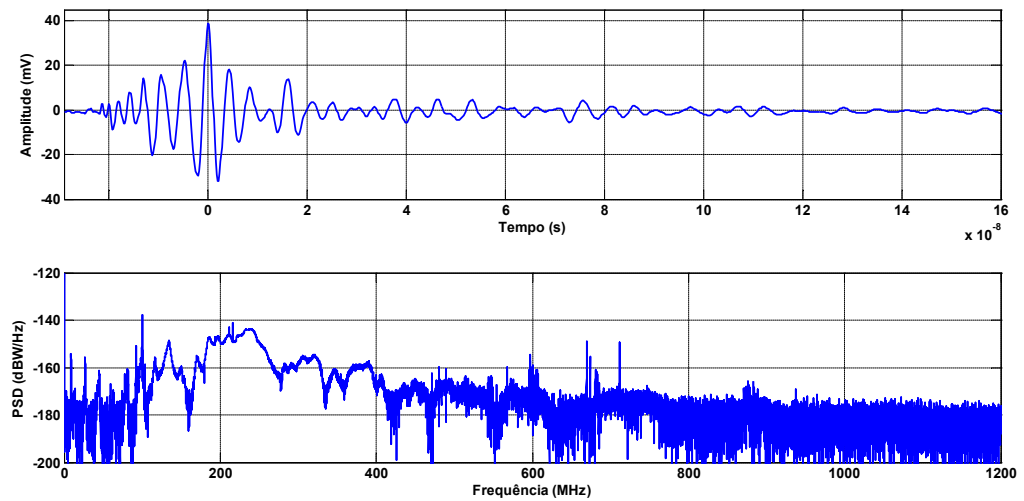


Figura 6.24 – Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pelo acoplador direcional para descargas de delaminação.

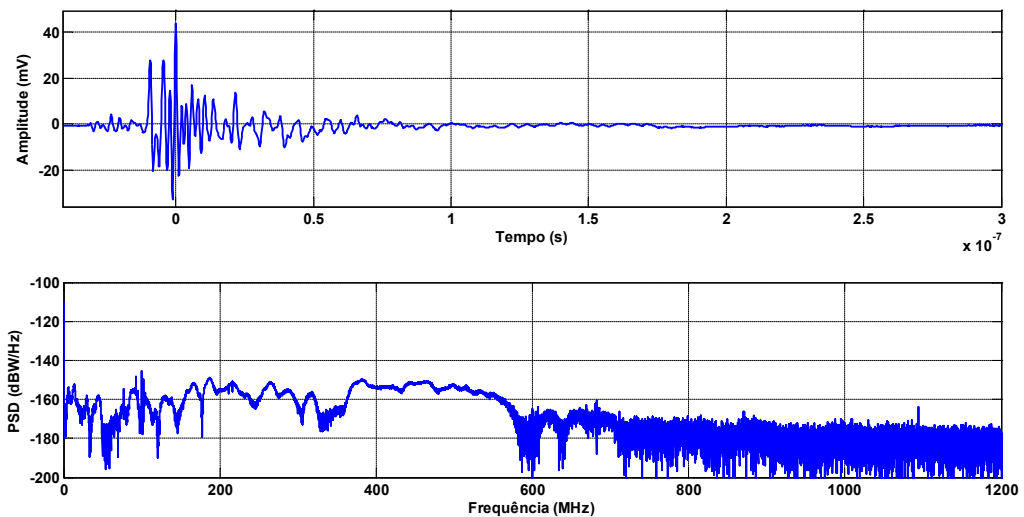


Figura 6.25 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena loop para descargas de delaminação.

### 6.4.3 Corona na Junção de Controle de Estresse de Tensão e Camada Semicondutiva

A descarga corona pode ocorrer ao redor da bobina/barra a poucos centímetros fora do núcleo do estator, na junção entre a camada semicondutiva, utilizada na ranhura, e a fita para controle do estresse de tensão, utilizada nos terminais de saída do enrolamento. O PRPD característico da atividade corona na junção de controle de estresse de tensão, é uma assimetria em favor de descargas positivas, ocorrendo durante o meio ciclo negativo de tensão, combinadas com uma forma arredondada, conforme ilustrado na Figura 6.26.

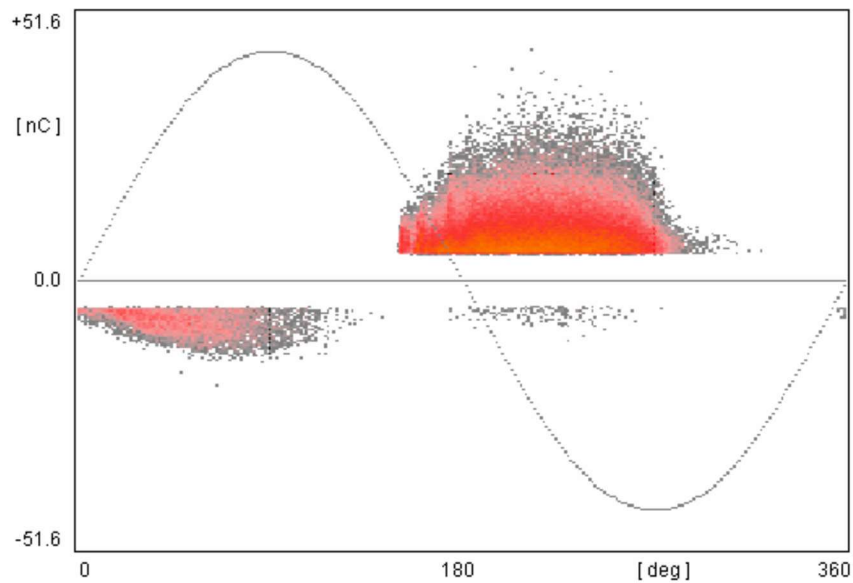


Figura 6.26 - PRPD característico de descargas Corona  
Fonte: Adaptado de [73].

No laboratório, essa atividade foi observada durante o ensaio de envelhecimento acelerado, em que houve o desgaste da bobina na zona de transição entre a camada semicondutiva e a fita para alívio de tensão. A Figura 6.28, a seguir, apresenta o desgaste observado durante o VET.

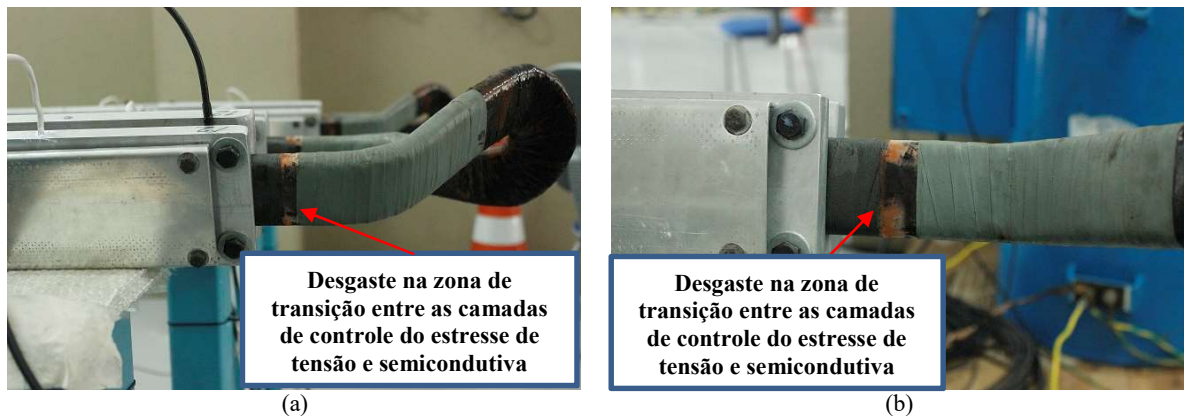


Figura 6.27 – (a) e (b) Indicativo de desgaste na zona de transição entre as camadas controle do estresse de tensão e semi condutiva em diferentes partes da bobina.

O PRPD, Figura 6.29, obtido em laboratório mostra uma assimetria em favor de descargas positivas, ocorrendo durante o meio ciclo negativo de tensão, combinadas com uma forma arredondada. As Figuras 6.29, 6.30 e 6.31, apresentam o sinal no domínio do tempo e o espectro de frequência registrados pelo acoplador direcional, antenas log-periódica e loop, observa-se que os três sensores registram sinais com espectro de frequência de até 500 MHz.

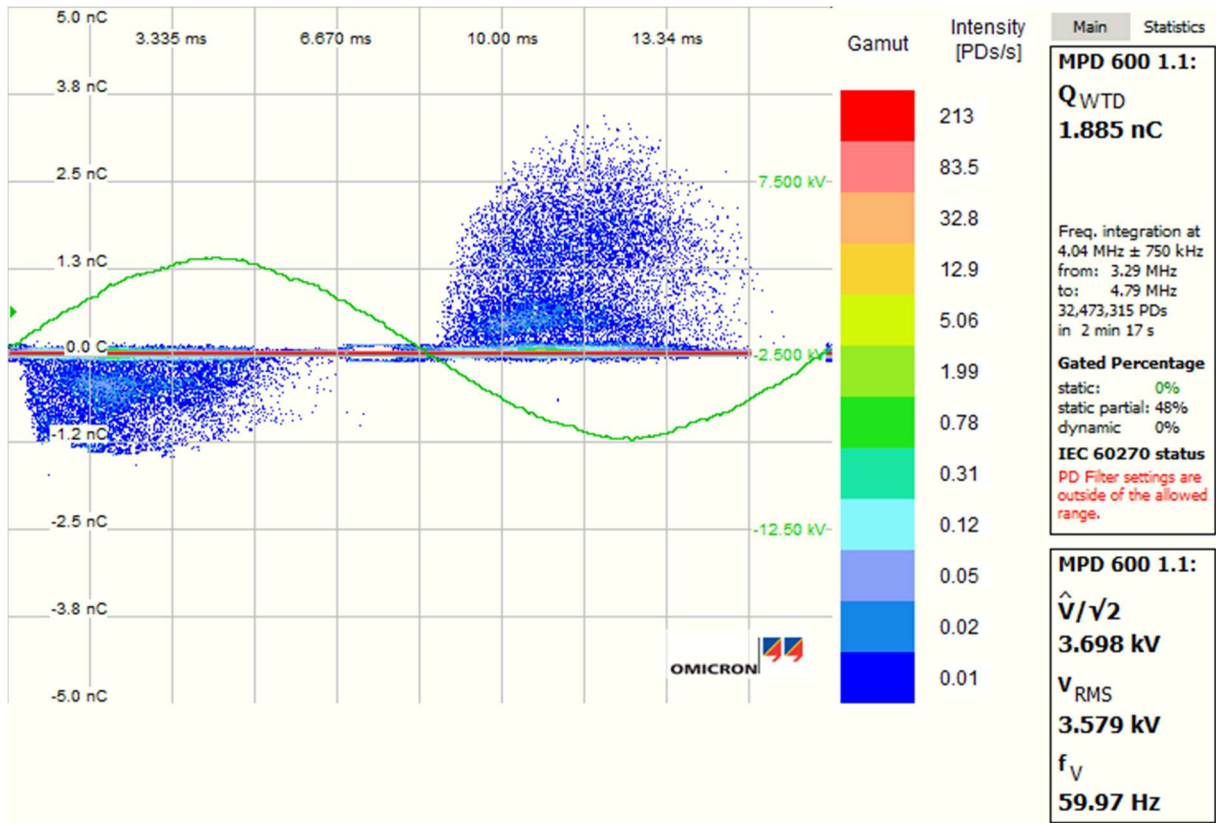


Figura 6.28 - PRPD obtido em laboratório para descargas corona.

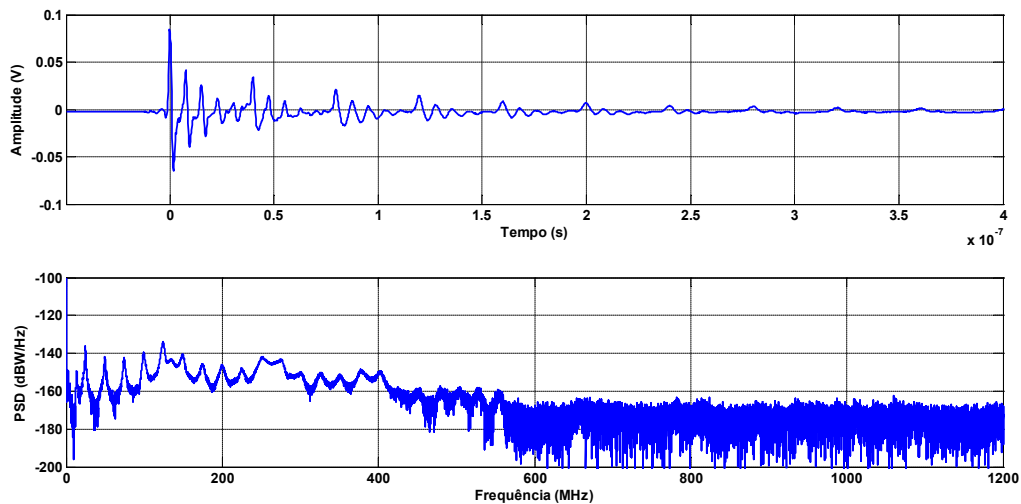


Figura 6.29 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pelo acoplador direcional para descargas Corona.



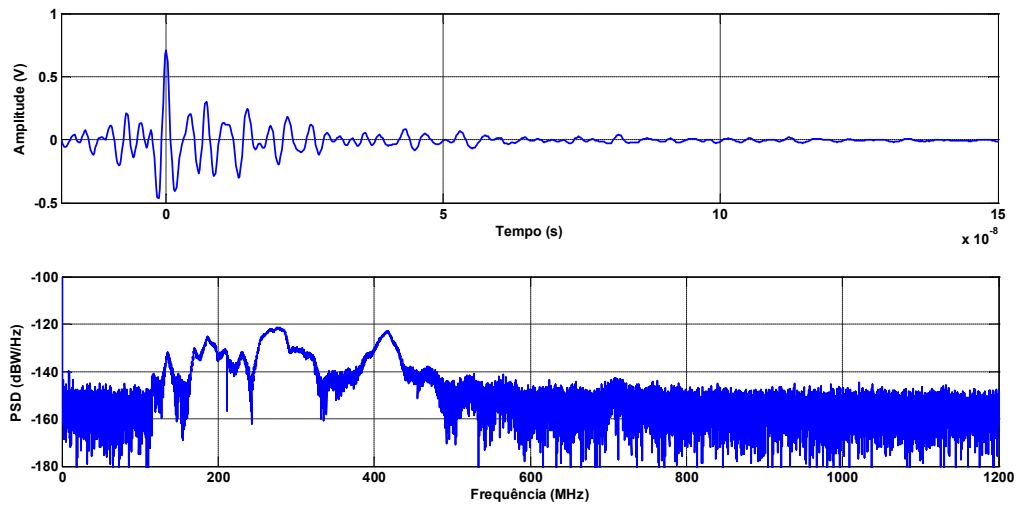


Figura 6.30 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena log-periódica para descargas Corona.

