

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

FERNANDO DE SOUZA BRASIL

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE
DESCARGAS PARCIAIS NOS ENROLAMENTOS ESTATÓRICOS DE
HIDROGERADORES**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Belém – PA
2013

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

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE
DESCARGAS PARCIAIS NOS ENROLAMENTOS ESTATÓRICOS DE
HIDROGERADORES**

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica do Instituto de
Tecnologia da Universidade Federal
do Pará como requisito para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia
Elétrica

FERNANDO DE SOUZA BRASIL

ORIENTADOR: PROF. DR. VICTOR DMITRIEV

Belém – PA
2013

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

AUTOR: **FERNANDO DE SOUZA BRASIL**

Título: Estudo Experimental de Técnicas de Medição de Descargas Parciais nos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: **10/07/2013**

BANCA EXAMINADORA:

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

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

Prof. Dr. Ronaldo de Freitas Zampolo
(Membro – PPGEE/UFPA)

VISTO:

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

Se não puder voar, corra.
Se não puder correr, ande.
Se não puder andar, rasteje,
mas continue em frente de
qualquer jeito.

Martin Luther King

DEDICATÓRIA

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

Fernando de Souza Brasil

AGRADECIMENTOS

A todos os professores, que de uma forma ou outra, contribuíram para minha formação acadêmica.

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

A todos os amigos da Eletrobras Eletronorte, que contribuíram direta ou indiretamente para o êxito deste trabalho.

Fernando de Souza Brasil

RESUMO

BRASIL, F.S., **Estudo experimental de técnicas de medição de descargas parciais nos enrolamentos estatóricos de hidrogeradores**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 2013. 77p.

Este trabalho tem como objetivo geral analisar experimentalmente técnicas para medição de descargas parciais nos enrolamentos estatóricos de hidrogeradores. Para atingir o objetivo proposto, primeiramente foi realizado um estudo bibliográfico sobre como é a estrutura dos enrolamentos do estator, com ênfase na isolação elétrica, assim como os conceitos de descargas parciais e técnicas empregadas para medição em hidrogeradores. Em seguida, foi montado em laboratório um arranjo experimental para o estudo das técnicas de medição de descargas parciais nos enrolamentos do estator utilizando seis acopladores diferentes, sendo quatro acopladores capacitivos convencionais de 80, 220, 500 e 1000 pF, e dois sistemas experimentais, uma antena SSC fabricada com microfita e um cabo coaxial RG 58, desencapado, utilizado como antena. A avaliação da sensibilidade destes seis sistemas foi dividida em duas etapas: primeiro foi analisada a resposta dos acopladores à aplicação de um sinal conhecido de calibração e, em seguida, foi analisada a resposta dos mesmos durante ensaios com alta tensão. Para aplicação de um sinal conhecido de calibração os acopladores capacitivos apresentaram maior sensibilidade em relação à antena e ao cabo coaxial. Já a resposta durante os ensaios com alta tensão mostrou que a sensibilidade da antena é maior que a do método convencional de medição de descargas parciais em hidrogeradores, baseado em acopladores capacitivos de 80 e 220 pF. Os resultados obtidos em laboratório mostraram que a medição de descargas parciais através da antena pode ser realizada de forma satisfatória na avaliação da condição operacional dos enrolamentos do estator de hidrogeradores, sem perda significativa de informação e com aumento significativo de sensibilidade na quantificação do fenômeno, cerca de duas vezes maior que a sensibilidade do acoplador de 220 pF e quatro vezes a do acoplador de 80 pF.

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

ABSTRACT

BRASIL, F.S., **Experimental study of techniques for partial discharges measurements in the stator windings of hydrogenerators**. Master Degree Dissertation. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, 2013. 77p.

This paper aims at analyzing experimental techniques for partial discharges measuring in the stator windings of hydrogenerators. To reach the goal, first proposed a study of the literature on how the structure of the stator windings, with an emphasis on electrical insulation, as well as the concepts of partial discharges and techniques used for measuring in hydrogenerators. It was then mounted in a laboratory arrangement for studying techniques for measuring partial discharges in the stator winding using six different couplers, four conventional capacitive couplers 80, 220, 500 and 1000 pF, and two experimental systems, an antenna, ribbon coaxial cable and RG 58, bare used with the antenna function. The evaluation of the sensitivity of these six systems has been divided in two steps: first were analyzed the responses of couplers applying a known calibration signal, and then analyzed the response of the same high voltage during testing. For application of a known signal calibration the capacitive couplers showed greater sensitivity than antenna and coaxial cable. Already during the response tests showed that the High Voltage sensitivity of the antenna tape is larger than the conventional method of measuring partial discharges in hydro using capacitive couplers 80 and 220 pF. The results obtained in the laboratory showed that the measurement of partial discharges through the antenna tape can be performed satisfactorily in the evaluation of the operating condition of the stator windings of hydro, without either significant loss of sensitivity information or the quantification of the phenomenon.

Keywords: Partial discharges, hydrogenerators, stator windings.

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO – INTRODUÇÃO	1
1.1	JUSTIFICATIVA	1
1.2	MOTIVAÇÃO.....	1
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	2
1.3.1	Objetivo Geral	2
1.3.2	Objetivos Específicos	2
1.4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
1.5	ESCOPO DO TRABALHO.....	4
2	CAPÍTULO – ENROLAMENTOS DO ESTATOR	6
2.1	ESTRUTURA DOS ENROLAMENTOS DO ESTATOR	7
2.1.1	Estrutura das Bobinas	7
2.1.2	Barra (Meia Bobina) ou Barras Roebel	7
2.1.3	Bobinas de Múltiplas Espiras	9
2.2	TIPOS DE ISOLAÇÃO	10
2.3	FALHAS NO ISOLAMENTO DO ESTATOR.....	13
2.3.1	Falhas Em Máquinas Rotativas	13
2.3.2	Causas de Falhas nos Enrolamentos do Estator	15
3	CAPÍTULO – DESCARGAS PARCIAIS	17
3.1	FÍSICA DAS DESCARGAS PARCIAIS.....	17
3.1.1	Ionização dos Átomos de um Material Isolante	17
3.1.2	Forma do Pulso das Descargas Parciais	19
3.1.3	Deslocamento do Pulso nos Enrolamentos do Estator	20
3.1.3.1	Transmissão	20
3.1.3.2	Acoplamento Capacitivo	21
3.1.3.3	Radiação	22
3.2	CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA CAVIDADE.....	23
3.3	FONTES DE DESCARGAS PARCIAIS NO ISOLAMENTO DO ESTATOR.....	25
3.3.1	Descargas Internas	25
3.3.1.1	Cavidades Internas.....	25
3.3.1.2	Delaminação Interna.....	26
3.3.1.3	Delaminação entre Condutores e a Isolação	26
3.3.1.4	Arborescência (<i>treeing</i>) Elétrica.....	26
3.3.2	Descargas de Ranhura (<i>Slot Discharges</i>)	26
3.3.3	Descargas na Cabeça da Bobina (<i>End-Winding</i>)	27
3.3.3.1	Descargas de Superfície	27

3.3.3.2	Descargas entre Fases.....	27
3.3.4	Partículas Condutivas	27
3.4	GRANDEZAS ASSOCIADAS AS DESCARGAS PARCIAIS.....	29
3.4.1	Carga Aparente q	29
3.4.2	Taxa de Repetição de Pulso, n	29
3.4.3	Ângulo de Fase das Descargas Parciais e Tempo de Ocorrência dos Pulsos	29
3.4.4	Tensão de Início de Descargas Parciais.....	29
3.4.5	Tensão de Extinção de Descargas Parciais.....	29
3.4.6	Frequências de Corte Inferior e Superior, f_1 e f_2	30
3.4.7	Largura de banda, Δf	30
3.5	DESCARGAS PARCIAIS ASSOCIADAS À FASE – OS MAPAS ESTATÍSTICOS	30
4	CAPÍTULO – MÉTODOS E INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS	32
4.1	MÉTODOS ELÉTRICOS DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS	32
4.1.1	Medição do Pulso Elétrico	32
4.1.2	Medição da Radiação de Rádio Frequência.....	33
4.2	CARACTERÍSTICAS DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO SINAL.....	33
4.2.1	Faixas de Baixas Frequências.....	34
4.2.2	Faixa de Altas Frequências.....	34
4.2.3	Faixa de Frequências Muito Altas	34
4.2.4	Faixa de Frequências Ultra Altas.....	35
4.3	SENSORES DE DESCARGAS PARCIAIS.....	37
4.3.1	Acoplamento Capacitivo.....	37
4.3.2	Acoplador na Ranhura do Estator (<i>Stator Slot Coupler - SSC</i>).....	39
4.4	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS.....	39
4.4.1	Processamento Analógico dos Sinais de Descargas Parciais.....	40
4.4.2	Processamento Digital dos Sinais de Descargas Parciais	40
5	CAPÍTULO – METODOLOGIA	43
5.1	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	43
5.2	ARRANJO EXPERIMENTAL	45
5.3	INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS	46
5.4	TRATAMENTO DOS DADOS.....	46
6	CAPÍTULO – ESTUDO EXPERIMENTAL E RESULTADOS.....	47
6.1	AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DOS SENSORES	47
6.1.1	Aplicação um Sinal Conhecido de Calibração	47
6.1.2	Ensaio com Alta Tensão	52