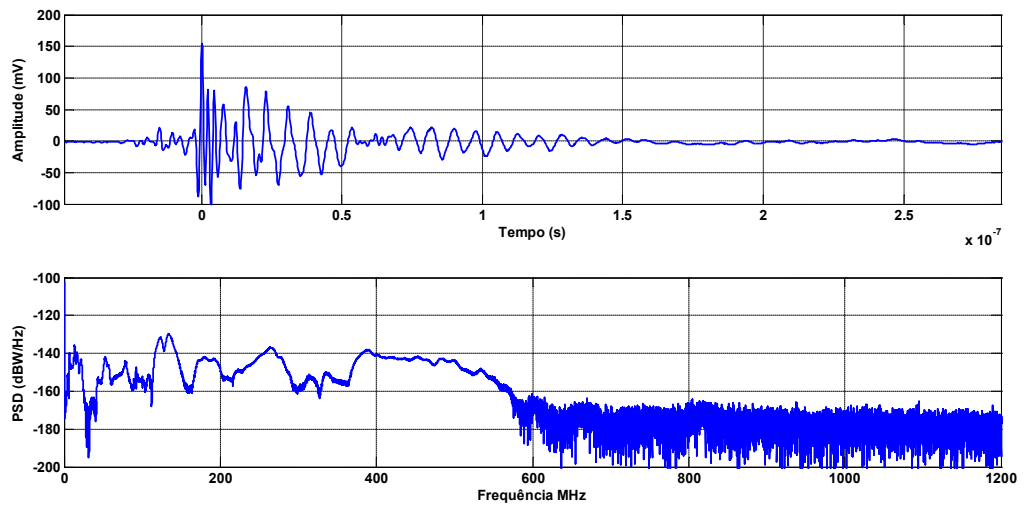


Figura 6.31 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena loop para descargas Corona.

#### 6.4.4 Descargas de Ranhura

Descargas de ranhura em hidrogeradores ocorrem quando o revestimento da parte semicondutiva na ranhura se danifica devido a vibração da barra ou bobina na ranhura. O PRPD é caracterizado por uma assimetria em favor das descargas positivas, ocorrendo durante o meio-ciclo negativo de tensão, combinado com uma forma triangular, conforme ilustrado na Figura 6.32.

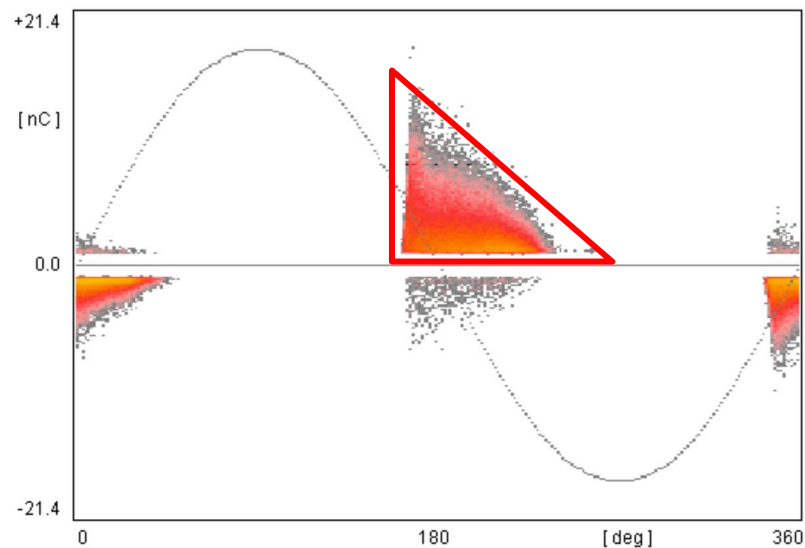


Figura 6.32 – PRPD característico de descargas de ranhura.  
Fonte: Adaptado de [73].

Este defeito foi simulado em laboratório através do desgaste abrasivo de uma região retangular de 12 cm x 05 cm da tinta semicondutiva do lado interno da bobina, conforme Figura 6.33. O PRPD obtido em laboratório é apresentado na Figura 6.34, pode-se observar a assimetria em favor das descargas positivas, ocorrendo durante o meio-ciclo negativo de tensão, combinado com uma forma triangular. As Figuras 6.35 e 6.36, apresentam o sinal no domínio do tempo e o espectro de frequência registrados pelo acoplador direcional, antena e loop, observa-se que os dois sensores registram sinais com espectro de frequência de até 1000 MHz.

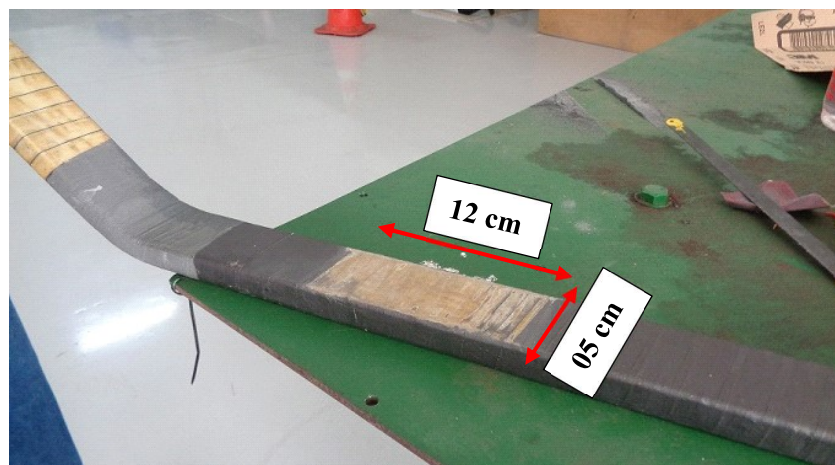


Figura 6.33 – Desgaste de parte da camada semicondutiva para simular descargas de ranhura.

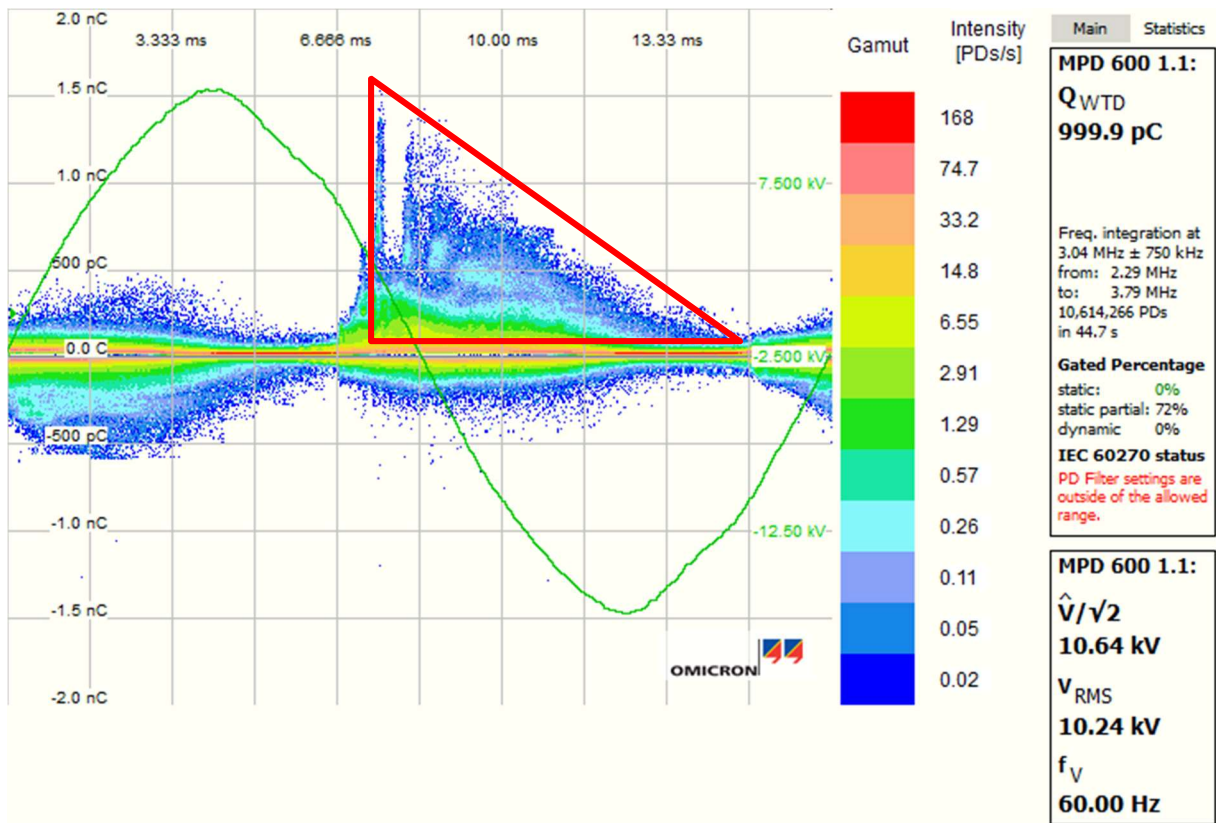


Figura 6.34 – PRPD obtido em laboratório de descargas de ranhura.

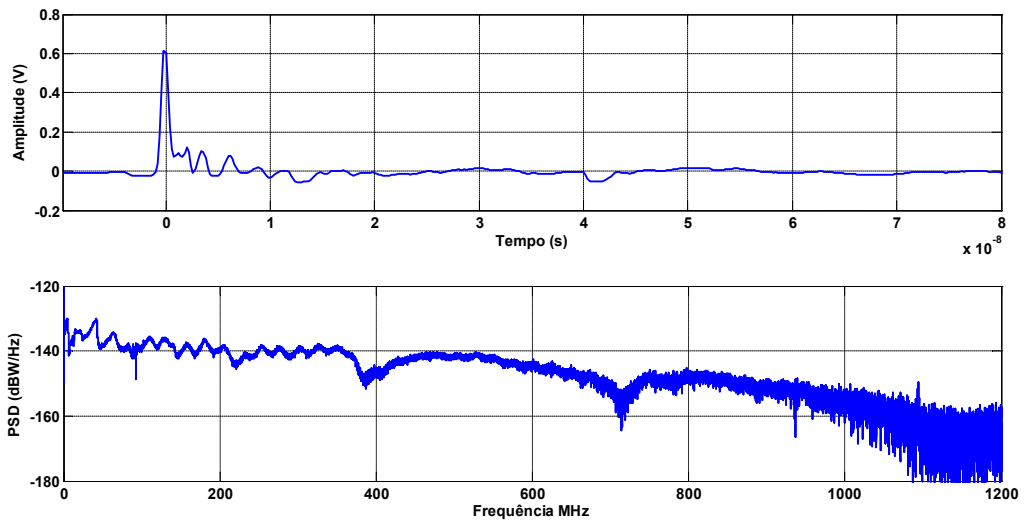


Figura 6.35 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pelo acoplador direcional para descargas de ranhura.

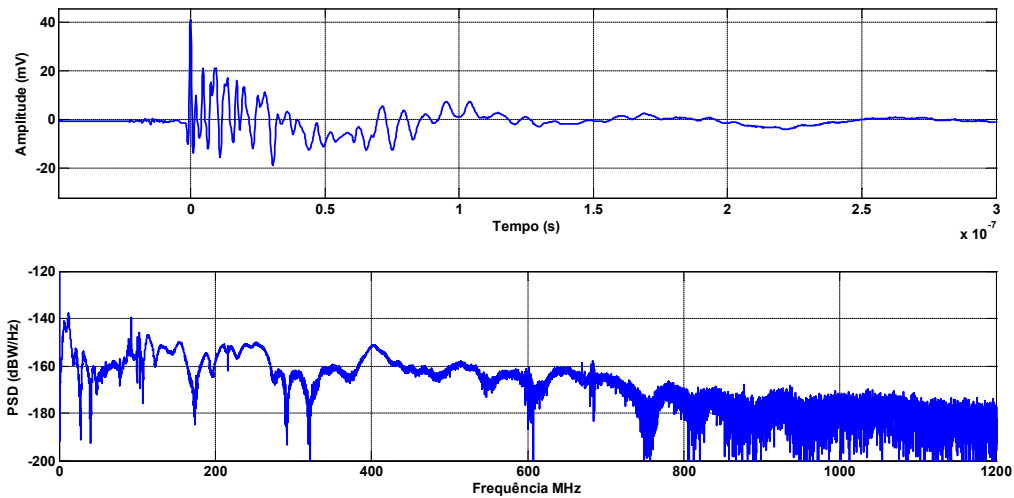


Figura 6.36 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena loop para descargas de ranhura.

#### 6.4.5 Descargas Barra-Barra (Tipo Gap)

Esse tipo de atividade ocorre entre duas barras nos terminais de saída do enrolamento. Ele ocorre quando o espaçamento de ar entre as barras é muito pequeno para suportar o estresse elétrico. Essas descargas podem ocorrer entre barras de diferentes fases ou entre a alta tensão e o um terminal neutro da mesma fase. A característica principal deste tipo de descarga é uma concentração horizontal de DP de amplitude relativamente constante, presente em ambas as polaridades de tensão, conforme ilustrado na Figura 6.37.

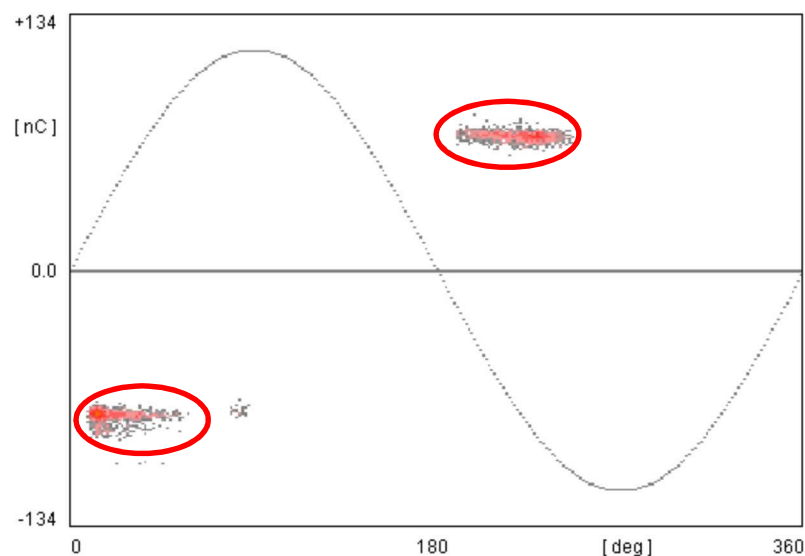


Figura 6.37 – PRPD característico de descargas tipo gap.

Esta atividade de descarga foi simulada em laboratório através aplicação de tensão em uma bobina com uma falha na isolação entre as barras que compõem os condutores da mesma, conforme Figura 6.38 (a), e a Figura (b) apresenta a ocorrência das descargas. O PRPD obtido em laboratório é

apresentado na Figura 6.39, observa-se uma concentração horizontal de descargas de amplitude relativamente constante, presente em ambas polaridades de tensão. As Figuras 6.40, 6.41 e 6.42, apresentam o sinal no domínio do tempo e o espectro de frequência registrados pelo acoplador direcional, antenas log-periódica e loop, observa-se que os três sensores registram sinais com espectro de frequência de até 300 MHz.