6.2	MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS NO CAMPO.....	56
7	CAPÍTULO – CONCLUSÕES.....	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – (a) Estator completo: enrolamentos fixados no núcleo; (b) Rotor completo; (c) Máquina completa: Estator + Rotor.....	6
Figura 2.2 – (a) Barra Roebel ondulada; (b) Barra Roebel Imbricada.....	8
Figura 2.3 – Transposição Roebel 360°.....	9
Figura 2.4 – (a) Estrutura do enrolamento imbricado; (b) Estrutura do enrolamento ondulado.	9
Figura 2.5 - Corte de uma ranhura com bobinas de múltiplas espiras.....	10
Figura 2.6 – Bobina de múltiplas espiras.	10
Figura 2.7 – Isolação de bobinas com múltiplas espiras.	11
Figura 2.8 – Isolação de uma barra Roebel.	11
Figura 2.9 – Desenvolvimento das dimensões dos sistemas de isolação das máquinas rotativas desde o início.	12
Figura 2.10 – Causas raízes de falhas em hidrogeradores.	14
Figura 2.11 – Causas de falhas no sistema de isolação elétrica.	14
Figura 2.12 – Descargas de ranhura.....	16
Figura 2.13 – Descargas parciais ocorrendo entre bobinas em duas fases diferentes.	16
Figura 3.1 – Processo de avalanche de elétrons iniciado a partir de um eletrodo negativo. a) Início; b) Formação de um par de elétrons – impacto de um elétron com um átomo neutro libera um elétron adicional e deixa um íon positivo para trás; c) Multiplicação – os elétrons se movem criando íons positivos quando se multiplicam.....	18
Figura 3.2 – Típico pulso de descargas parciais.	20
Figura 3.3 – (a) Barra Roebel com diversas cavidades; (b) Circuito equivalente.....	23
Figura 3.4 – Tensões e correntes no circuito equivalente das descargas parciais.	24
Figura 3.5 – Fontes de descargas parciais no isolamento do estator.	28
Figura 3.6– Mapa estatísticos das descargas parciais.	30
Figura 4.1 – Resposta em frequência de um pulso de DPs 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.....	36
Figura 4.2 – Acopladores capacitivos: a) Instalado no interior do enrolamento; b) Instalado na saída de fase.	38
Figura 4.3 – Impedância de medição de descargas parciais.....	38
Figura 4.4 – Esquema simplificado do SSC.	39
Figura 4.5 - Diagrama de blocos de um instrumento analógico de medição de DPs.	40

Figura 4.6 – Diagrama de blocos de instrumentos digitais de medição de DPs: (a) Pre-processamento analógico e pós-processamento digital dos pulsos de DPs; (b) Pre-processamento e pós-processamento digital dos pulsos de DPs.....	41
Figura 5.1 – Síntese da trajetória da pesquisa.....	44
Figura 5.2 – Diagrama do circuito de ensaio.....	45
Figura 5.3 – Circuito montado em laboratório.....	45
Figura 6.1 – Circuito usado experimentalmente em [39].....	47
Figura 6.2 – (a) Acopladores utilizados no estudo; (b) Utilização do acoplador de 500 pF...	48
Figura 6.3 - Resposta do capacitor de 80 pF ao sinal do calibrador. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência.....	48
Figura 6.4 – Resposta do capacitor de 220 pF ao sinal do calibrador. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência.....	48
Figura 6.5 – Resposta do capacitor de 500 pF ao sinal do calibrador. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência.....	49
Figura 6.6 - Resposta do capacitor de 1000 pF ao sinal do calibrador. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência.....	49
Figura 6.7 – (a) Antena utilizada; (b) Antena instalada na barra.....	49
Figura 6.8 – Sinais captados pela antena próxima a fonte. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência.....	51
Figura 6.9 – Sinais captados pela antena distante da fonte. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência.....	51
Figura 6.10 – (a) Cabo coaxial utilizado no estudo; (b) Utilização do cabo coaxial como antena.....	51
Figura 6.11 – Sinal registrado com 26 cm de cabo coaxial. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência.....	52
Figura 6.12 – Amplitude do sinal em função com comprimento do cabo.....	52
Figura 6.13 – Comparação entre os diferentes sistemas de medição durante os ensaios com alta tensão. (a) Máxima amplitude; (b) Magnitude máxima do sinais pela frequência.	52
Figura 6.14 – Procedimento de ensaio utilizado durante as medições de descargas parciais.	53
Figura 6.15 – Padrão de DPs, medido a 15 kV pelo acoplador de 80 pF. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência; (c) Mapa estatístico.....	54
Figura 6.16 - Padrão de DPs, medido a 15 kV pelo acoplador de 220 pF. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência; (c) Mapa estatístico.....	54
Figura 6.17 – Antena instalada na barra para os ensaios com alta tensão. (a) Instalada na ranhura; (b) Instalada na extremidade da barra, região com maior intensidade campo elétrico.....	55

Figura 6.18 - Padrão de DPs, medido a 15 kV pela antena. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência; (c) Mapa estatístico. 55

Figura 6.19 – Comparação entre os diferentes sistemas de medição durante os ensaios com alta tensão. (a) Máxima amplitude; (b) Magnitude máxima do sinais pela frequência. 56

Figura 6.20 – Sinal de descarga registrado na fase A da máquina 2. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência; (c) Mapa estatístico..... 57

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Tipos de falhas nos enrolamentos do estator.	15
Quadro 3.1 – Padrões de mapas estatísticos de descargas parciais.	31

LISTA DE SIGLAS

DP – Descarga Parcial.

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

SSC – Stator Slot Coupler.

RF – Radio Frequência.

1 CAPÍTULO – INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

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 é cada vez mais difícil desligar um equipamento para realizar manutenção, as concessionárias devem arcar com energia elétrica disponível para atender as 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 [1].

Paradas de máquinas não planejadas devido à falta de confiabilidade e falhas de equipamentos fizeram com que os mantenedores dessem um passo fundamental na estratégia de manutenção de geradores. A fim de solucionar esse problema, vários pesquisadores e estudiosos da área de grandes máquinas rotativas descobriram que estas falhas, na grande maioria das vezes, estavam relacionadas ao aumento do nível de descargas parciais (DPs) da isolação elétrica da máquina [2]. A ocorrência das DPs nos sistemas isolantes dos equipamentos de alta tensão é um sintoma de fragilidade na sua suportabilidade dielétrica e cuja evolução pode vir a acarretar graves consequências para o equipamento.

Pelo exposto, justifica-se a necessidade de se estudar o fenômeno das DPs que ocorrem nos enrolamentos do estator de máquinas rotativas, que na maioria das vezes é sintoma de defeitos elétricos e antecipações de falhas, que são originadas por diversas causas.

1.2 MOTIVAÇÃO

O fator que motivou a realização deste trabalho foi a necessidade de se construir um arranjo físico experimental em laboratório, utilizando parte do enrolamento do estator (uma barra Roebel ou meia bobina) retirada de uma máquina que já estava em operação há vários anos, para se realizar os mais variados testes de descargas parciais, já que na maioria das vezes a máquina não está disponível para realização destes testes, que só poderiam ser realizados se a máquina estivesse parada.

Com o arranjo pronto foi possível realizar a análise da propagação dos sinais de DPs através de uma barra, desde a fonte de DPs até o sistema de medição. Foi possível também

avaliar a resposta de diferentes sistemas de medição, como acopladores capacitivos e antenas.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar experimentalmente técnicas para medição de descargas parciais nos enrolamentos do estator de hidrogeradores.

1.3.2 Objetivos Específicos

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

1. Apresentar a estrutura dos enrolamentos do estator, com ênfase na isolamento elétrica, assim como os conceitos de descargas parciais e técnicas empregadas para medição;
2. Montar em laboratório um arranjo experimental para o estudo das técnicas de medição de descargas parciais nos enrolamentos do estator;
3. Realizar experimentos com diferentes sistemas de medição.
4. Avaliar a resposta dos diferentes sistemas de medição

1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta um resumo das pesquisas relacionadas ao fenômeno das descargas parciais em máquinas rotativas. Esta revisão abrange investigações relacionadas à propagação de sinais de DPs nos enrolamentos do estator e as técnicas de medição utilizadas para detectar estes sinais.

Na pesquisa realizada por [3] 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 DPs no caminho entre a fonte e o sistema de medição. Melhorias na sistemática de medição dos sinais de DPs no enrolamento do estator foram apresentadas por [4] utilizando métodos de processamento digital de sinais para determinar a fonte mais provável das DPs. A técnica baseou-se na análise de altas e baixas frequências dos sinais de DPs e sua distribuição no tempo. A partir disso, os autores afirmam que é possível estimar a forma dos sinais de DPs pela sua fonte. Em [5], através de uma combinação utilizando a mesma metodologia proposta por [4] conseguiu-se medir valores mais precisos dos sinais de DPs. Em [6], foram apresentados critérios para medição de DPs em máquinas rotativas, como a melhor faixa de

frequências para evitar atenuações e ressonância. Neste trabalho também foram descritos os mecanismos de transferência dos sinais de DPs.

Os primeiros padrões de DPs para máquinas rotativas utilizando mapas estatísticos foram apresentados por [7], onde foram apresentados padrões de mapas para as descargas de ranhura e de cabeça da bobina. Até então, os padrões utilizados eram através da Quantidade de Número Normalizada (NQN). Na pesquisa de [8], de 1996, foi dado ênfase à compatibilidade eletromagnética nas medições de DPs em máquinas rotativas, mostrando a importância dos conectores na redução de ruído, aterramento e utilização de cabos apropriados. Neste mesmo ano, no trabalho de [9] foi mostrada uma preocupação sobre os trabalhos que vinham sendo publicados sobre as distorções que os sinais de DPs 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 na pesquisa de [10], onde foram desenvolvidos métodos de ensaio utilizando pulsos de DPs de baixa tensão para determinar a faixa de frequência 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 [11]. Neste modelo, cada fase foi simulada pela combinação de elementos π incorporando efeitos de dependência da frequência. Os resultados calculados mostraram um atraso linear na onda viajante e uma moderada atenuação dos sinais de DPs nos enrolamentos do estator. Uma análise sobre a propagação dos sinais de DPs ao longo dos enrolamentos do estator foi apresentada por [12], neste onde foram utilizados modelos teóricos e experimentais utilizando vários geradores. Os resultados de [12] coincidiram com os resultados apresentados por [11].

No ano 2000 foi lançado o Guia IEEE 1434 [13]. Neste Guia, é apresentada uma revisão da natureza das DPs 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 [14] que atualmente rege as medições de descargas parciais em ensaios com alta tensão. Esta norma apresenta as principais grandezas relacionadas às DPs, os tipos de circuitos utilizados para medição e os sistemas de medição e, por fim, os procedimentos utilizados para a calibração do circuito. No ano de 2008, foi lançado o Guia Cigré 366 [15] para as medições de DPs seguido as diretivas de [14]. Tal Guia deu ênfase aos sistemas digitais de medição de DPs.

Mais informações sobre o tipo e origem das DPs foram apresentadas por [16], utilizando as características da forma de onda e padrões de DPs. A metodologia utilizada foi a injeção de sinais de DPs em partes do enrolamento do estator de um gerador de 35 MW e medindo-se a resposta nos terminais. A importância da utilização de padrões de mapas estatísticos com alta resolução foi apresentada por [17] e [18]. Vários padrões de mapas estatísticos de DPs foram apresentados no trabalho elaborado por [19], através de ensaios laboratoriais. Os autores levantaram mapas estatísticos para os seguintes tipos de DPs: descargas internas, descargas de ranhura, descargas na cabeça de bobina e descargas de delaminação.

Um estudo sobre a influência de acopladores capacitivos na sensibilidade das medições de DPs em máquinas rotativas foi apresentado em [20], foram discutidos os resultados das medições de DPs em máquinas rotativas sob a influência do acoplador capacitivo e foi avaliada a sensibilidade da resposta em frequência do circuito de medição com diversos acopladores capacitivos existentes no mercado. No mesmo ano os autores apresentaram outro trabalho sobre os aspectos práticos das medições de DPs no campo em máquinas rotativas [35].

No ano de 2012, foi lançada norma IEC 60034-27-2 [21] que trata sobre a medição *on-line* de DPs em máquinas rotativas. Além apresentar os assuntos já tratados nas normas anteriores, esta norma também apresenta técnicas de supressão de ruído e os padrões de mapas estatísticos levantados por [19]. No mesmo ano, foi lançada a norma IEEE Std. 1799 [22] com recomendações práticas para o controle de qualidade de ensaios de descargas externas em bobinas, barras e enrolamento.

1.5 ESCOPO DO TRABALHO

Dando sequência ao trabalho, o Capítulo 2 apresenta uma visão geral sobre os enrolamentos do estator, com ênfase a sua isolação elétrica e nos principais tipos de falhas a que os enrolamentos são submetidos.

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

O Capítulo 4 trata especificamente dos métodos elétricos de medição das descargas parciais, do acoplamento capacitivo e o irradiado. Neste capítulo são apresentados também os instrumentos utilizados para medição de descargas parciais.

O Capítulo 5 apresenta os procedimentos metodológicos, o arranjo experimental montado em laboratório, os instrumentos de coleta de dados e por fim, como foi realizado o processo de tratamento de dados.

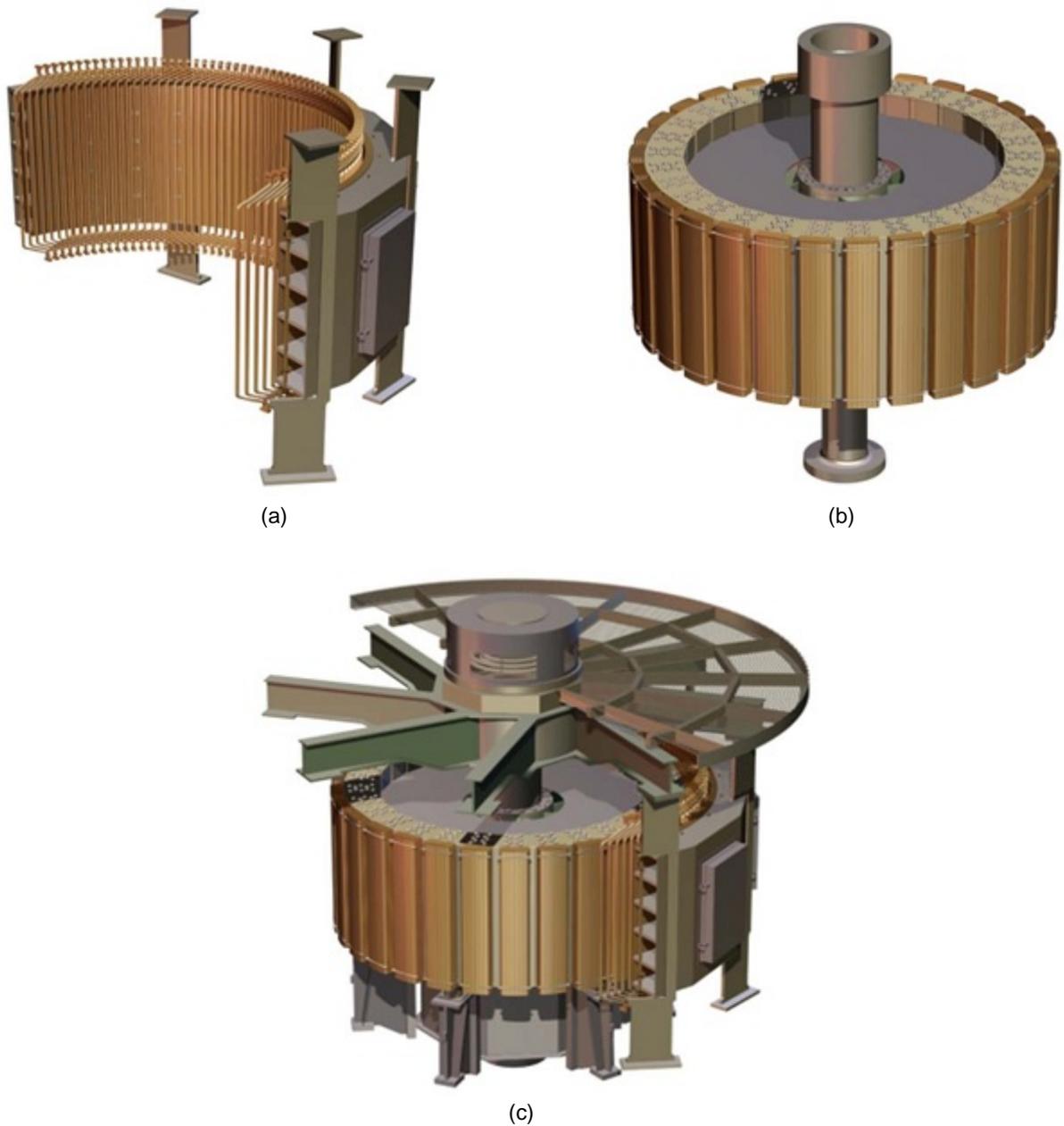
O Capítulo 6 apresenta os resultados da avaliação de sensibilidade, através da aplicação de um sinal conhecido de calibração e ensaios com alta tensão. Foram considerados quatro acopladores capacitivos e dois sistemas experimentais.

Por fim, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões mais relevantes obtidas ao longo do desenvolvimento do trabalho. Também são apresentadas algumas sugestões para futuros trabalhos na área.

2 CAPÍTULO – ENROLAMENTOS DO ESTATOR

Uma máquina rotativa é composta por dois componentes principais: o estator e o rotor. O rotor é 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. 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 [23].

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 como um material isolante. Embora extremamente necessário na isolação, suporte e transferência de calor, não tem nenhuma função na produção de eletricidade ou torque em si [24]. 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 [24].

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:

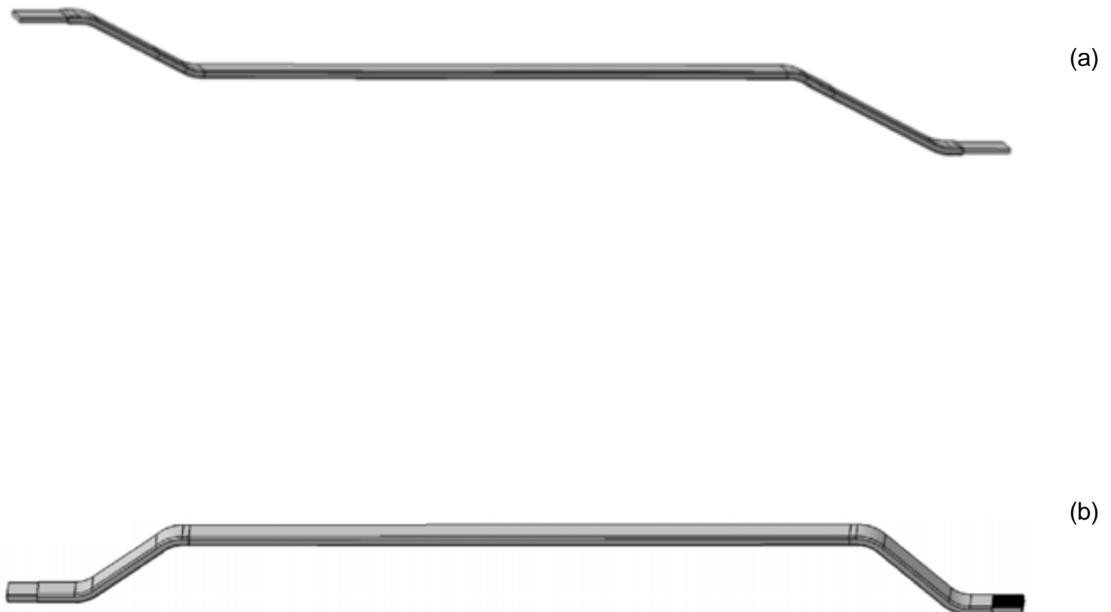
1. Uma barra (meia bobina);
2. Bobina de múltiplas espiras.

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 [24].

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 é possui dois tipos de projeto, o ondulado e o imbricado, ilustrados na Figura 2.2, a seguir.

Figura 2.2 – (a) Barra Roebel ondulada; (b) Barra Roebel Imbricada.

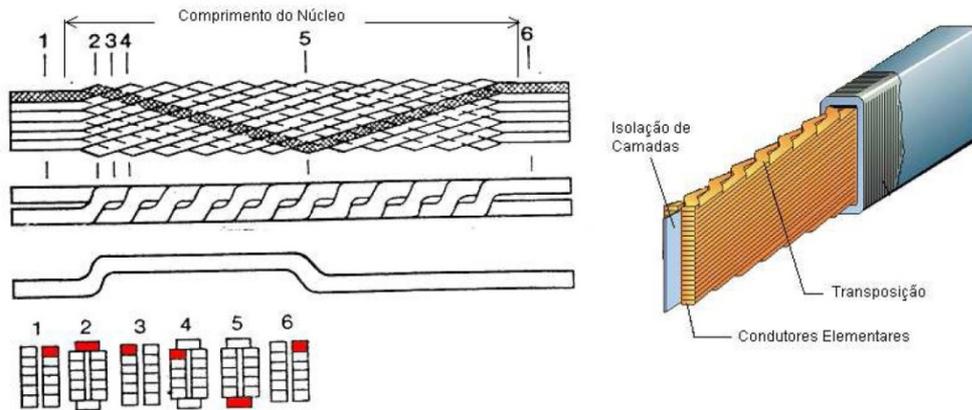


Fonte: Adaptado de [22].

Esse tipo de barra é formado por vários condutores de seção retangular, normalmente transpostos de 360° 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 [25].

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 estatórico, uma vez que, para completar a transposição de 360° , 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 [25].