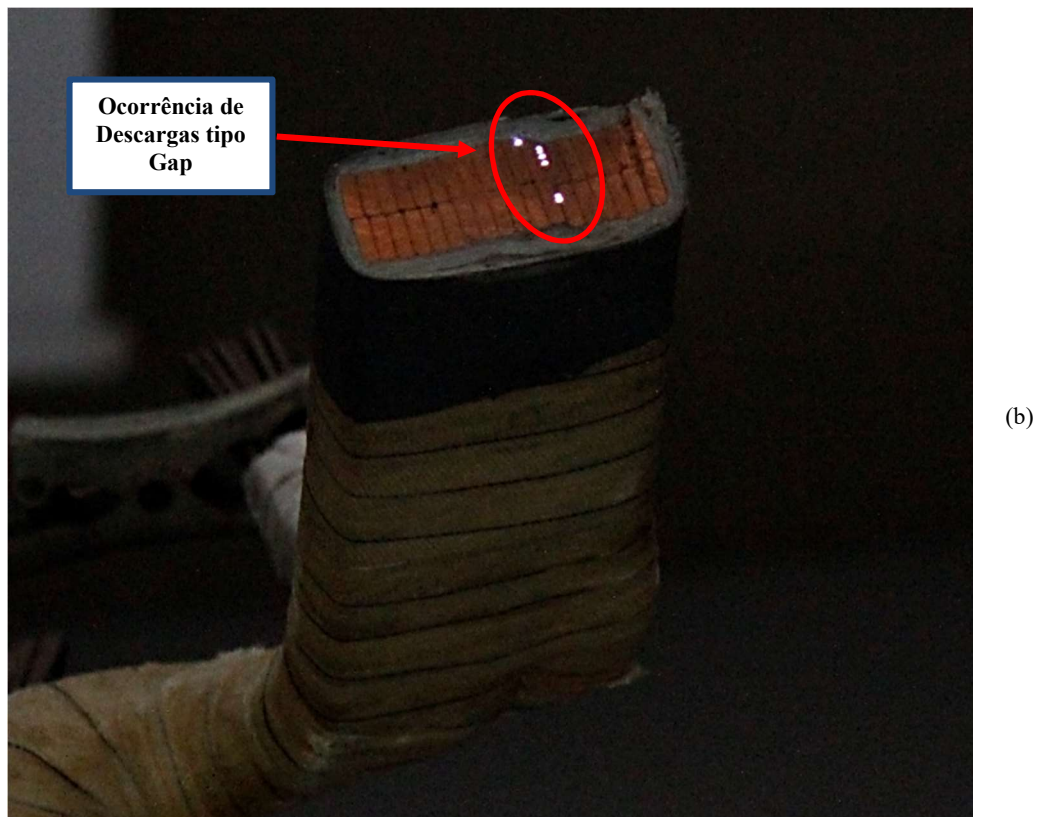
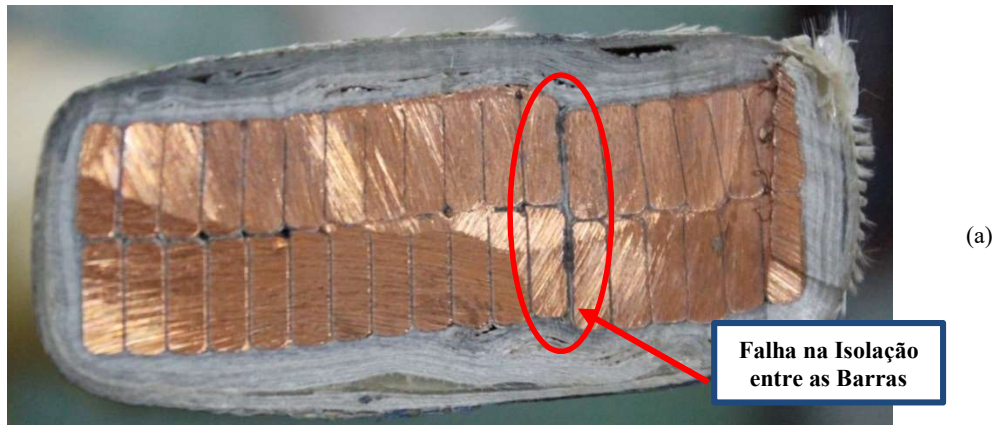


Figura 6.38 – Ocorrências das descargas entre barras com tensões diferentes.

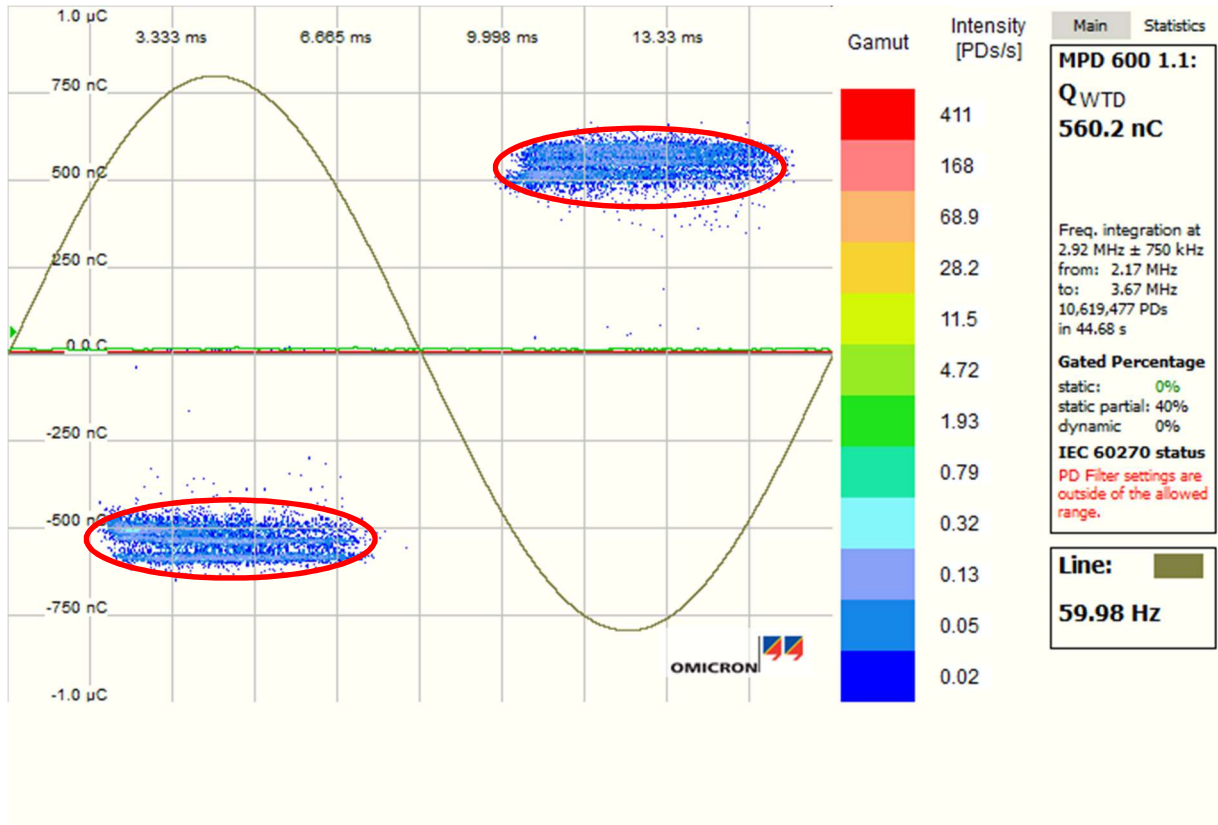


Figura 6.39 – PRPD obtido em laboratório para descargas tipo gap.

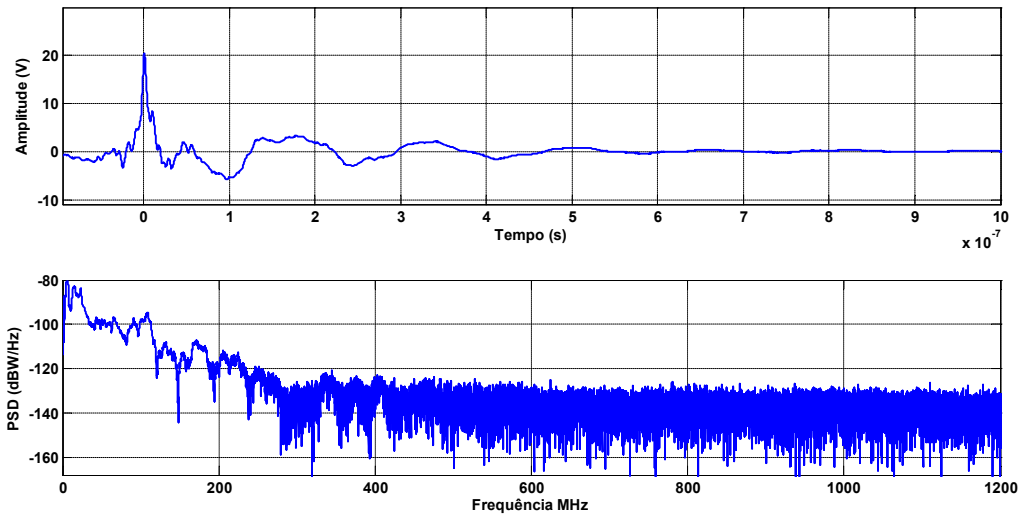


Figura 6.40 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pelo acoplador direcional para descargas de tipo gap.

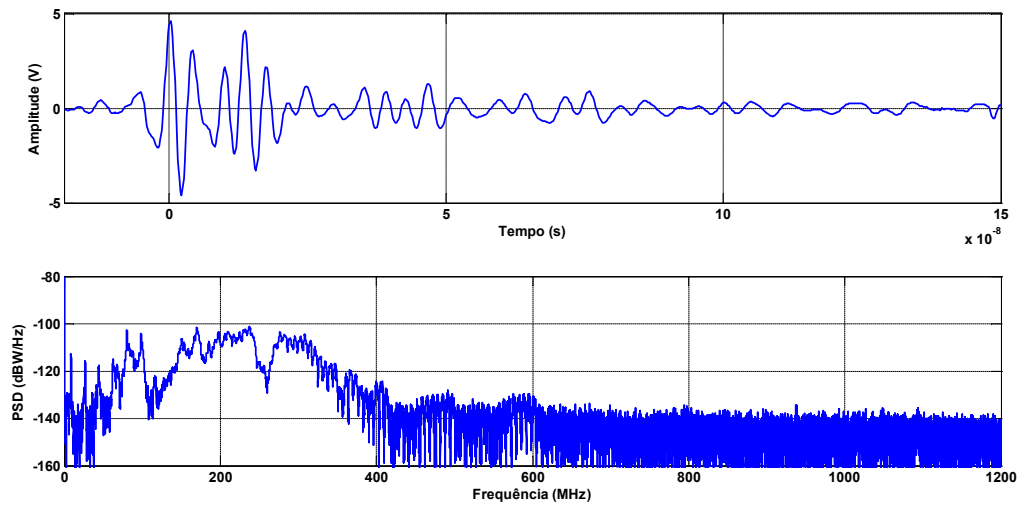


Figura 6.41 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena log-periódica para descargas de tipo gap.

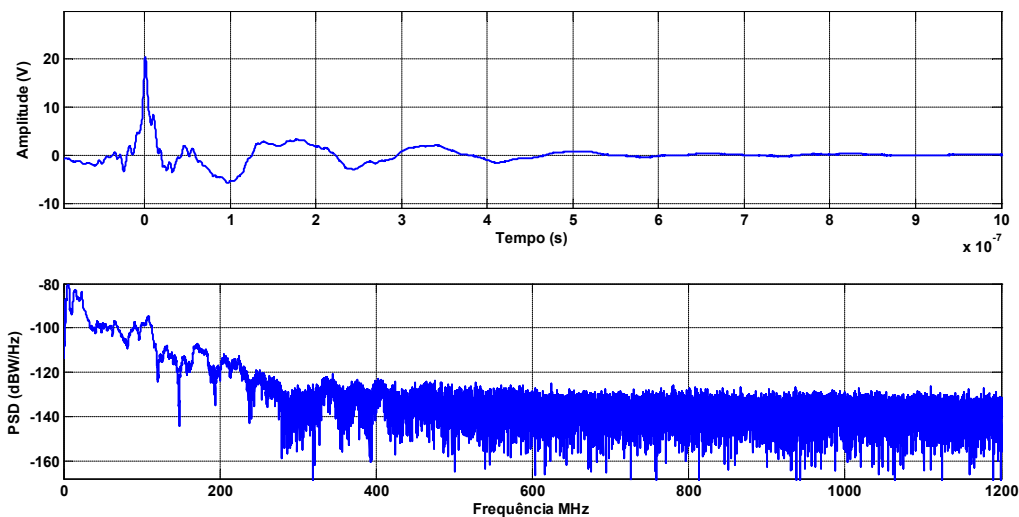


Figura 6.42 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena loop para descargas tipo gap.

### 6.4.6 Descargas de Superfície

Descargas de superfície ocorrerão ao longo da região da bobina que sai da ranhura devido à contaminação da interface ar/isolação. Esse tipo de atividade pode ser muito esporádica, e depende bastante das condições de temperatura e umidade. O PRPD é caracterizado por uma concentração vertical de descargas, conforme ilustrado na Figura 6.43.

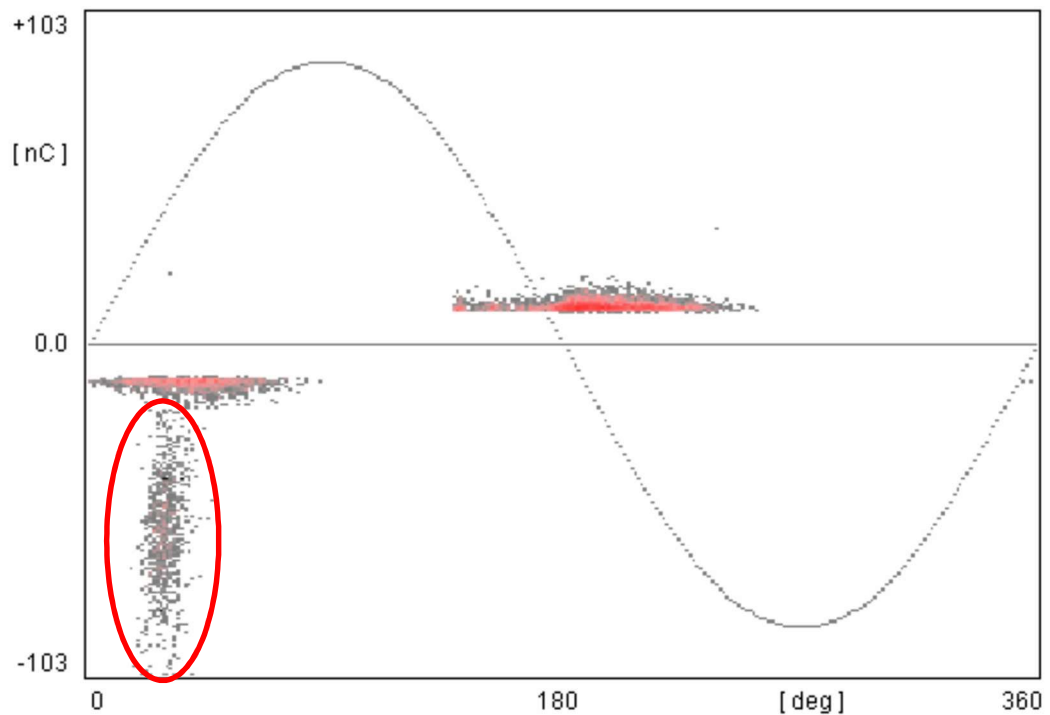


Figura 6.43 – PRPD característico de descargas de superfície.

Essa atividade de descargas foi simulada em laboratório através da contaminação da região da bobina que sai da ranhura com uma fita de cobre, conforme ilustrado na Figura 6.44. O PRPD obtido em laboratório é apresentado na Figura 6.45, nele pode-se observar uma concentração vertical de descargas. As Figuras 6.46, 6.47 e 6.48, apresentam o sinal no domínio do tempo e o espectro de frequência registrados pelo acoplador direcional, antenas log-periódica e loop, observa-se que os três sensores registram sinais com espectro de frequência de até 900 MHz.



Figura 6.44 - Contaminação da superfície da bobina com uma fita de cobre.