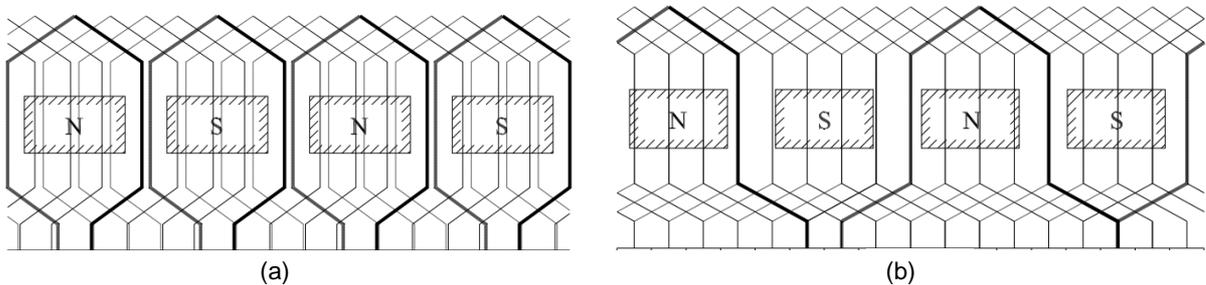
Figura 2.3 – Transposição Roebel 360°.



Fonte: Adaptado de [25].

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 a barras vizinhas enquanto no enrolamento ondulado os terminais de suas bobinas estão ligados a barras deslocadas entre si de 360° elétricos, ou seja, dois passos polares [24].

Figura 2.4 – (a) Estrutura do enrolamento imbricado; (b) Estrutura do enrolamento ondulado.

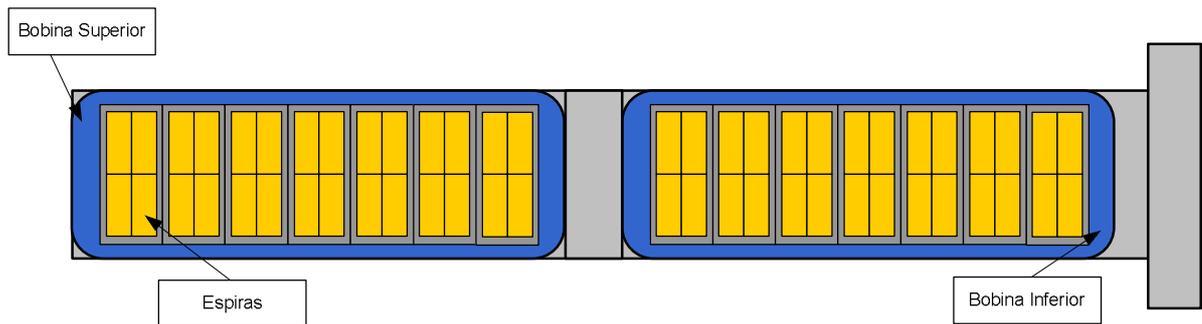


Fonte: Adaptado de [24].

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 [25].

Figura 2.5 - Corte de uma ranhura com bobinas de múltiplas espiras.



Fonte: Adaptado de [25].

Figura 2.6 – Bobina de múltiplas espiras.



Fonte: Adaptado de [22].

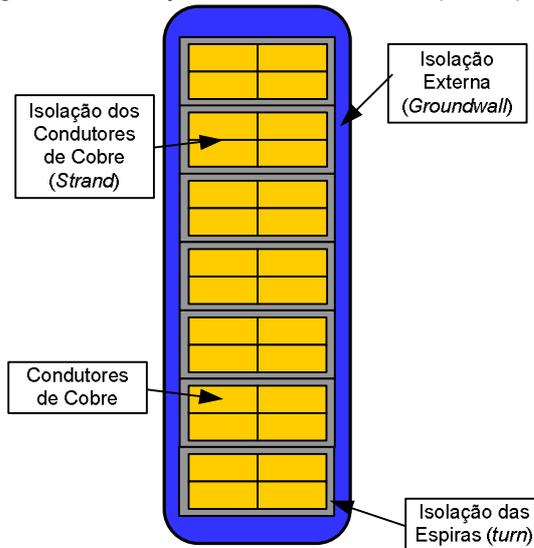
Em função da possibilidade de se alocar mais espiras por bobina, há maior flexibilidade no projeto destes enrolamentos, possibilitando variar o número de ranhuras e circuitos paralelos para se obter a melhor solução.

2.2 TIPOS DE ISOLAÇÃO

Como mostrado na Figura 2.7, existem três tipos de isolação 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*) [26].

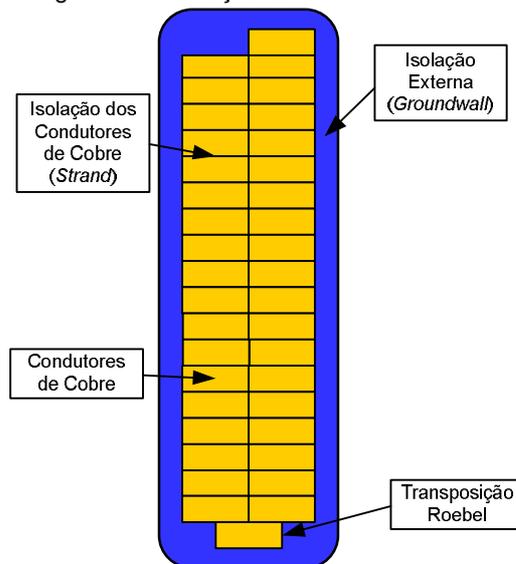
Segundo [26] como não há espiras na barra Roebel (meia bobina), então este tipo de barra possui apenas dois tipos de isolação: os grupos de cobre isolados individualmente e a isolação externa, como pode ser observado na Figura 2.8.

Figura 2.7 – Isolação de bobinas com múltiplas espiras.



Fonte: Adaptado de [26].

Figura 2.8 – Isolação de uma barra Roebel.



Fonte: Adaptado de [26].

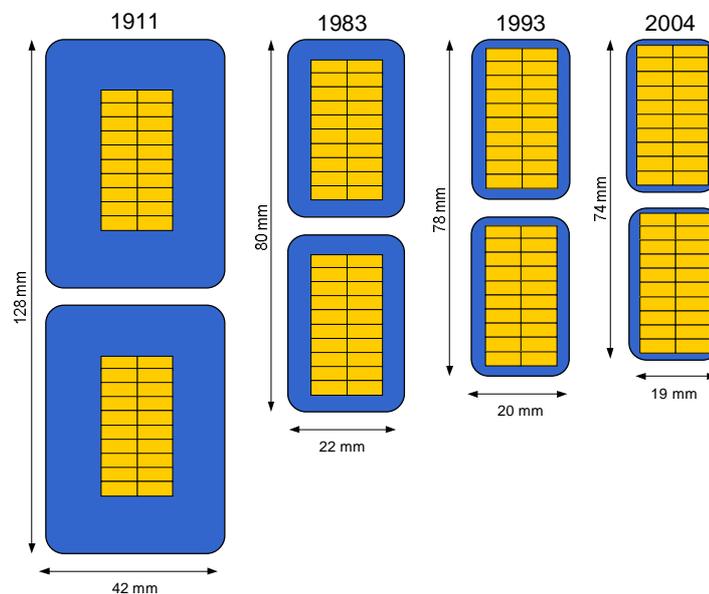
A principal função da isolação é separar o condutor do núcleo do estator e permitir que exista a diferença de potencial entre esses dois componentes. Os materiais mais comuns utilizados para possibilitar a isolação elétrica são vidro, mica e papel. Todos estes materiais possuem excelentes propriedades 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 isolamento 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 gomalaça*, 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” [27].

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 eletro-eletrônica 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 [27].

A Figura 2.9 apresenta o desenvolvimento da construção e progresso das dimensões da isolação elétrica para máquinas rotativas de alta tensão.

Figura 2.9 – Desenvolvimento das dimensões dos sistemas de isolação das máquinas rotativas desde o início.



Fonte: Adaptado de [28].

Como pode ser observado na Figura 2.9, 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 isolação elétrica é cada vez mais importante, no entanto, outros fatores que

influenciam no envelhecimento, como vibrações mecânicas e estresse térmico agora tem mais influência [28]

2.3 FALHAS NO ISOLAMENTO DO ESTATOR

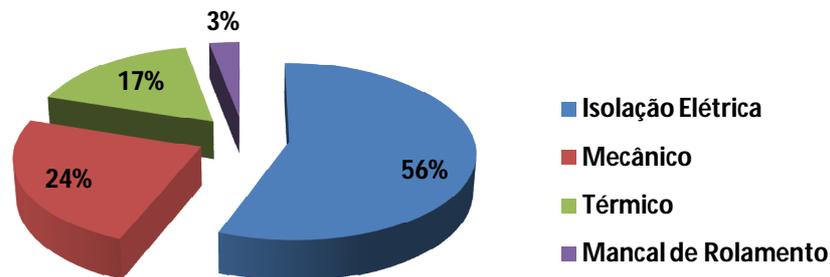
Uma falha no isolamento do estator é um caminho de baixa impedância entre os condutores que devem ser isolados uns dos outros, tais como entre espiras, barras, fases, ou entre fase e núcleo. Esta seção indica o potencial da manutenção preditiva no isolamento do estator, e lista alguns modos comuns de 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 [29] 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.

Um estudo internacional do CIGRE [30] 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 2.10, ilustra essa classificação.

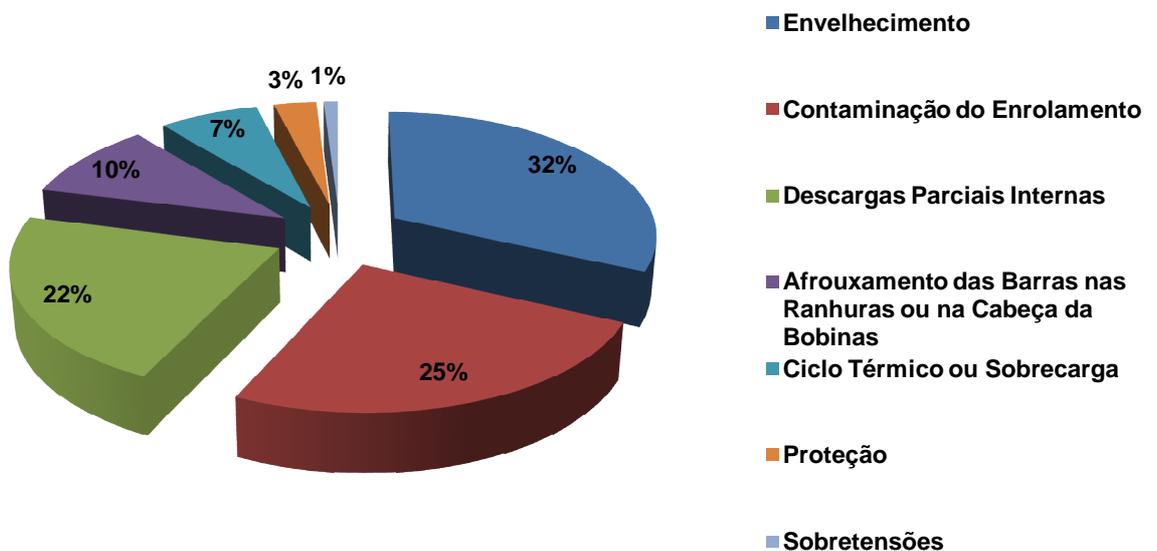
Figura 2.10 – Causas raízes de falhas em hidrogeradores.