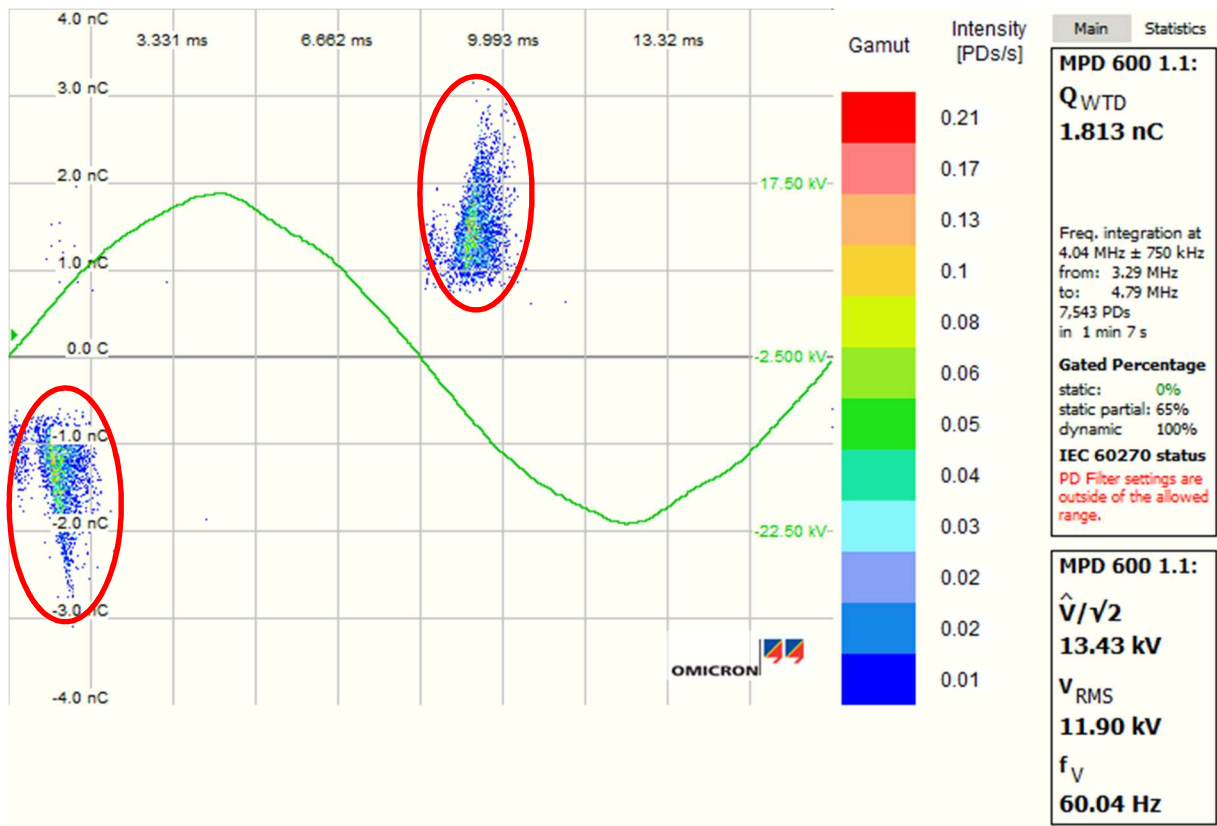


Figura 6.45 - PRPD obtido em laboratório para descargas de superfície.

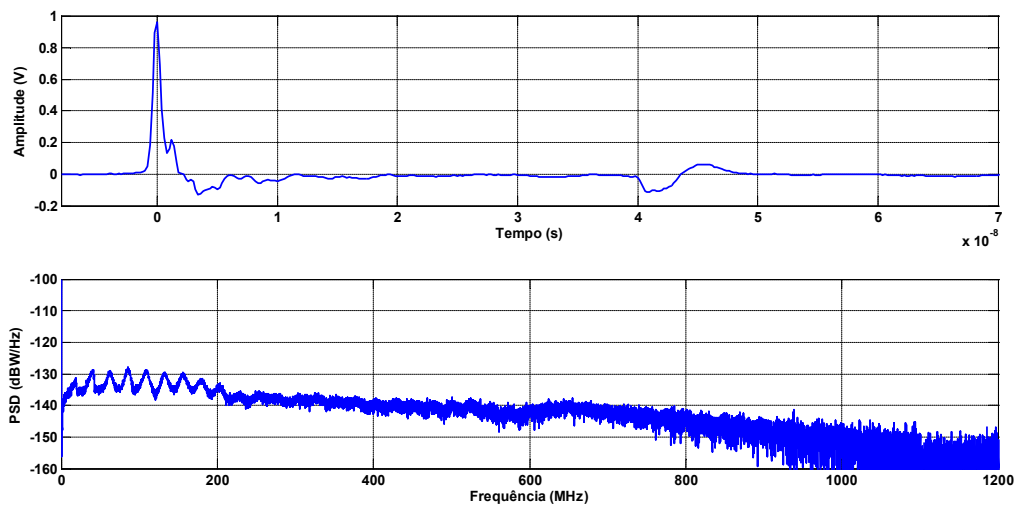


Figura 6.46 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pelo acoplador direcional para descargas de superfície.

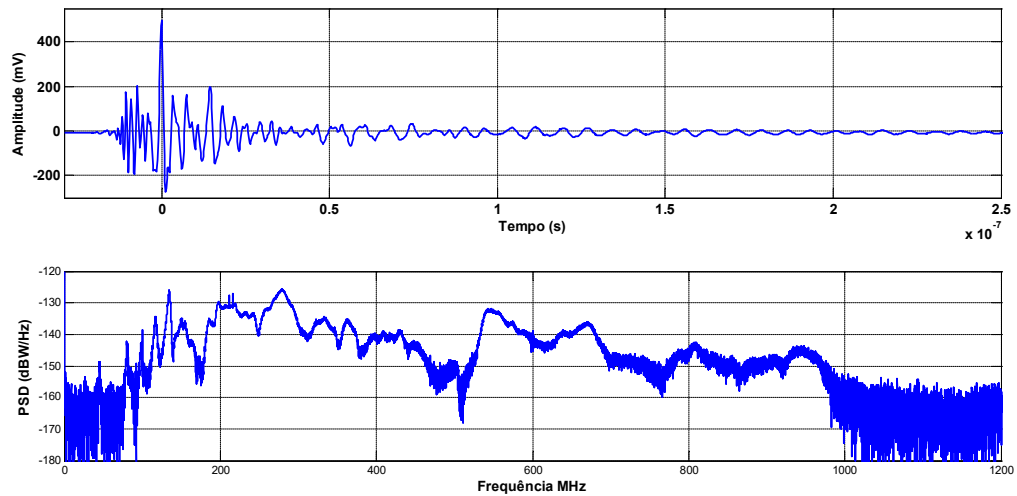


Figura 6.47 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena log-periódica para descargas de superfície.

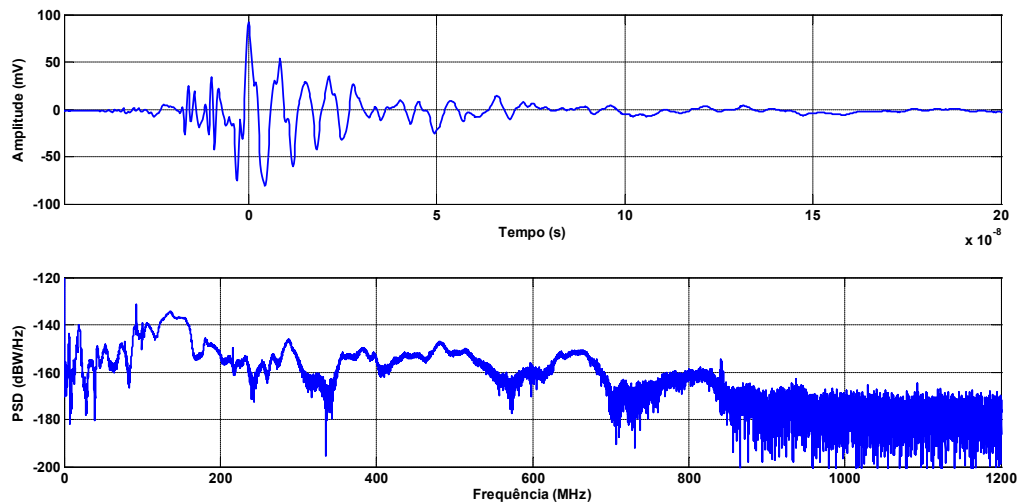


Figura 6.48 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pela antena loop para descargas de superfície.

### 6.4.7 Análise do Espectro de Frequência

A Tabela 6.4, a seguir, apresenta um resumo das faixas de frequência registradas pelos sensores eletromagnéticos de acordo com o tipo de descarga.

Tabela 6.4 – Faixa de frequência para cada tipo de descarga.

Tipo de Descarga	Faixa de Frequência (MHz)
Descargas Internas	0-700 MHz
Delaminações	0-800 MHz
Corona	0-500 MHz
Descargas de Ranhura	0-1000 MHz
Descargas Barra-Barra (Tipo Gap)	0-300 MHz
Descargas de Superfície	0-900 MHz

## 6.5 CARACTERÍSTICAS UHF DAS DP DURANTE O ENSAIO DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

As características UHF das descargas parciais durante o ensaio de envelhecimento acelerado foram estudadas através do acoplador direcional de microfita. Foi avaliada uma amostra constituída por um conjunto de duas bobinas estatóricas de 6,9 kV e classe térmica B, que estavam em operação desde 1975. O critério A (400 horas) foi escolhido para avaliação da amostra que foram submetidas ao estresse térmico de 100 °C e elétrico de 15 kV. O layout montado em laboratório é apresentado na Figura 6.49 e a Figura 6.50 apresenta o acoplador direcional instalado.

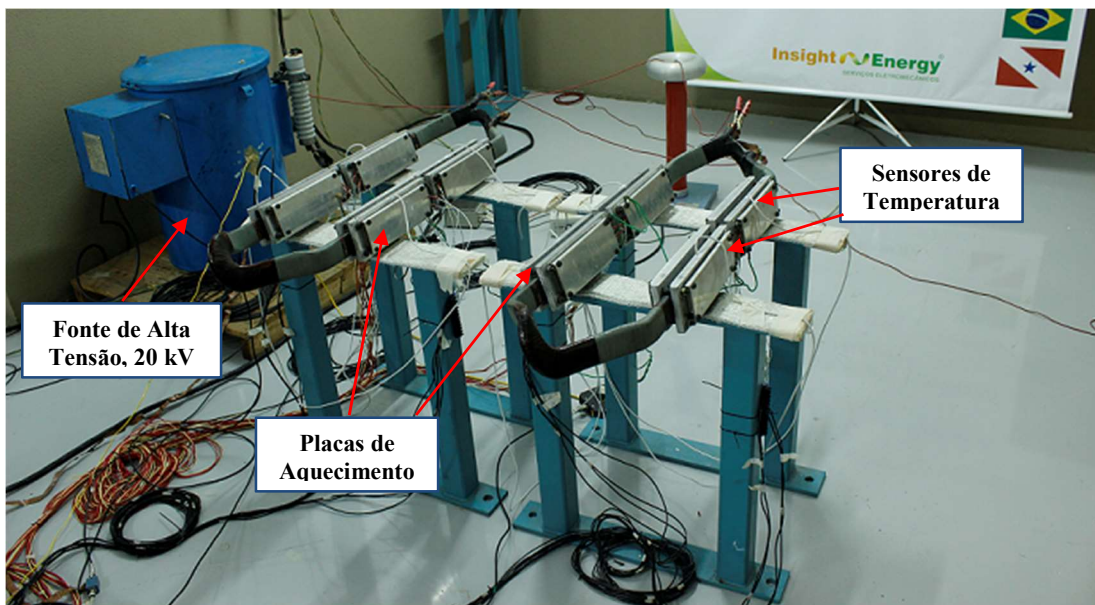


Figura 6.49 – Layout montado em laboratório para realização do ensaio de envelhecimento acelerado.

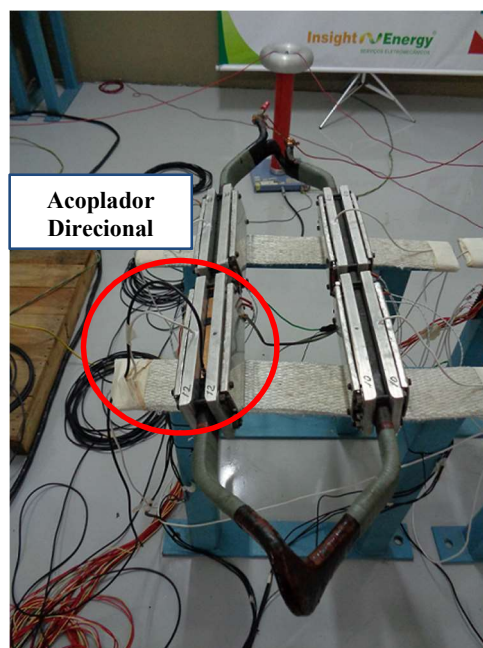


Figura 6.50 – Instalação do acoplador direcional.

### 6.5.1 Ensaios Dielétricos Antes e Após o VET

Antes e após a realização do ensaio de envelhecimento acelerado as bobinas foram submetidas aos seguintes ensaios dielétricos:

**1 – Resistência de isolamento:** foram efetuadas avaliações da resistência de isolamento, em um e dez minutos sob tensão contínua de 5 kV antes, durante e após o VET, para determinação do índice de polarização dielétrica e permitir avaliações sobre o conteúdo de umidade presente nas bobinas, os resultados são apresentados nas Tabelas 6.5 e 6.6, e Figuras 6.51 e 6.52;

**2 – Tensão aplicada no isolamento elétrico das bobinas:** como medida cautelar para os ensaios seguintes, sob alta tensão, as bobinas foram avaliadas na suportabilidade à tensão alternada de 15 kV, durante um minuto, as duas bobinas suportam o teste, conforme critério estabelecido pela IEEE;

**3 – Medição da capacitância e fator de perdas dielétricas:** os valores da capacitância e fator de perdas dielétricas foram registrados antes e após o VET nos níveis de tensão de 1,38 kV, 2,76 kV, 4,14 kV, 5,52 kV, 6,9 kV, 8,28 kV, conforme critério estabelecido em [74];

**4 – Medição de descargas parciais:** as DP foram medidas através do método convencional (capacitor de acoplamento) antes e após o VET no nível de tensão de 6,9 kV, conforme os critérios estabelecidos pela [73].

### 6.5.2 Análise dos Resultados dos Ensaios Dielétricos

Os resultados apresentados nas Tabelas 6.5, 6.6 e Figuras 6.51 e 6.52 mostram que houve um aumento da resistência de isolamento e do índice de polarização no decorrer das 400 horas do ensaio de envelhecimento acelerado. Esse comportamento em bobinas antigas, de acordo com [40], indica que a isolação estava inicialmente úmida. Ainda, de acordo com [40] a isolação em bobinas de mica asfáltica muda se o asfalto for aquecido o suficiente para fluir através da isolação principal, essa atividade passou a ser observada a partir de 19 horas de ensaio, a Figura 6.53 apresenta esta ocorrência.

Tabela 6.5 – Resistência de Isolamento da Bobina n° 239 durante o VET.

Tempo	Resistência de Isolamento Bobina 239 (GΩ)					
	14/12/2015	29/12/2015	20/01/2016	16/02/2016	25/02/2016	03/03/2016
	Zero hora	60 horas	100 horas	225 horas	330 horas	400 horas
30s	24,7	25,1	27,2	26,4	22,4	21,2
1 min	34,9	42	44,5	43,8	36,9	34,8
2 min	45	71	70	69,4	58	53,6
3 min	53,3	96,3	92,6	90,1	74,3	63,6
4 min	57,9	119,6	110,7	109,1	94,9	73
5 min	62,1	139	126,7	125,1	96,9	76,9
6 min	67,3	158,4	140	137,9	112,1	82,3
7 min	71,5	175,6	153,6	150,6	118,7	84,6
8 min	74,9	191,4	165,2	157,7	120	88
9 min	77,5	209	178,2	168,5	127,9	89
10 min	80,5	222	188,4	177,9	133,9	92,5
IP	2,31	5,29	4,23	4,06	3,63	2,66
IA	1,41	1,67	1,64	1,66	1,65	1,64

Tabela 6.6 - Resistência de Isolamento da Bobina n° 15 durante o VET.

Tempo	Resistência de Isolamento Bobina 15 (GΩ)					
	14/12/2015	29/12/2015	20/01/2016	16/02/2016	25/02/2016	02/03/2016
	Zero hora	60 horas	100 horas	225 horas	330 horas	400 horas
30s	25,5	26	28	26	22,1	21,3
1 min	35	41,8	40,9	42	34,3	33
2 min	46,6	66,6	62,1	62	51,1	49,7
3 min	54	88,5	80	77,2	62,8	61,5
4 min	59,3	109,2	94,5	92,1	72,5	71
5 min	63,3	128,8	108,1	104,7	80,9	78,4
6 min	66,3	146,8	120,6	120,1	87,4	85,8
7 min	68,6	163,8	131,9	131,2	93,6	90,9
8 min	68,5	179,4	143,3	136,7	98,6	96,3
9 min	71,1	194,4	153	148,1	105,1	100,3
10 min	73	208	162,2	164,1	109,1	103,8
IP	2,09	4,98	3,97	3,91	3,18	3,15
IA	1,37	1,61	1,46	1,62	1,55	1,55

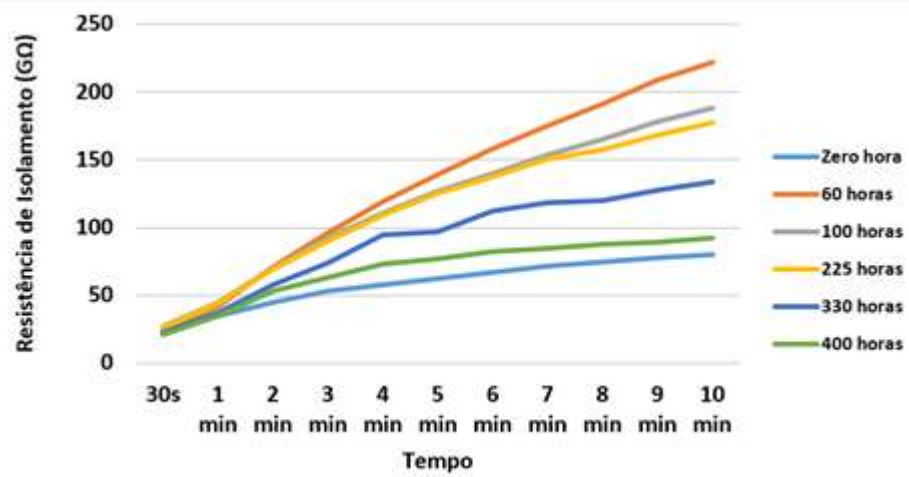


Figura 6.51 - Resistência de Isolamento da Bobina n° 15 durante o VET.

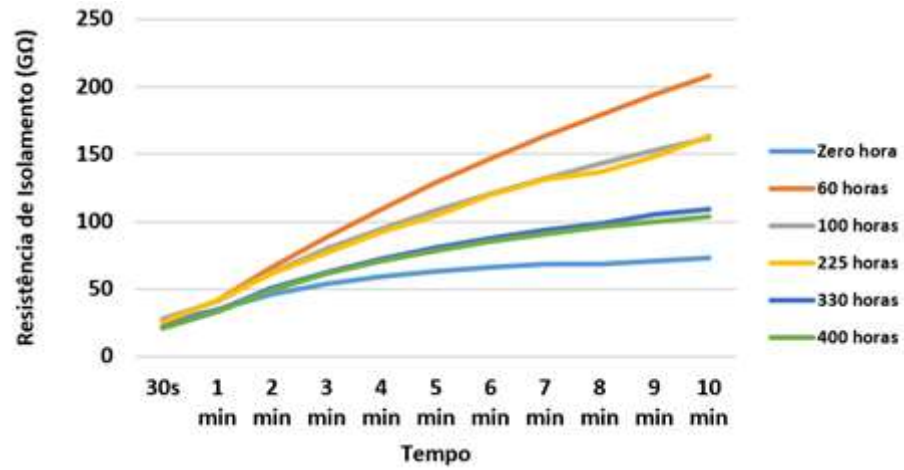
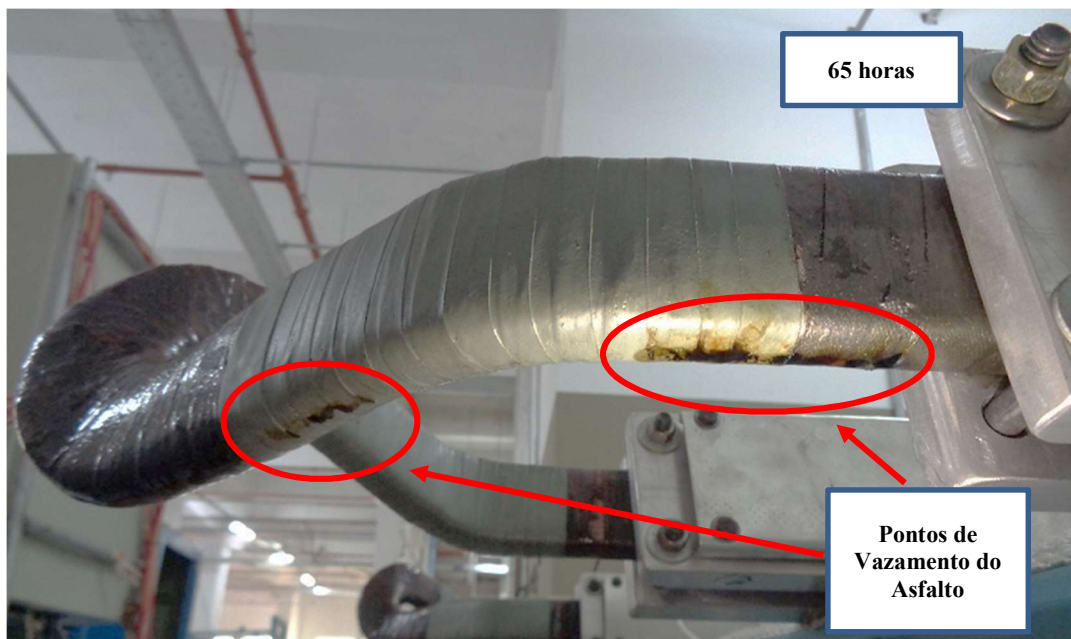


Figura 6.52 - Resistência de Isolamento da Bobina n° 239 durante o VET.



(a)



(b)

Figura 6.53 – Pontos de vazamento do asfalto durante o VET. (a) 19 horas de ensaio; (b) 65 horas de ensaio.

As Figuras 6.54 e 6.55, apresentam o comportamento da capacitância e fator de perdas dielétricas antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado. Nota-se que as duas bobinas ensaiadas apresentaram um aumento na capacitância após o VET, Figuras 6.54 (a) e 6.55 (a). Esse comportamento é devido a mudança que a isolação sofreu durante o estresse térmico que ocasionou a fuga do asfalto (em estado líquido) pela isolação principal, Figura 6.53. Como a constante dielétrica do asfalto é maior em estado líquido ( $\epsilon=3,2$ ) em relação ao estado sólido ( $\epsilon=2,6$ ), a capacitância sofre o aumento observado nas Figuras 6.54 e 6.55.

O comportamento do fator de perdas dielétricas é apresentado nas Figuras 6.54 (b) e 6.55 (b), observa-se que para as duas bobinas ensaiadas houve diminuição do FP após serem submetidas ao VET. De acordo com [75, 76, 77], a diminuição do FP após os estresses térmicos e elétricos provocados pelo VET, deve-se ao fato de que inicialmente a isolação das bobinas possuía uma certa quantidade de umidade e com o aquecimento no decorrer do ensaio, o sistema de isolação foi ficando seco. Os trabalhos [76,77] que realizaram envelhecimento através de ciclo térmico com duração de 2000 e 7000 horas, respectivamente, em bobinas com isolação de mica asfáltica, mostraram que até as primeiras horas de ensaio, os valores do FP sofrem uma queda para em seguida aumentarem ao longo do ensaio, esse resultado pode ser observado na Figura 6.56 adaptada de [76].

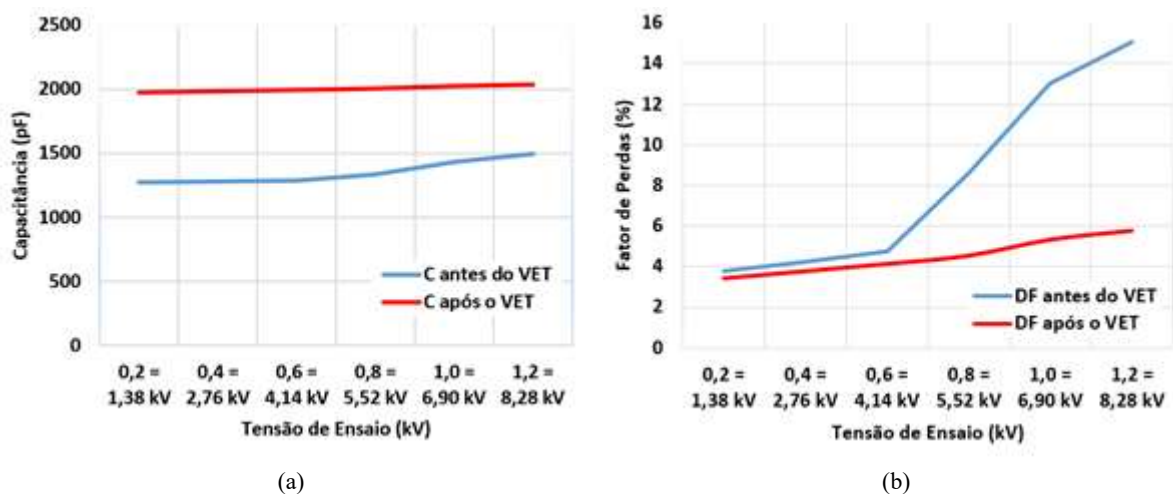


Figura 6.54 – Capacitância e fator de perdas dielétricas da bobina n°15 antes e após o VET. (a) Capacitância; (b) Fator de perdas dielétricas.



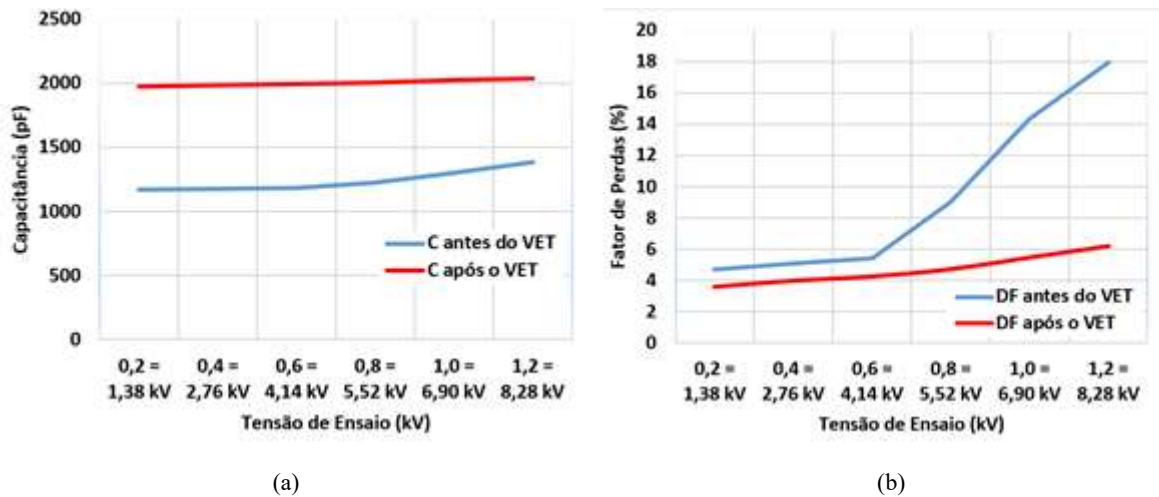


Figura 6.55 - Capacitância e fator de perdas dielétricas da bobina n°239 antes e após o VET. (a) Capacitância; (b) Fator de perdas dielétricas.

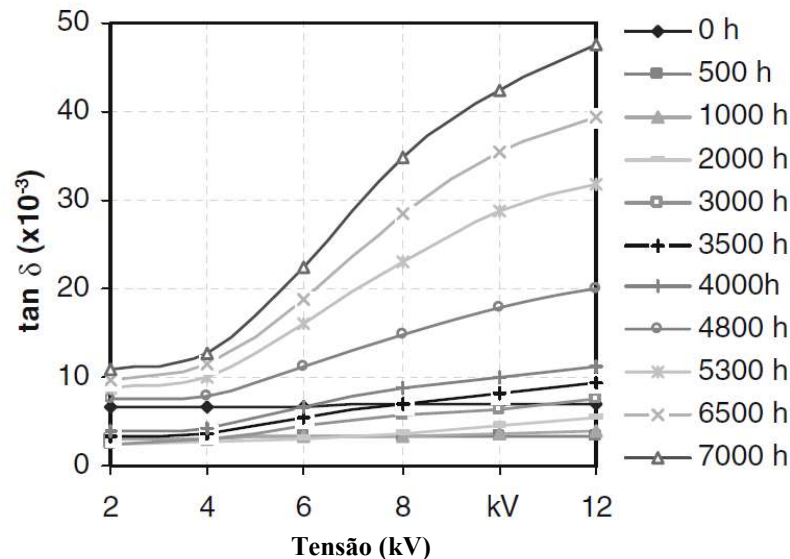


Figura 6.56 – Mudança no fator de perdas durante o envelhecimento.  
Fonte: Adaptado de [76]

Os resultados das medições de descargas parciais antes e após o VET, Figuras 6.57 e 6.58, mostraram uma diminuição no nível das DP para as duas bobinas ensaiadas, comportamento similar ao apresentado pelo fator de perdas dielétricas, a simetria entre as descargas positivas e negativas associadas a um formato triangular indicam a presença de delaminações na isolamento das bobinas. Resultados em que houve diminuição nos valores de DP após o envelhecimento foram apresentados em [29,78].

A Figura 6.60, apresenta os resultados obtidos por [28] em um estudo de sobre o envelhecimento de 50 barras usadas de classe B, observa-se que no estado inicial os níveis de DP eram de aproximadamente 1000 mV, e que após 900 horas diminuíram para aproximadamente 350 mV, e então começaram a aumentar e após 1800 horas, o valor passou para 500 mV, e finalmente no final do ensaio, as 2100 horas, os níveis eram de aproximadamente 1200 mV.

Ressalta-se que além de expulsar a umidade presente no interior da isolação das bobinas o aquecimento também provocou mudança no estado físico do asfalto (sólido para líquido), Figura 6.53, e que em estado líquido preencheu algumas cavidades presentes na isolação e consequentemente contribuiu para a diminuição dos níveis de descargas parciais, a Figura 6.59, a seguir, apresenta um corte na secção transversal de uma das bobinas ensaiadas (número 15), onde se observar o preenchimento de parte da isolação com asfalto (região mais escura).