Fonte: Adaptado de [30].

As falhas no sistema de isolação elétrica foram investigadas com mais detalhes e os resultados são ilustrados na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Causas de falhas no sistema de isolação elétrica.



Fonte: Adaptado de [30].

As causas mais frequentes de falhas são relativas ao envelhecimento e à contaminação do enrolamento por poeira e umidade. As falhas elétricas foram causadas pelas descargas parciais internas, proteção e sobretensões. Devido à vibração é possível que as barras sofram afrouxamento na sua posição dentro da ranhura na cabeça da bobina.

2.3.2 Causas de Falhas nos Enrolamentos do Estator

Na pesquisa de [31], 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.

No Quadro 2.1, são apresentados os mecanismo de falha, sintomas, teste de detecção e o tipo da máquina, conforme descrito por [31]. Nas Figuras 2.12 e 2.13 são apresentados dois tipos de falhas.

Quadro 2.1 – Tipos de falhas nos enrolamentos do estator.

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

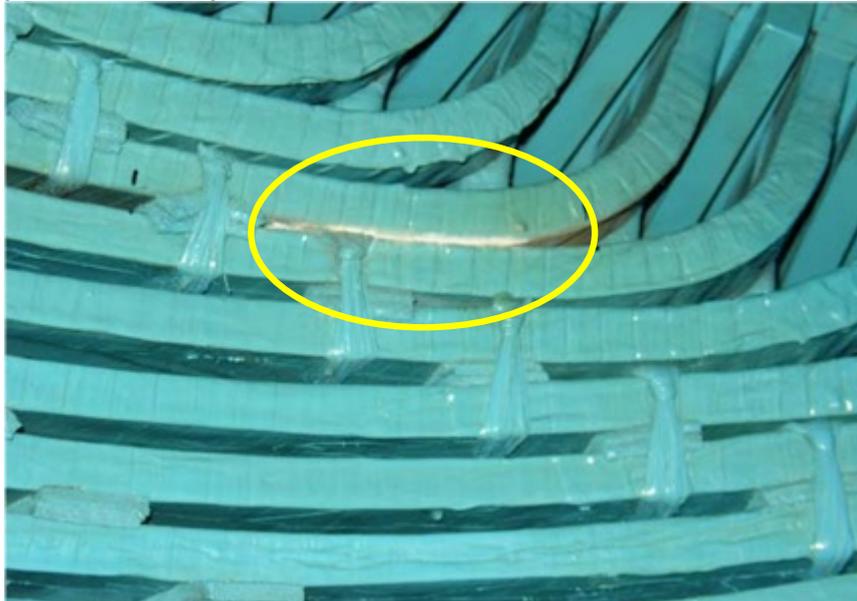
Fonte: Adaptado de [31].

Figura 2.12 – Descargas de ranhura.



Fonte: Adaptado de [31].

Figura 2.13 – Descargas parciais ocorrendo entre bobinas em duas fases diferentes.



Fonte: Adaptado de [31].

3 CAPÍTULO – DESCARGAS PARCIAIS

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

3.1 FÍSICA DAS DESCARGAS PARCIAIS

3.1.1 Ionização dos Átomos de um Material Isolante

De acordo com [1], 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 ϵ do meio é estática ou é considerada constante para baixas frequências) [32].

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

Segundo [1] e [33] 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 a 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.

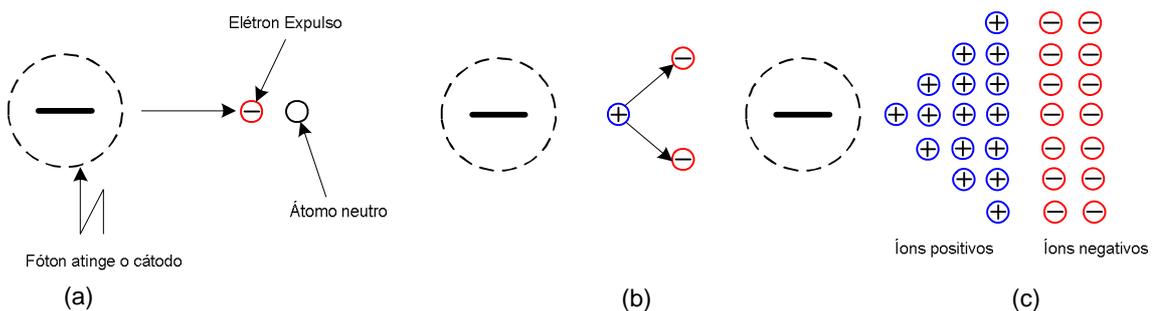
Elevando-se o campo elétrico, as forças internas não serão mais capazes de manter os elétrons da última camada presos aos átomos. Haverá um desprendimento dos elétrons

de sua órbita. Neste momento, o átomo ficará com mais cargas positivas (ionizado positivamente) e o elétron liberado encontra-se livre pelo dielétrico [33].

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 [1].

De acordo com [1], o elétron inicial, que perdeu a maior parte da sua velocidade na colisão, e o elétron expelido 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 [1].

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 [1]. 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 [1].

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 [1].

3.1.2 Forma do Pulso das Descargas Parciais

De acordo com [13] o pulso de uma descarga parcial tem 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.

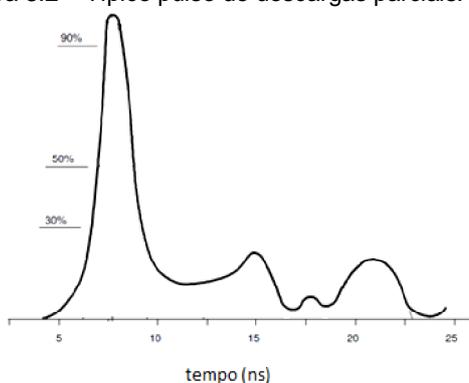
Os pulsos de DPs possuem espectro de frequência que varia de DC a GHz. Portanto é possível detectar atividades de DPs em diversas bandas de frequência com algumas vantagens e desvantagens para cada tipo de banda. Isto também significa que nenhum instrumento pode detectar toda a energia dissipada devido a uma descarga parcial [24].

A maioria dos instrumentos de detecção de DPs apenas detecta o início do pulso que tem um tempo de subida de 1 a 5 ns. Considerando-se no tempo de subida, para uma primeira aproximação, a frequência do pulso, conforme Equação 3.2 é:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4 \times t_{sub}} \quad (3.2)$$

Por exemplo, um pulso com tempo de subida de 3 ns deverá ter um período de $T = 4 \times 3ns = 12ns$, e uma frequência de $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{12ns} = 83MHz$. Dessa forma, um tempo de subida de 1 a 5 ns corresponde a uma faixa de frequência de 50-250 MHz. A Figura 3.2 apresenta um típico pulso de descargas parciais.

Figura 3.2 – Típico pulso de descargas parciais.



Fonte: Adaptado de [34]

3.1.3 Deslocamento do Pulso nos Enrolamentos do Estator

De acordo com [24] uma vez que o pulso de DP ocorre, ele tem que se deslocar de um determinado ponto para ser detectado pelo sensor. Pulsos de alta frequência viajam através dos enrolamentos do estator de três maneiras diferentes: transmissão consutiva, acoplamento capacitivo e radiação.

3.1.3.1 Transmissão

O método mais estudado e confiável para um pulso viajar através dos enrolamentos do estator é ele ser transmitido através dos condutores de cobre, similar ao sinal de frequência industrial 50/60 Hz. Quando pulsos de alta frequência viajam por este caminho sofrem severas distorções devido à indutância das bobinas. A distorção é uma atenuação e um aumento do tempo de subida.

A indutância das bobinas do enrolamento do estator é uma característica normal e necessária para a produção de energia elétrica. Esta propriedade tem um bom efeito na

frequência industrial 50/60 Hz, porém não tão bom para as altas frequências dos pulsos de DPs (50-250 MHz). A impedância indutiva é dada pela Equação (3.3):

$$X_L = 2\pi fL \quad (3.3)$$

Na qual: f é a frequência do sinal;

L é a indutância da bobina.

Pode-se verificar, considerando L constante, que a impedância para um sinal a frequência industrial (60 Hz) $X_L = 2\pi(60)L$ em relação a um pulso de descarga parcial (83MHz) $X_L = 2\pi(83M)L$ é muito menor, $X_{L(60\text{ Hz})} \ll X_{L(83\text{ MHz})}$ (aproximadamente 1.383.000 vezes menor).

Este resultado mostra que os pulsos de descargas parciais não viajam grandes distâncias pela transmissão através dos enrolamentos do estator. Quando detectados, são distorcidos depois de terem atravessado apenas algumas bobinas.

Apesar destas características durante a transmissão, duas condições contribuem para o surgimento das DPs: a primeira, que o envelhecimento, isto é, o desenvolvimento de um defeito mecânico normalmente afeta todas as bobinas em algum grau; e a segunda, é que as DPs somente podem ocorrer quando existe estresse de tensão fase-terra suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar dentro das cavidades. Esta situação ocorre apenas nas bobinas que estão submetidas à alta tensão.

Assim, a medição das DPs nas bobinas submetidas à alta tensão seguramente irá indicar envelhecimento típico nas bobinas com maiores riscos, isto é, as bobinas submetidas a alta tensão. O que não pode ser detectado devido às distorções dos pulsos de DPs é uma falha em uma bobina de baixa tensão.

3.1.3.2 Acoplamento Capacitivo

Ao contrário da transmissão em que o pulso tem que viajar através de um indutor, no acoplamento capacitivo o pulso viaja através de capacitores. A impedância de um capacitor para um sinal em corrente alternada é dada pela Equação (3.4):

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3.4)$$

Na qual: f é a frequência do sinal;

C é a capacitância do meio.