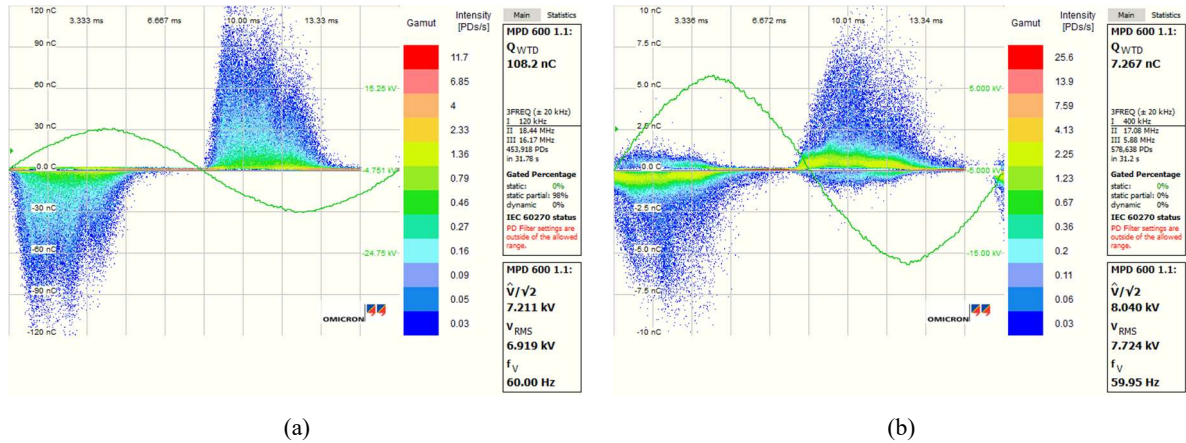


Figura 6.57 – Medição de descargas parciais em 6,9 kV na bobina nº 15 antes e após o VET. (a) Antes do VET; (b) Após o VET.

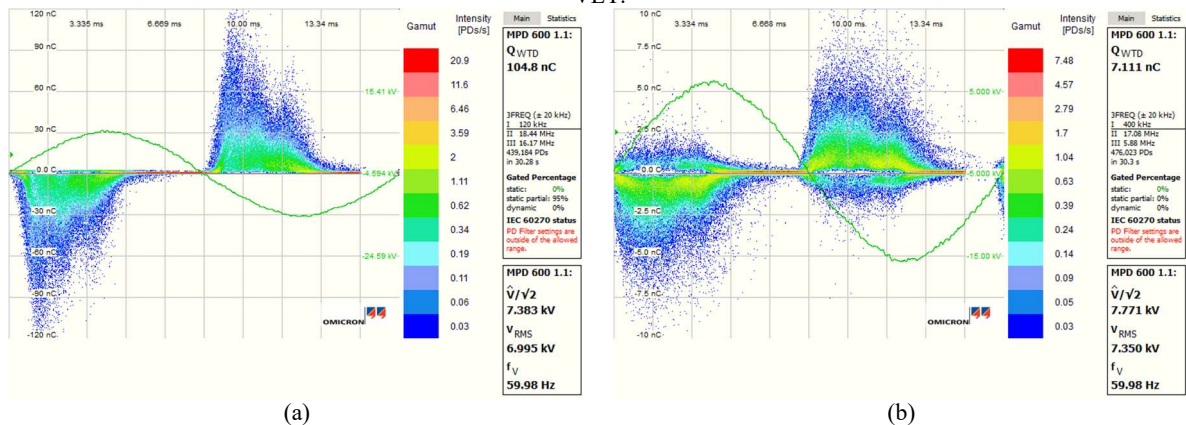


Figura 6.58 - Medição de descargas parciais em 6,9 kV na bobina nº 239 antes e após o VET. (a) Antes do VET; (b) Após o VET.



Região mais escura, indicando que o asfalto preencheu parte da isolação principal.

Figura 6.59 – Corte transversal na bobina nº 15.

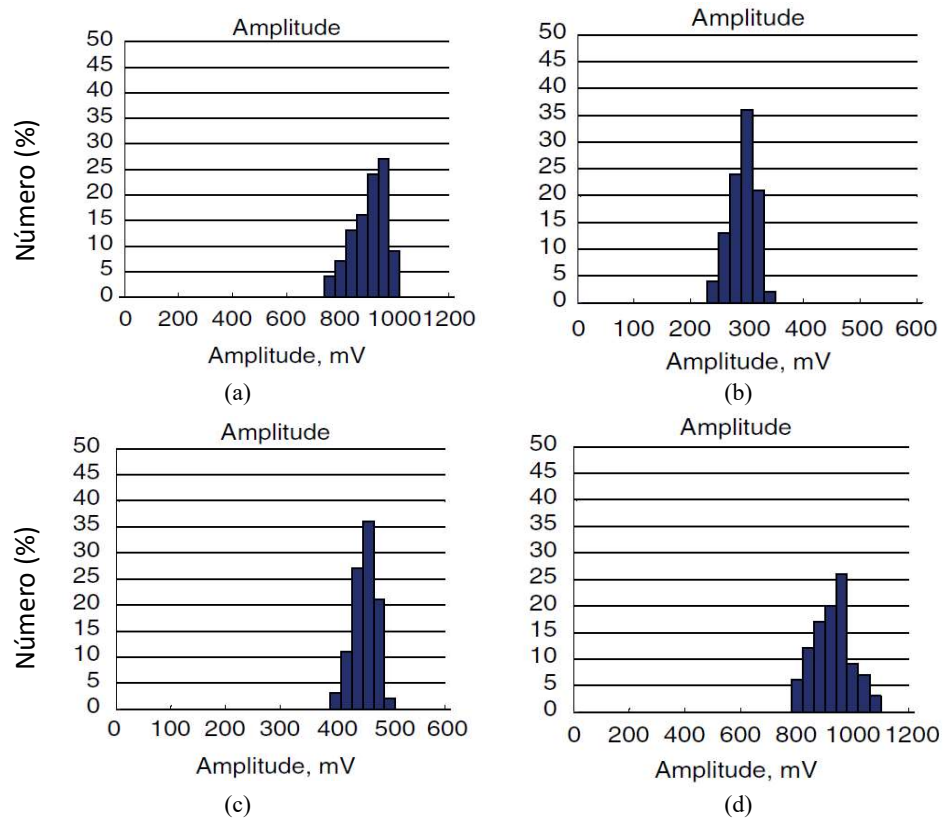


Figura 6.60 – Resultados estatísticos da amplitude de DP. (a) antes do envelhecimento; (b) após 900 horas; (c) após 1800 horas; (d) após 2100 horas.  
Fonte: Adaptado de [28].

### 6.5.3 Monitoração das DP Através do Acoplador Direcional de Microfita

A Figura 6.61, a seguir, apresenta o resultado da monitoração dos níveis de descargas parciais registrados pelo sistema IMA-DP através do acoplador direcional de microfita (curva azul) e do capacitor de acoplamento de 1nF (curva vermelha) durante as 400 horas do ensaio de envelhecimento acelerado, observa-se a diminuição dos níveis de DP ao longo do VET, estando assim de acordo com os resultados discutidos no item anterior.

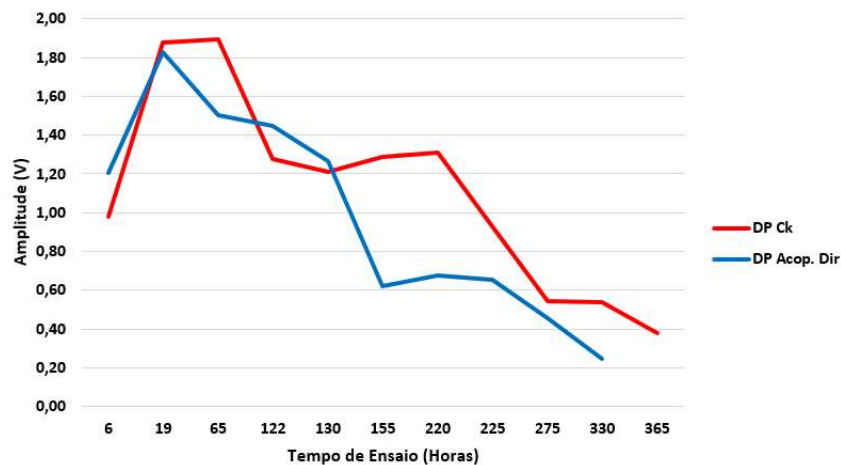


Figura 6.61 – Evolução do nível das DP durante o VET. Sinais medidos pelo Acoplador Direcional versus os Sinais medidos pelo Capacitor de Acoplamento.

As Figuras 6.62 e 6.63, a seguir, apresentam o comportamento dos sinais de DP no domínio do tempo e da frequência, respectivamente, em diferentes momentos do ensaio de envelhecimento acelerado. Observa-se que inicialmente os sinais apresentavam amplitudes bastante elevadas e uma faixa de frequência de até 800 MHz, características de descargas de delaminação, que foram comprovadas através do registro do PRPD apresentado nas Figuras 6.64 (a) e 6.64 (b). Uma diminuição significativa na amplitude dos sinais foi observada a partir de 275 horas, assim como na faixa de frequência, diminuiu para 500 MHz, características de corona na junção entre a camada semicondutiva e a camada para controle do estresse de tensão, que foram comprovadas através registro do PRPD, Figuras 6.64 (c) e 6.64 (d), e pela de inspeção visual apresentada na Figura 6,65.

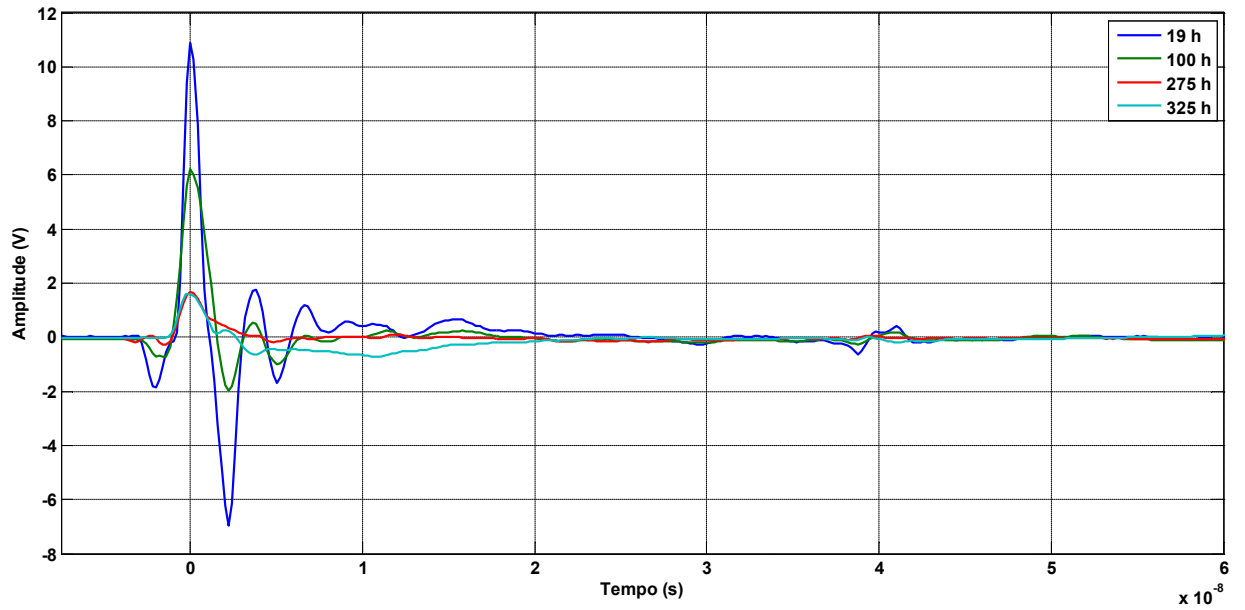


Figura 6.62 - Sinais registrados pelo acoplador direcional de microfita em diferentes momentos do VET.

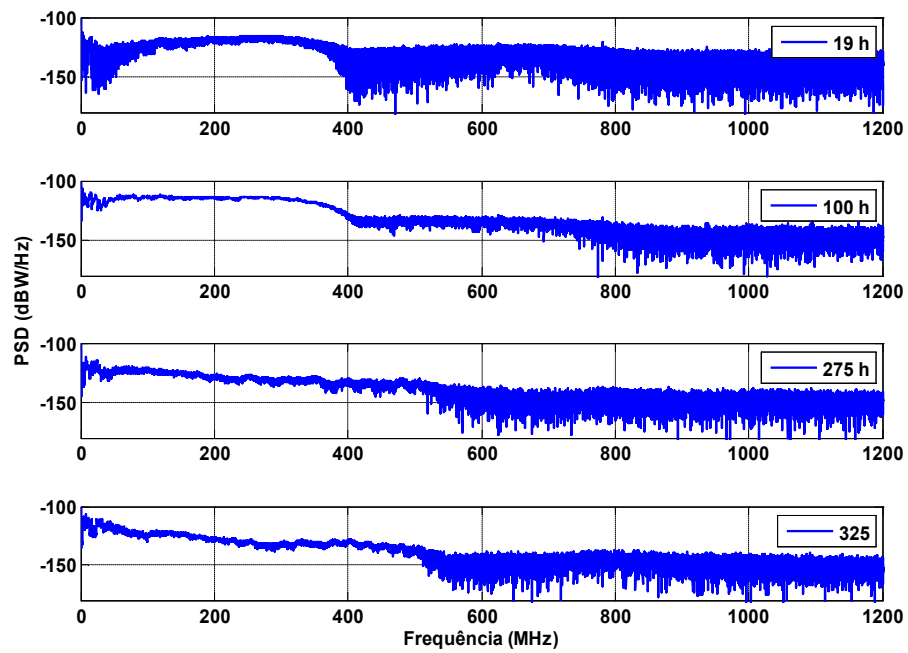


Figura 6.63 - Características UHF dos sinais registrados pelo acoplador direcional de microfita.

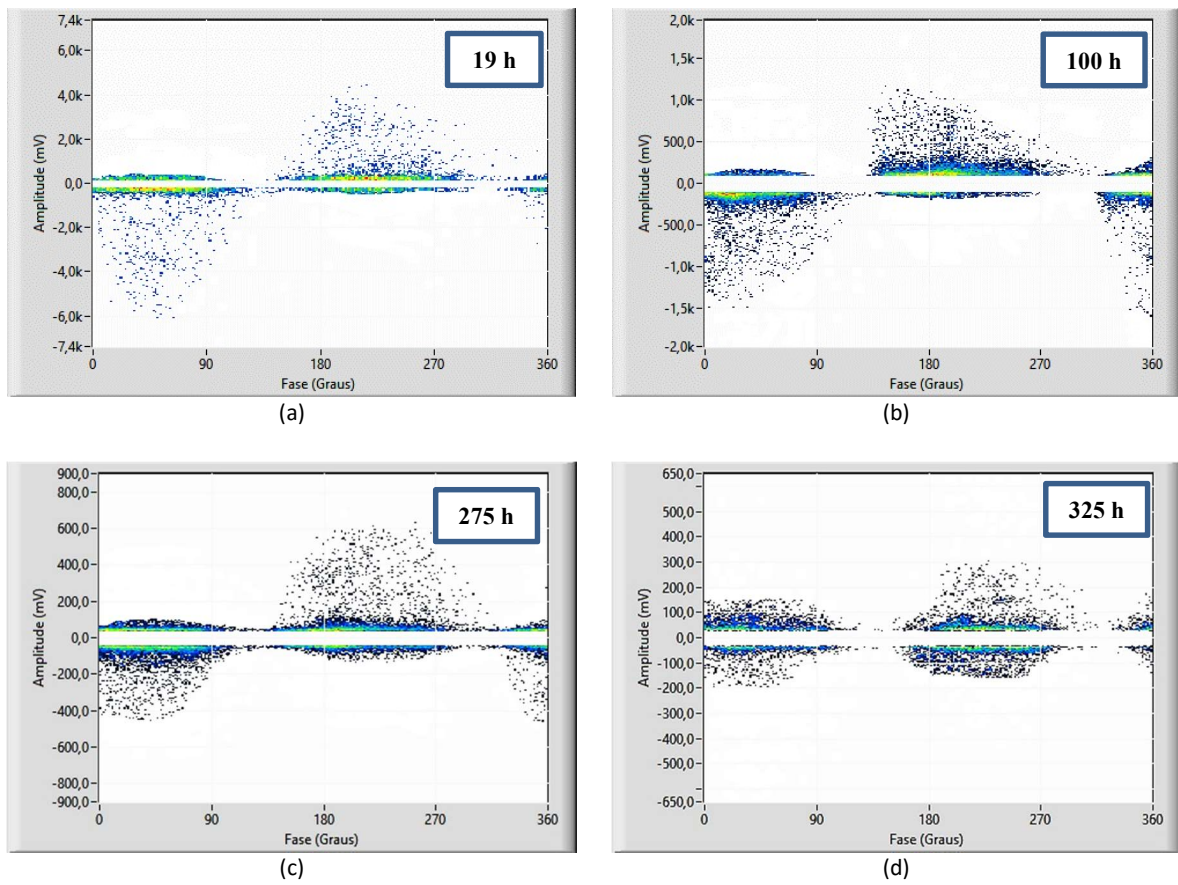


Figura 6.64 – Evolução do PRPD registrado através do acoplador direcional.