Como demonstrado anteriormente para o caso do indutor, pode-se verificar, considerando C constante, que a impedância para um sinal à frequência industrial (60 Hz) $X_C = \frac{1}{2\pi(60)C}$ em relação a um pulso de descarga parcial (83MHz) $X_C = \frac{1}{2\pi(83M)C}$ é muito menor, $X_{L(60\text{ Hz})} \gg X_{L(83\text{ MHz})}$ (aproximadamente 1.383.000 vezes menor).

Deste modo, para sinais de altas frequências, um capacitor aparece como um curto circuito permitindo que a corrente atravesse sem impedimentos. Embora essa seja a detecção ideal para as DPs, uma vez que elas viajariam sem distorções pelos enrolamentos do estator, a utilização do acoplamento capacitivo é impossível.

A capacitância é uma propriedade elétrica que quantifica o armazenamento de carga elétrica em um determinado capacitor dada uma determinada diferença de potencial. Um capacitor consiste de duas placas de metal separadas através de uma distância específica por um dielétrico, como um material isolante ou o ar. O problema com o comportamento do pulso no enrolamento é que a quantidade e magnitude dos elementos capacitivos são desconhecidos, pois existe capacitância:

1. Entre cada bobina e o condutor e o núcleo;
2. Entre os anéis de circuito com isolamento e ar como dielétrico;
3. No final de duas bobinas adjacentes com o ar.

A magnitude dessas capacitâncias, dependem da espessura da isolamento, do espaço de separação e da integridade da resina orgânica, e todas essas características mudam constantemente com a temperatura, umidade e carga do sistema.

Assim, embora se tenha conhecimento que o acoplamento capacitivo ocorre e que pode ser detectado, não é possível afirmar como o pulso irá se acoplar capacitivamente através de um enrolamento. Entretanto, uma vez que o comportamento deste pulso é estudado através de testes empíricos, ele pode ser monitorado.

3.1.3.3 Radiação

O último método de deslocamento do pulso de descarga parcial que será discutido é a radiação. Este é o mesmo fenômeno observado quando se passa de carro próximo de uma linha de transmissão. Devido a essa característica, uma antena de rádio frequência colocada próxima a um ponto de ocorrência de DPs irá detectar a perturbação. A dificuldade de se utilizar este método para a monitoração de DPs é que, assim como na transmissão através dos condutores, o pulso distorce-se rapidamente e perde sua identidade nas altas frequências.

Assim, de forma a assegurar que o pulso é de uma descarga parcial, as altas frequências ainda devem ser monitoradas e a antena deverá estar próxima da fonte de DPs, que são as bobinas de alta tensão.

3.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA CAVIDADE

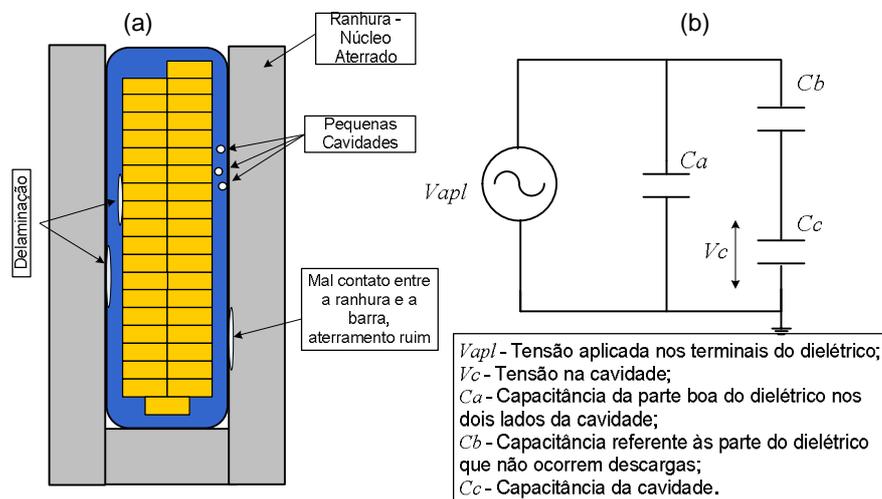
Sempre que existir uma cavidade no interior ou na superfície de uma isolamento, uma diferença de potencial irá se formar através dela. A magnitude dessa diferença de potencial dependerá da tensão aplicada nos terminais da isolamento e da capacitância da cavidade. A tensão que irá aparecer através da cavidade é modelada pelo circuito equivalente na Figura 3.3.

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 3.5, 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 [32].

$$V = f(pd) \quad (3.5)$$

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 3.3(b) mostra a representação elétrica do comportamento de DPs 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.

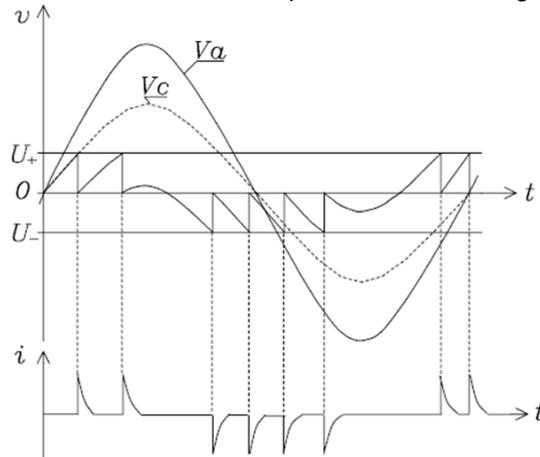
Figura 3.3 – (a) Barra Roebel com diversas cavidades; (b) Circuito equivalente.



Fonte: Adaptado de [24].

De acordo com [34] quando o circuito da Figura 3.3 (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 3.4 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 3.4 – Tensões e correntes no circuito equivalente das descargas parciais.



Fonte: Adaptado de [34].

A quantidade de carga envolvida neste processo pode ser obtida a partir da Equação (3.6), a seguir:

$$\Delta q = \left(C_a + \frac{C_b \times C_c}{C_b + C_c} \right) V - (C_a + C_b) V_1 \quad (3.6)$$

Como $C_a \gg C_b$ e $C_b \gg C_c$, tem-se as Equações 3.7 e 3.8:

$$\Delta q = C_a (V - V_1) \quad (3.7)$$

$$\Delta q = C_a \times \Delta V \quad (3.8)$$

Sendo: V – Tensão terminal antes da descarga;

V_1 – Tensão terminal durante a descarga;

ΔV – Redução da tensão durante a descarga;

Δq – Carga transferida durante a descarga.

Dessa forma pode-se calcular a variação da carga apenas pela tensão no capacitor C_a . Vale salientar que esta carga é conhecida como carga aparente da DP, enquanto que a carga realmente transferida no processo da DP na cavidade é dada pela Equação 3.9

$$q = (C_b + C_c)V_c, \quad (3.8)$$

Na qual V_c a queda de tensão sofrida na cavidade ou capacitância C_c , porém a carga q não pode ser medida diretamente por nenhum medidor de DP [34]. Para a medição da DP recorre-se a observação da tensão e corrente do circuito de ensaio, porém como foi mostrado anteriormente, a unidade de medida preferencial é o pico-coulomb (pC). Esta preferência deve-se ao fato de que a carga é proporcional a energia disruptiva no local da descarga, enquanto que o pulso de tensão depende de sua forma de onda, a qual é bastante irregular no caso da DP.

Por outro lado, como a capacitância da cavidade é muito pequena em relação à capacitância do dielétrico, a queda de tensão terminal (V_c) durante a descarga é muito pequena, de tal modo que não se pode medir com um osciloscópio usual da tensão terminal, tendo em vista que enquanto o V_c é da ordem de alguns de mV, a tensão terminal é da ordem de kV. Portanto, para a medição de V_c , é necessário levar em conta que esta contém componentes de alta frequência e com isso, utilizar a um filtro passa alta acoplado com o dispositivo de medição.

3.3 FONTES DE DESCARGAS PARCIAIS NO ISOLAMENTO DO ESTATOR

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

De acordo com [21] as fontes de DPs 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, 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 esse tipo de DPs for detectado.

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.

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 condutiva na ranhura se danifica devido ao movimento da barra ou bobina na ranhura. 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.

3.3.3 Descargas na Cabeça da Bobina (*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 DPs 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

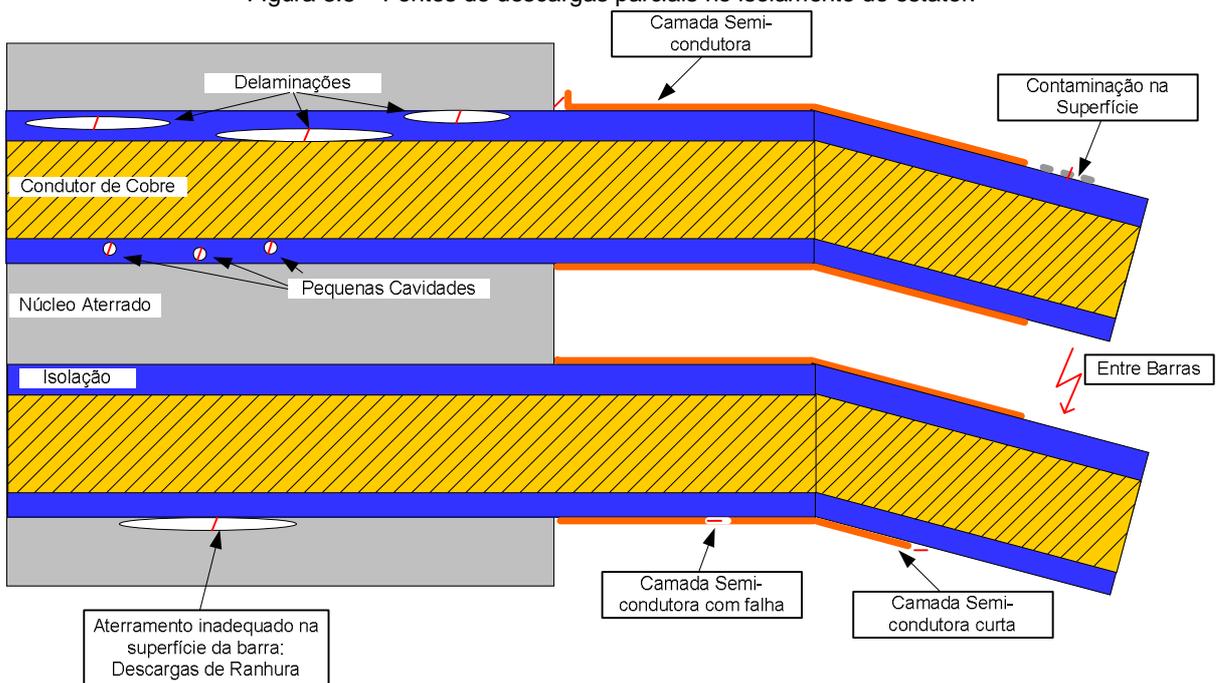
concentração de descargas parciais. Isso pode resultar em pequenas cavidades na isolação.