Figura 6.65 – Desgaste na zona de transição entre as camadas semicondutora e de estresse de tensão.

## 6.6 AVALIAÇÃO DO ACOPLADOR DIRECIONAL EM UM SISTEMA DE DUAS BOBINAS

Nesta etapa da pesquisa foi realizada a medição de descargas parciais em um sistema de duas bobinas ligadas em paralelo, conforme esquema apresentado na Figura 6.6. Primeiramente, foram realizadas medições individuais de DP nas bobinas 01 e 02, através do capacitor de acoplamento e do acoplador direcional de microfita, e os resultados são apresentados nas Figuras 6.67 (a), 6.67 (b) e 6.67 (c), constatou-se que a bobina 01 apresentava baixos níveis de descargas internas (Figura 6.67 (a)) e a bobina 02 apresentava níveis elevados de descargas de delaminação (Figura 6.67 (b)). O acoplador direcional instalado na bobina 01 também registrou um PRPD característico de descargas internas (Figura 6.67(c)).

Após as medições individuais, as duas bobinas foram ligadas em paralelo e foi realizada a medição de DP pelo do acoplador direcional instalado na bobina 01 através do sistema IMA-DP, o resultado é apresentado na Figura 6.67(d), observa-se que houve mudança padrão PRPD após a ligação da bobina com delaminação, ou seja, o acoplador direcional é capaz de detectar sinais provenientes de outras bobinas. A Figura 6.68, apresenta o comportamento dos sinais registrados pelo acoplador direcional no domínio do tempo e da frequência, nota-se que foram registradas frequências de até 800 MHz, característica de delaminação.

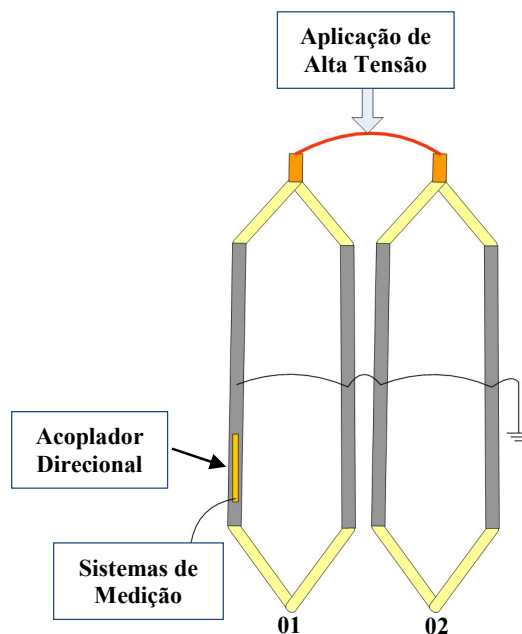


Figura 6.66 – Esquemático de testes para o sistema de duas bobinas.

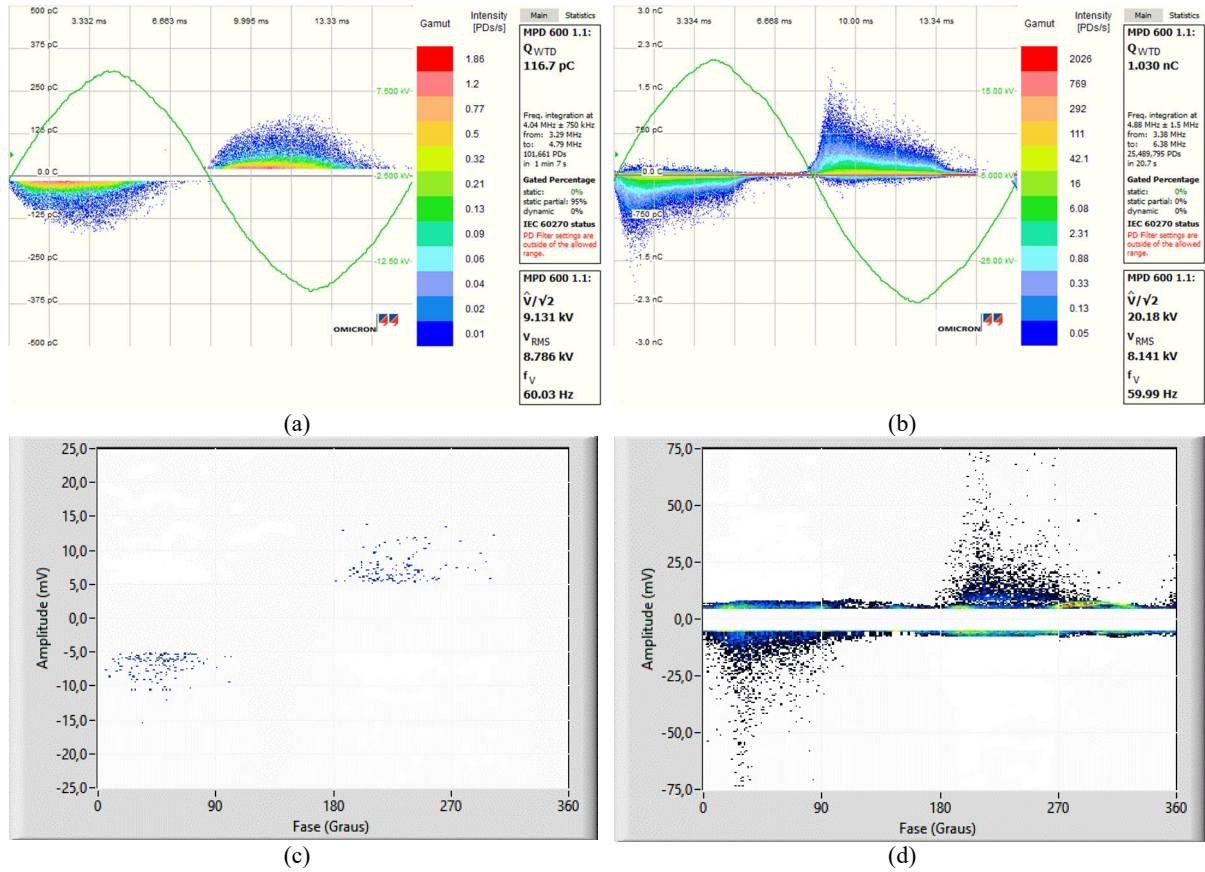


Figura 6.67 – PRPD registrados pelo capacitor de acoplamento e acoplador direcional. (a) Descargas internas registradas pelo capacitor de acoplamento na bobina 01; (b) Descargas de delaminações registradas pelo capacitor de acoplamento na bobina 02; (c) PRPD registrado pelo acoplador direcional na bobina 01 antes do acoplamento da bobina 02, defeituosa; (d) PRPD registrado pelo acoplador direcional na bobina 01 após do acoplamento da bobina 02, defeituosa.

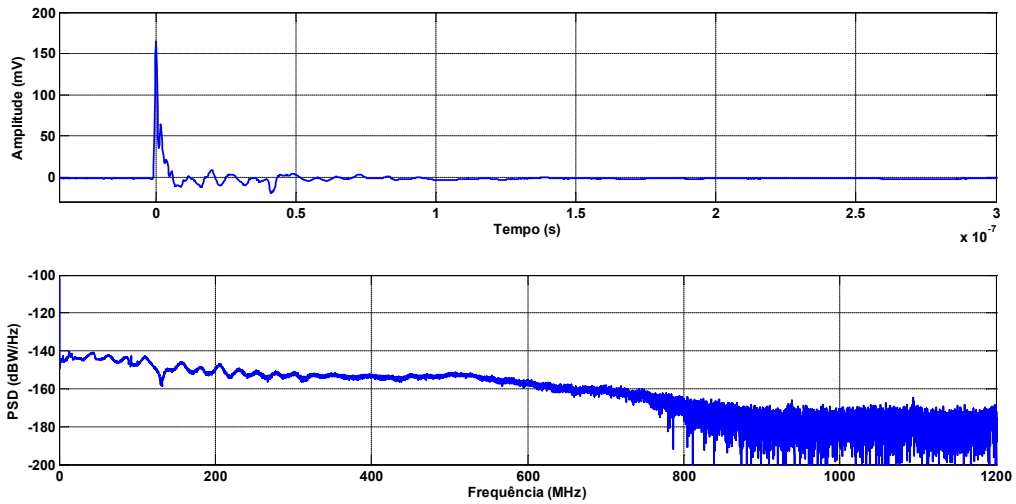


Figura 6.68 - Sinal no domínio do tempo e espectro de frequência medidos pelo acoplador direcional para o sistema de duas bobinas, características de descargas de delaminação.



## 7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A manutenção tem uma importância vital no funcionamento de uma empresa e cabe a ela zelar pela conservação desta, especialmente de máquinas e equipamentos, devendo antecipar-se aos problemas através de um contínuo serviço de observação dos bens a serem mantidos. A escolha da técnica de manutenção mais adequada para cada tipo de equipamento de uma planta de geração de energia elétrica, deve levar em consideração fatores como: importância do equipamento para o processo produtivo, o seu custo de aquisição e a sua taxa de falha [79].

Os hidrogeradores podem desenvolver falhas ou defeitos a partir do seu uso, ocasionando sua parada ou uma diminuição da sua eficiência. Pode-se perceber indícios de defeitos por meio de mudança de sinais de vibrações, variação da temperatura, mudança dos sinais de DP, entre outros. Esta detecção de falhas ou defeitos é possível por meio de técnicas de manutenção preditiva [80].

Em [81], define-se manutenção preditiva como “qualquer atividade de monitoramento que seja capaz de fornecer dados suficientes para uma análise de tendências, emissão de diagnóstico e a tomada de decisão”, e é com essa visão que a Monitoração e Análise de DP deve ser aplicada segundo [82].

Dessa forma a avaliação do sistema de isolamento elétrica dos enrolamentos estatóricos através dos sensores eletromagnéticos propostos nesta tese, exigiu um trabalho extenso envolvendo várias etapas: projeto e confecção dos sensores; montagem de infraestrutura laboratorial para realização dos testes envolvendo alta tensão, tanto para medição de descargas parciais como para o envelhecimento acelerado; utilização de diferentes sistemas de medição; e por fim, análise e diagnóstico das informações coletadas.

Todos os tipos de descargas encontradas nos hidrogeradores (descargas internas, delaminações, corona, descargas de ranhura, descargas de superfície e descargas tipo gap) foram simuladas e avaliadas individualmente através dos sensores eletromagnéticos desenvolvidos e comparadas com o sistema convencional utilizando um capacitor de acoplamento. Os resultados obtidos em laboratório mostraram que é possível caracterizar com precisão todos os tipos de descargas de acordo com as componentes UHF do espectro de frequência dos sinais captados pelos sensores eletromagnéticos. O acoplador direcional apresentou maior sensibilidade em relação as antenas loop e log-periódica, este também, mostrou-se capaz de detectar sinais de defeitos de outras bobinas ligadas em paralelo em relação à bobina em que o mesmo está instalado.

A caracterização dos sinais UHF registrados pelo acoplador direcional durante as 400 horas do ensaio de envelhecimento acelerado se mostrou bastante eficaz. Observou-se uma diminuição na amplitude das descargas, na faixa do espectro de frequência, que inicialmente era 800 MHz e ao final

passou para 500 MHz, e uma mudança do padrão PRPD, que no início tinha característica de delaminação e ao término do ensaio estava caracterizado como corona na zona de transição entre as camadas semicondutiva e de controle de tensão. Os resultados obtidos pelo acoplador direcional foram comparados com o sistema convencional através do capacitor de acoplamento e ambos convergiram para o mesmo resultado.

Os resultados da medição de descargas parciais (pelo acoplador direcional e capacitor de acoplamento) também foram correlacionados com os resultados de outros ensaios dielétricos como: resistência de isolamento, capacitância e fator de perdas dielétricas. Concluiu-se que os níveis de DP diminuíram ao final do ensaio de envelhecimento, porque inicialmente a isolação das bobinas possuía uma certa quantidade de umidade e com o aquecimento no decorrer do ensaio, o sistema de isolação foi ficando seco, esta condição também foi descrita nos trabalhos [28, 75, 76, 77, 78]. Além de expulsar a umidade presente no interior da isolação das bobinas o aquecimento também provocou mudança no estado físico do asfalto (sólido para líquido), o qual em estado líquido preencheu algumas cavidades presentes na isolação (comprovada através da dissecação da bobina) e conseqüentemente contribuiu para a diminuição dos níveis de descargas parciais.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização do ensaio de envelhecimento até a falha da bobina (superior às 400 horas) para que possam ser observado o aumento dos níveis de descargas através do acoplador direcional e modificações no espectro de frequência.

Sugere-se também, que os sinais registrados pelos sensores eletromagnéticos sejam analisados através de diferentes técnicas e processamento digital de sinais, como por exemplo, a transformada Wavelet.

Sugere-se que o acoplador direcional seja instalado em unidade de geração hidráulica para avaliação em campo, onde estarão presentes diferentes fontes de ruído que podem ou não influenciar na medição.

Por fim, sugere-se que os sensores eletromagnéticos sejam aplicados em outros equipamentos do sistema elétrico de potência, como transformadores de potência e subestações isoladas a gás SF<sub>6</sub>. Pois, assim como nos hidrogeradores as descargas parciais nesses equipamentos têm características bem específicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] CARVALHO, A.T., “Caracterização de Bases Wavelet para Redução de Ruído de Banda Larga em Medições de Descargas Parciais em Máquinas Síncronas”. Tese de Doutorado, Programa Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharias, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- [02] PAULINO, M.E., “Uso de Monitoramento On-line de Transformadores para Avaliação da Condição do Ativo”. O Setor Elétrico, ed. 107, 2014.
- [03] STONE, G.C., “A Perspective on Online Partial Discharge Monitoring for Assessment of the Condition of Rotating Machine Stator Winding Insulation”, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 28, 2012, pp. 08-13.
- [04] STONE, G.C., “Condition Monitoring and Diagnostics of Motor and Stator Windings – A Review”, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20, No 6, 2013, pp. 2073-2080.
- [05] INTERNACIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION, “IEC 60270 High Voltage Test Techniques – Partial Discharges Measurements”, Suíça, 2000.
- [06] CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES, “CIGRÉ 392 Survey of Hydrogenerator Failures”, Working Group A1.10, 2009.
- [07] JOHNSON, J.S, WARREN, M., “Detection of Slot Discharges in High-Voltage Stator Windings During Operation”, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 70, 1951, pp. 1998-2000.
- [08] JOHNSON, J.S., “Detection of Slot Surface Discharges in High-Voltage Machine Stator Windings”, Electrical Engineering, vol. 71, 1952, pp. 143-147.
- [09] STONE, G.C, SASIC, M., “Twenty-Five Years of Experience with On-line Partial Discharges Testing of Stator Windings”, International Conference on Industry Application, 2013.
- [10] TAVNER, P.J., JACKSON, R.J., “Coupling of Discharges Current Between Conductor of Electrical Machines”, IEEE Electric Power Application, vol.135, No 6, 1988.
- [11] GEARY, R., KEMP, I.J., WILSON, A., WOOD, J.W., “Toward Improved Calibration in the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery”, Electrical Insulation, IEEE International Symposium on Conference Record, 1990, pp. 295-307.