A Figura 3.5 ilustra as principais fontes de DPs no isolamento do estator, algumas já descritas anteriormente na Figura 3.3, agora com especial atenção para as causas que originam as DPs.

A norma [21] dividiu as principais fontes de descargas parciais em três níveis de risco, que são apresentados a seguir:

1. Cavidades internas são de baixo risco, normalmente não levam ao envelhecimento;
2. Descargas na cabeça da bobina e de superfície, por exemplo, devido a contaminação ou partículas condutivas, são de risco médio.
3. Descargas de ranhura e de delaminação no condutor ou internas a isolação são de alto risco.

Figura 3.5 – Fontes de descargas parciais no isolamento do estator.



Fonte: Adaptado de [29].

3.4 GRANDEZAS ASSOCIADAS ÀS DESCARGAS PARCIAIS

A seguir, serão apresentadas algumas definições de grandezas para medição de descargas parciais, segundo as normas internacionais [14] e [21].

3.4.1 Carga Aparente q

Valor absoluto da carga que, se injeta instantaneamente entre os terminais do objeto sob ensaio, causará uma variação momentânea da tensão entre seus terminais com valor igual ao da própria descarga parcial. A carga aparente é expressa em Coulomb (C).

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 3.9.

$$\varphi_i = 360 \left(\frac{t_i}{T} \right) \quad (3.9)$$

Em que: φ_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 DPs 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, Δf .

Diferença entre as frequências de corte inferior e superior, da pela Equação (3.10).

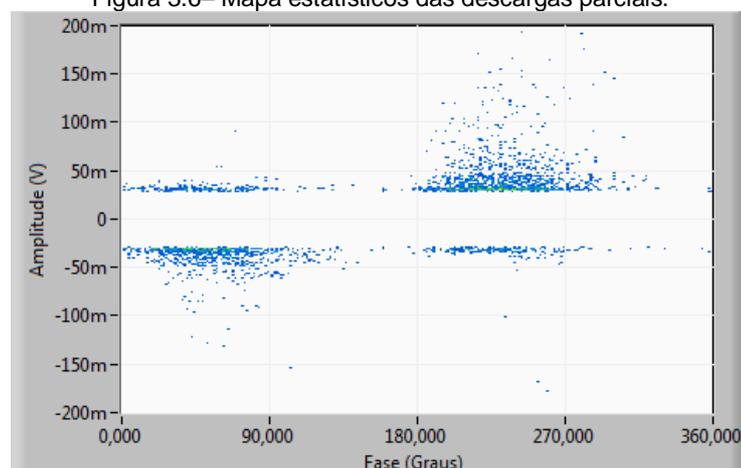
$$\Delta f = f_1 - f_2 \quad (3.10)$$

3.5 DESCARGAS PARCIAIS ASSOCIADAS À FASE – OS MAPAS ESTATÍSTICOS

Segundo [19] a análise de associação à fase das descargas parciais atualmente é considerada umas das metodologias mais eficientes para a identificação das fontes de DPs e foi incorporada aos mais modernos instrumentos de medição de DPs.

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 DPs mede a amplitudes da carga aparente (q), relacionadas ao ângulo de fase (φ_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 DPs são classificados como mapas estatísticos das DPs. Os *softwares* de análise exibem essas informações como distribuições bivariadas, do tipo (φ_i, q, n) , como exemplificado na Figura 3.6.

Figura 3.6– Mapa estatísticos das descargas parciais.



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

Quadro 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 [19].

4 CAPÍTULO – MÉTODOS E INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

De acordo com [13] 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 dos métodos elétricos de medição de DPs, pois estes métodos são os mais utilizados para avaliação da condição do isolamento dos enrolamentos de máquinas rotativas.

A medição elétrica pode ser realizada utilizando sensores de DPs que detecte as componentes dos sinais dos pulsos que se deslocam através dos enrolamentos do estator ou por antenas que detectam as componentes do sinal irradiadas eletromagneticamente [21].

4.1 MÉTODOS ELÉTRICOS DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

4.1.1 Medição do Pulso Elétrico

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 DPs.

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

4.1.2 Medição da Radiação de Rádio Frequência

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 DPs.

4.2 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_{2DPi}) 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_{2DPi}) será significativamente menor que f_{2DPo} do pulso original de DPs.

Os sistemas de medição de DPs, 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 DPs.

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

4.2.1 Faixas de Baixas Frequências

Possui largura de banda de aproximadamente 1 MHz ou de algumas centenas de kHz, conforme [14], 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 DPs, 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 DPs, então os pulsos detectados são diretamente proporcionais à carga aparente da corrente do pulso de DP.

4.2.2 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 DPs em altas frequências é menos susceptível a ruídos e pode ser utilizada para caracterizar os pulsos de DPs que chegam ao sensor, de acordo com a forma do pulso e podendo discriminar entre diferentes fontes de DPs, 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 DPs em faixas de altas frequências são normalmente expressos em unidades de tensão, Volts (V) ou miliVolts (mV).

4.2.3 Faixa de Frequências Muito Altas

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

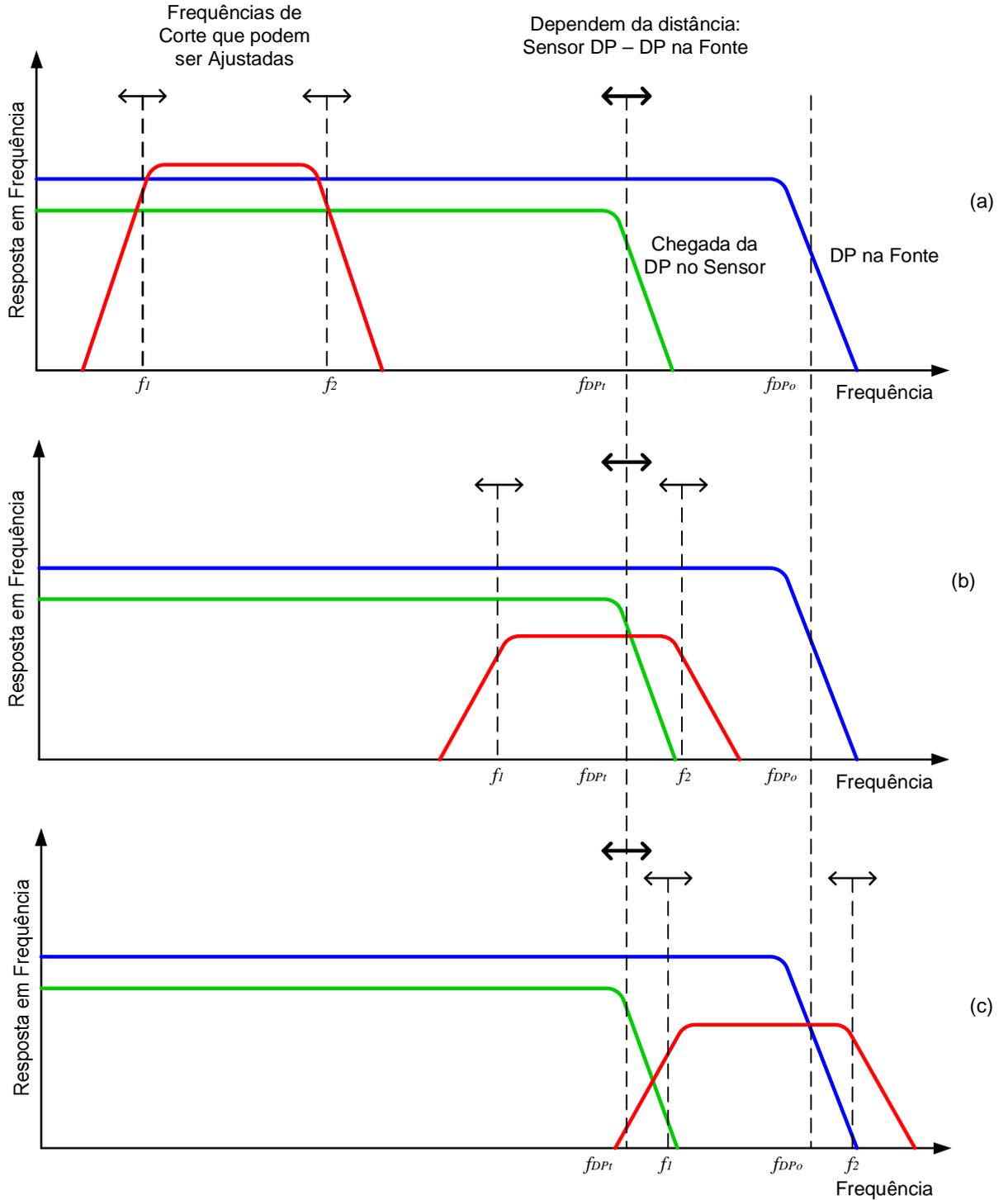
Como mostrado na Figura 4.1 a resposta em frequência de cada sistema mostra sobreposições acentuadas com a resposta em frequência do pulso original de DPs, portanto, medições realizadas em faixas de frequências muito altas asseguram uma boa sensibilidade para os sinais originados próximos ao sensor de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

O sensor de DPs 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 DPs em faixas de altas frequências são normalmente expressos em unidades de tensão, Volts (V) ou miliVolts (mV).

4.2.4 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 DPs 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 dependem principalmente da localização da antena, a distância entre a antena e a fonte de DPs e a largura de banda do sistema de medição. Em geral, quanto mais próxima a antena estiver da fonte de DPs melhor será sua sensibilidade de medição.

Figura 4.1 – Resposta em frequência de um pulso de DPs 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 [21].

4.3 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.

4.3.1 Acoplamento Capacitivo

Conforme o [15] o capacitor de acoplamento tem a função de transferir o espectro de alta frequência dos sinais de DPs do enrolamento até o dispositivo de acoplamento, simultaneamente atenua a tensão do sistema para baixas magnitudes. O capacitor de acoplamento deve ser livre de DPs na tensão do sistema e deve possuir baixa indutância para poder transmitir os pulsos de DPs sem oscilações.

De acordo com [35] 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 Ω . 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 80 pF com uma resistência de 690 Ω . 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 DPs.

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 [35].

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 4.2 – Acopladores capacitivos: a) Instalado no interior do enrolamento; b) Instalado na saída de fase.