- [12] STONE, G.C., SEDDING, H.G., CAMPBELL, S.R., "Measurement of Partial Discharges on Operating Turbine Generators with a Novel Wide Band Coupler", Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, vol. 02, 1991, pp. 773-776.
- [13] STONE, G.C., SEDDING, H.G., CAMPBELL, S.R., KEMPNER, G.S., "A New Sensor for Detecting Partial Discharges in Operating Turbine Generators", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No.4, 1991, pp. 700-706.
- [14] ZHU, H., KEMP, I.J., "Pulse Propagation in Rotating Machines and Its Relationship to Partial Discharges Measurements", Electrical Insulation, IEEE International Symposium on Conference Record, 1992, pp. 141-144.
- [15] WOOD, J.W., SEDDING, H.D., HOGG, W.H., KEMP, I.J., ZHU, H., "Partial Discharges in HV Machines: Initial Consideration for PD Specification", IEE Proceeding a Science, Measurement and Technology, vol. 140, No 5, 1993, pp. 409-416.
- [16] HUDON, C., GUUINIC, P., AUDOLI, A., "Investigation of Partial Discharges Signal, Propagation, Attenuation and Pattern Recognition in Stator Winding", Electrical Insulation Magazine, IEEE International Symposium on Conference Record, vol. 1, 1996, pp. 201-205.
- [17] PEMEN, A.J.M., LAAN VAN DER, P.C.T., "Pitfalls of Partial Discharges Measurement on Stator Windings of Turbine Generators", Dielectric Materials, Seventh International Conference on Measurements and Applications, 1996, pp. 394-397.
- [18] KEMP, I.J., ZHOU, C., "Measurement Strategies for PD Testing and Pulse Propagation in Stator Windings", Electrical Insulation, IEEE International Symposium on Conference Record, vol. 1, 1996, pp. 214-217.
- [19] SU, Q., CHANG, C., TYCHSEN, R.C., "Travelling Wave Propagation of Partial Discharges Along Generator Stator Windings", Proceedings of the 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, vol. 2, 1997, pp. 1132-1135.
- [20] MAJOR, S., SU, Q., "A High Frequency Model for the Analysis of Partial Discharges Propagation Along Generator Stator Windings", Electrical Insulation, IEEE International Symposium on Conference Record, 1998, pp. 292-295.
- [21] SU, Q., "Analysis of Partial Discharges Pulse Propagation Along Generator Stator Windings", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 1, 2000, pp. 269-272.

- [22] KAWADA, M., KAWAKAKI, Z.I., MATSUURA, K., “Detection of Partial Discharge in Operating Turbine Generator Using GHz-Band Spatial Phase Difference Method”, International Symposium on Electrical Insulating Materials, in conjunction, 1998, pp. 71-74.
- [23] JIANCHENG, S., HENGKUN, X, YONGHONG, C., “Study on UWB Frequency Characteristics of Partial Discharge as a Criterion of Aging Degree of Stator Winding Insulation”, International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, vol. 01, 2000, pp. 181-184.
- [24] JIA, Z.D., XIE, H.K., “Degradation Diagnosis of Large Stator Winding Insulation Based on Ultra-Wide Band Partial Discharge Detecting Technique”, International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2001, pp. 697-700.
- [25] JIA, Z.D., XIE, H.K., “Assessment of Stator Winding Insulation Degradation in Large Generator by Ultra-Wide Band PD Detection”, IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, 2002, pp. 135-139.
- [26] BO, Y., XIAOLIN, C., XIANG, S., XIE, H., “Study on the Aging Condition of Stator Bar Based on Ultra-wideband PD Detection Technique”, Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003, pp. 220-223.
- [27] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, “IEEE Std 1434 Guide to Measurement of Partial Discharge in Rotating Machinery”, USA, 2000.
- [28] LI, X., LIL, C., WANG, W., WAN, W., SHED, X, “Application of UHF on Partial Discharge Detection in Generator Stator Bar”, International Conference on Solid Dielectrics, vol. 02, 2004, pp. 676-678.
- [29] CHEN, X., CHENG, Y., Y., BO Y., XIE, H., “Study of epoxy/mica insulation deterioration in generator stator using ultra-wide band partial discharge testing technique”, Science Direct, Elsevier, 2006, pp. 724-730.
- [30] CHEN, X., CHENG, Y., Y., BO Y., XIE, H., SONG, J., “Diagnosis of Stator Winding Insulation of Large Generator Based on Partial Discharge Measurement”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, No. 2, 2006, pp. 387-395.
- [31] INTERNACIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION, “IEC 60034-27-2 Rotating Electrical Machines – Part 27-2: On-line Partial Discharges Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Electrical Machines”. Suíça, 2012.

- [32] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, “IEEE Std 1434 Guide to Measurement of Partial Discharge in AC Rotating Machinery”, USA, 2014.
- [33] SÁNCHEZ, R.A., “Medida de Descargas Parciales en Radiofrecuencia”, Tese de Doutorado, Universidad Carlos III de Madri, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2014.
- [34] OLIVEIRA, R.M.S, BRASIL, F.S., VILHENA, P.R.M., DMITRIEV, V., ZAMPOLO, R.F., “Analysis and Comparison of Sensors for Measurements of Partial Discharges in Hydrogenerator Stator Windings” JMOE Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, 2015, pp. 197-216.
- [35] BRASIL, F.S., VILHENA, P.R.M., OLIVEIRA, R.M.S, DMITRIEV, V., ZAMPOLO, R.F., “Spectral Method for Localization of Multiple Partial Discharges in Dielectric Insulation of Hydro-Generator Coils: Simulation and Experimental Results”, não publicado, submetido a revista JMOE Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, em janeiro de 2016.
- [36] BRASIL, F.S., VILHENA, P.R.M., DMITRIEV, V., “Estudo de Técnicas de Medição de Descargas Parciais nos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores”, In: V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu, Brasil, 2014.
- [37] VILHENA, P.R.M., BRASIL, F.S., OLIVEIRA, R.M.S, DMITRIEV, V., ZAMPOLO, R.F., “Estudo Experimental de Técnicas de Medição de Descargas Parciais nos Enrolamentos do Estator de Hidrogeradores - Validação de um Novo Sensor do Tipo *Stator Slot Coupler*”, In: XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Foz do Iguaçu, Brasil, 2014.
- [38] FITZGERALD, A.E., KINGLEY, C., UMANS, S.D., “Máquinas Elétricas – Com Introdução a Eletrônica de Potência”, 6ª Edição, Bookman, 2004.
- [39] UEMORI, M., ROCHA, J., “Fundamentos de Projetos e Reabilitação de Geradores para Centrais Hidrelétricas”, Princípios de Manutenção e Reabilitação de Geradores Síncronos, Brasil, 2012.
- [40] STONE, G.C., BOULTER, E.A., CULBERT, I., DIRHANI, H., “Electrical Insulation for Rotating Machines”, Wiley Interscience/ IEEE Press, USA, 2004, pp. 01-40.
- [41] OLIVEIRA, W., UERMORI, M., ROCHA, J., DIAS, C., “Barras Roebel Versus Bobinas de Múltiplas Espiras: Impactos na Reabilitação de Hidrogeradores”, In: XXI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo de Estudo de Geração Hidráulica – GGH, Florianópolis, Brasil, 2011.

- [42] MARQUES, A.P., SÁ, L.C.R., “Avaliação de Envelhecimento em Barras de Estator de Hidrogeradores”, In: XV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo de Estudo de Geração Hidráulica – GGH, Foz do Iguaçu, Brasil, 1999.
- [43] SUMEREDER, C., “Statistical Lifetime of Hydro Generators and Failure Analysis”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, No. 3, 2008, pp. 678-685.
- [44] TAYLOR, N., “Dielectric Response and Partial Discharge Measurements on Stator Insulation at Varied Low Frequency”. Tese de Doutorado, School of Electrical Engineering, Suécia, 2010.
- [45] STONE, G.C., SASIC, M., DUNN, D., CULBERT, I., “Recent Problems Experienced With Motor and Generation Windings”, Copyright Material IEEE, No. PCIC-2009-6, 2009.
- [46] CUENCA, W.M.H., “Caracterização dos Sinais de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão a Partir de Modelos Experimentais”. Tese de Doutorado, Programa Pós-Graduação de Engenharias, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [47] NAIDU, M.S., KAMARAJU, V., “High Voltage Engineering – Second Edition”. 2ªed, McGraw-Hill, USA, 1996, pp.01-48.
- [48] FAIER, J.M., “Curvas Principais Aplicadas na Identificação de Descargas Parciais em Equipamentos de Potência”. Dissertação de Mestrado, Programa Pós-Graduação de Engenharias, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.
- [49] STONE, G.C., KAPLER, J., “Stator Winding Monitoring”, IEEE Cement Industry Conference, 1998, pp. 15-20.
- [50] BARTINIKAS, R., “Corona Discharges Processes in Voids”. In: BARTINIKAS, R., MACMAHON, E.J., Engineering Dielectrics: Corona Measurement and Interpretation Vol. I, Chapter 2, Philadelphia, ASTM, 1979, pp. 22-67.
- [51] HUDON, C., BÉLEC, M., “Partial Discharges Signal Interpretation for Generator Diagnostics”, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 12, No. 2, 2005, pp. 297-319.
- [52] CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES, “CIGRÉ 366 Guide for Partial Discharges Measurements in Compliance to IEC 60270”. Working Group D1.33, 2008.
- [53] AMORIM, H.P., LEVY, A.F.S., CARVALHO, A.T., “Medições de Descargas Parciais no Campo – Aspectos Práticos em Geradores e Motores”. In: XIII ERIAC Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré, Comitê de Estudos A1 – Máquinas Elétricas Rotativas, Puerto Iguazú, Argentina, 2009.

- [54] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, “IEEE Std 145 Definitions of Term for Antennas”, USA, 2014.
- [55] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES – ANATEL, “Resolução Número 610, de 18 de abril de 2013”. Disponível em: < <http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2013/449-resolucao-610#item4> >. Acesso em 03 de abril de 2016.
- [56] BALANIS, C. A., “Teoria de Antenas – Análise e Síntese”, Volume 1, Ed. LTC, 3ª Ed., 2009.
- [57] KAWAKATSU, W.M., “Descargas Parciais em Barras Estatóricas de Hidrogeradores: Modelagem por Guia de Onda e Modelagem de um Acoplador”. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, 2009.
- [58] ROZI, F., KHAYAM, U., “Development of Loop Antennas for Partial Discharge Detection”, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Vol. 7, No. 1, 2015, pp. 29-41.
- [59] ROZI, F., KHAYAM, U., “Design, Implementation and Testing of Triangle, Circle, and Square Shaped Loop Antennas as Partial Discharge Sensor”, IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy, 2014, pp. 273-276.
- [60] CAVALLINIL, A., MONTANARIL, G. C., CANDELA, R., TESTA, L., “Partial Discharges Detection in Medium Voltage Systems Using Directional Antennas Sensors”, Annual Report Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena, 2008, pp. 455-458.
- [61] ROBLES, G.; MARTÍNEZ-TARIFA, J.M.; ROJAS-MORENO, M.V.; ALBARRACÍN, R.; ARDILA-REY, J, “Antenna Selection and Frequency Response Study for UHF Detection of Partial Discharges”, IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012, pp. 1496-1499.
- [62] ROHDE SCHWARZ, HL223, Disponível em < [http://www.rohde-schwarz.de/file\\_18943/HL223\\_catalog\\_2013\\_96\\_97.pdf](http://www.rohde-schwarz.de/file_18943/HL223_catalog_2013_96_97.pdf) >. Acesso em 03 de abril de 2016.
- [63] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. “IEEE Std. 1043 Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils”, USA, 2009.
- [64] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. “IEEE Std.1553 Trial-Use Standard for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Coils and Bars for Hydrogenerators”, USA, 2002.
- [65] CAMERON A. W. W., KURTZ M., “A Utility's Functional Evaluation Tests for High-Voltage Stator Insulation”, Vol. 78, 1959, pp. 178-183.



- [66] WARD, B. E., STONE, G. C., KURTZ, M., “A Quality Control Test for High Voltage Stator Insulation”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 3, No. 5, 1987, pp. 12-17.
- [67] BRASIL, F.S., FRANÇA, A.L.C., SENA, J.A.S., SANTOS, O.G., SOUSA, I.C.B. “Implementação e Automação do Ensaio de Envelhecimento Acelerado em Barras ou Boninas Estatóricas no Centro de Tecnologia da Eletrobras Eletronorte”. In: 30º Congresso Brasileiro de Manutenção e Gestão de Ativos, Campinas, Brasil, 2015.
- [68] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. “IEEE Std. 43 Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery”, USA, 2000.
- [69] INTERNACIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION, “IEC 60085 - Electrical Insulation-Thermal Evaluation and Designation”, 3 ed, 2004.
- [70] BOULTER, E.A., STONE, G., “Historical Development of Rotor and Stator Winding Insulation Materials and Systems”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 20, No 3, 2004, pp. 25-39.
- [71] ROCHA, J., “Una Vision Holística del Sistema de Prevención de Descargas Parciales”, In: XVI Encuentro Regional Iberoamericano del Cigre – XVI ERIAC, Puerto Iguazú, 2015.
- [72] GE INDUSTRIAL SOLUTIONS, Disponível em <  
<http://apps.geindustrial.com/publibrary/checkout/GEgard?TNR=Service%20and%20Maintenance%7CGEGARD%7Cgeneric>>. Acesso em 03 de abril de 2016.
- [73] INTERNACIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION, “IEC 60034-27 Rotating Electrical Machines - Off-line Partial Discharge Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Electrical Machines”, 2007.
- [74] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. “IEEE Std. 286 Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation”, 2000.
- [75] LIU, F., HUANG, X., JIANG, P., “Diagnosis of Generator Stator Winding Insulation Based on Dissipation Factor Measurement”, Conference Proceedings of ISEIM, 2014, pp. 120-123.
- [76] FARAHANI, M., BORSI, H., GOCKENBACH, E., "Study of Capacitance and Dissipation Factor Tip-Up to Evaluate the Condition of Insulating Systems for High Voltage Rotating Machines”, Electrical Engineering (Archiv fur Elektrotechnik), vol. 89, no. 4, 2007, pp. 263-270.

- [77] FERNANDO, M., NARANPANAWA, W., RATHNAYAKE, R., “Condition Assessment of Stator Insulation during Drying, Wetting and Electrical Ageing”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 20, No. 6; 2013, pp. 2081-2090.
- [78] ZHU, H., HALLDORSON, G., “Comparison of PD and DF Test Results Before and After Voltage Endurance Tests”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2004, pp. 422-425.
- [79] NEPOMUCENO, L. X., “Técnicas de Manutenção Preditiva”, Editora Edgard Blücher Ltda; Volume 2, 1989.
- [80] BARONI, Tarcísio et al., Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas, Ed. Qualitymark. Rio de Janeiro, 2002.
- [81] R. L. Da S. SANTOS, R. C. L. de OLIVEIRA, J. C. LEITE, “Metodologia de Diagnóstico de Manutenção Baseada em Condição de Enrolamentos Estatóricos em Hidrogeradores”, 1º CONEPRO-SUL, Joinville-SC, Brasil, 2010.
- [82] VILHENA, P.R.M., “Sistema para Detecção, Localização e Monitoramento de Descargas Parciais em Estatores de Hidrogeradores” Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará – UFPA, 2015.