(a)

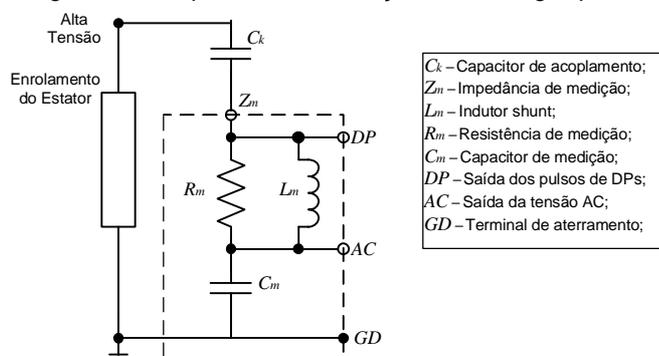


(b)

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 [35].

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 DPs, a Figura 4.3, a seguir, apresenta um exemplo de impedância de medição.

Figura 4.3 – Impedância de medição de descargas parciais.

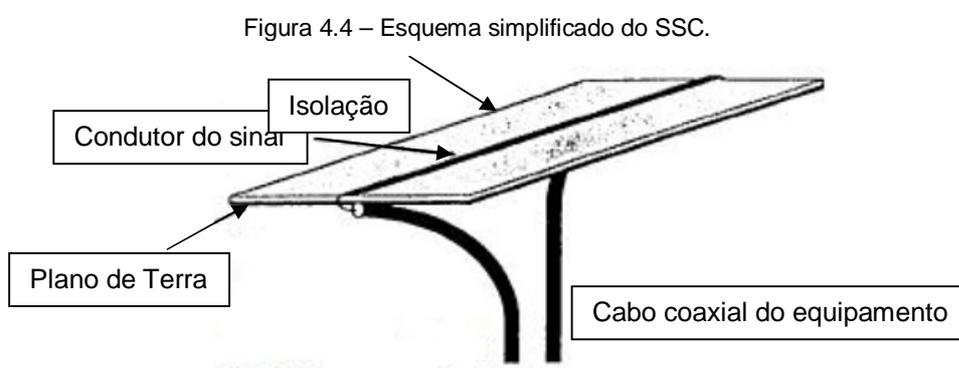


Fonte: Adaptado de [15].

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

O SSC é, essencialmente, um acoplador direcional e, de acordo com a norma [13], trabalha na faixa de frequência de 30 MHz até 1 GHz. A norma [21] salienta que o SSC deve ser instalado o mais próximo possível da parte do enrolamento que está pode estar mais sujeita a atividade de DPs.

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.



Fonte: Adaptado de [36].

A impedância característica do SSC é, geralmente de 50 Ω , 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 [36] a principal vantagem do SSC é a sua habilidade em produzir pulsos de respostas significativamente diferente para as DPs 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 DPs tem uma largura que excede 20 ns, conforme descrito na norma [13]. Logo, os ruídos mais comuns criam pulsos de tensão com duração relativamente longa quando comparados com os sinais de DPs.

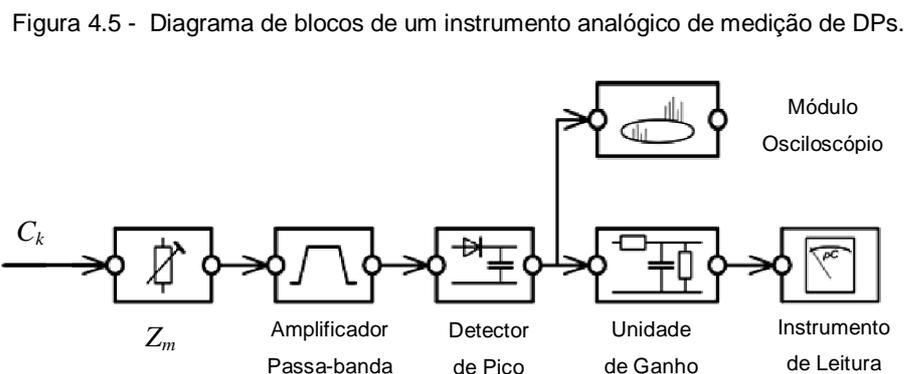
4.4 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

Os sinais elétricos dos dois tipos de sensores descritos no item 4.3 deste capítulo podem ser medidos e gravados utilizando diversos instrumentos de medição. O tipo de

instrumento de medição utilizado no processamento de sinal pretendido, análise e interpretação. Entretanto, a norma [21] recomenda que se utilize um instrumento que possa, diretamente ou por processamento subsequente dos sinais de DPs medidos, fornecer ao menos a distribuição de magnitude do pulso, a distribuição do pulso na fase e os mapas estatísticos (associação à fase das DPs), descrito anteriormente no item 3.6.

4.4.1 Processamento Analógico dos Sinais de Descargas Parciais

O diagrama de blocos de um instrumento de medição clássico de DPs utilizando processamento de sinais analógico é apresentado na Figura 4.5, a seguir. Para assegurar o ótimo processamento de sinal da magnitude do pulso, a impedância de medição na entrada é ajustada. Como um filtro passa alta é formado pela conexão série do capacitor de acoplamento C_k e a impedância de medição Z_m , como mostrado anteriormente na Figura 4.3, os pulsos capturados são diferenciados, portanto eles devem ser integrados novamente para avaliação da carga aparente q . Por isso, geralmente um amplificador passa-banda é utilizado.



Fonte: Adaptado de [15].

Instrumentos de medição analógica de DPs são também equipados com detector de quase-pico (*quase-peak*) combinado com uma unidade de ganho e um instrumento de leitura para mostrar a taxa de ocorrência dos pulsos de DPs, como definido na norma [14]. A associação à fase das DPs geralmente é visualizada através de um módulo osciloscópio.

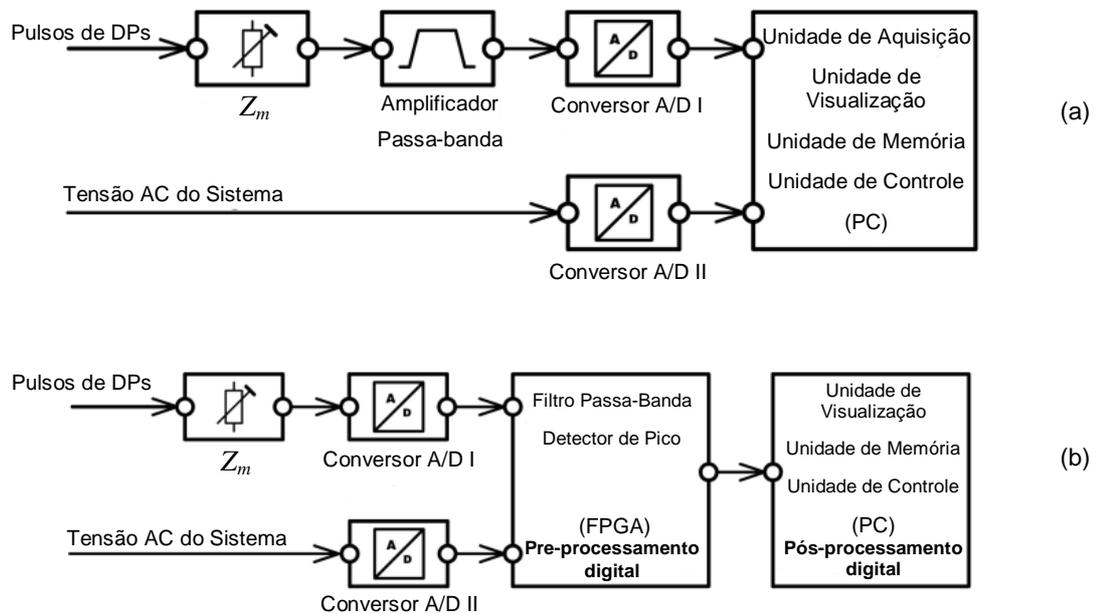
4.4.2 Processamento Digital dos Sinais de Descargas Parciais

Atualmente, existem dois princípios de básicos de medição empregados para os sistemas de medição de descargas parciais digitais, como ilustrado na Figura 4.6. A Figura 4.6 (a) é baseada em um pré-processamento analógico dos pulsos de DPs a fim de se obter a carga aparente, seguido por um pós-processamento digital para a visualização e avaliação dos pulsos de carga aparente e as demais grandezas associadas à mesma. Isso significa

que os pulsos capturados são primeiramente integrados utilizando um filtro passa-banda, como descrito anteriormente.

Após o filtro passa-banda uma conversão analógica/digital é realizada para ambos os sinais de magnitude da carga aparente de cada evento de DP e da tensão do sistema no instante de ocorrência das DPs, seguidas de unidades para digitalização das informações adquiridos de DPs e visualização dos mapas estatísticos de DPs. Adicionalmente, os parâmetros significantes de cada pulso de DPs podem ser armazenado no computador para um pós-processamento futuro, assim como para a visualização do mapa estatístico utilizando o modo *replay*.

Figura 4.6 – Diagrama de blocos de instrumentos digitais de medição de DPs: (a) Pre-processamento analógico e pós-processamento digital dos pulsos de DPs; (b) Pre-processamento e pós-processamento digital dos pulsos de DPs.



Fonte: Adaptado de [15].

Hoje em dia conversores analógicos/digitais extremamente rápidos estão disponíveis no mercado, portanto a digitalização dos pulso DPs de entrada capturados pode ser feita em tempo real, isto é, sem um pré-processamento analógico, como descrito anteriormente. Isso significa que, a filtragem passa-banda necessária para a integração, assim como detecção de pico são realizadas após a conversão analógica/digital utilizando um Arranjo de Portas Programável em Campo (*Field Programmable Gate Array – FPGA*¹), conforme ilustra a Figura 4.6 (b). Esse conceito se estende essencialmente à capacidade de analisar as formas de onda dos pulsos de DPs utilizadas para o reconhecimento de diferentes fontes de DPs em equipamentos de alta tensão assim como para a supressão de ruídos.

A principal característica dos instrumentos digitais de medição de DPs é a habilidade de armazenar os seguintes parâmetros característicos de cada pulso de DP: o tempo de ocorrência dos pulsos de descargas parciais (t_i); a carga aparente (q); a magnitude da tensão em t_i (V_i) e o ângulo de fase (φ_i).

¹ Um FPGA é dispositivo semicondutor que é largamente utilizado para o processamento de informações digitais e que pode ser programado de acordo com as aplicações do usuário.

5 CAPÍTULO – METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada no trabalho para analisar a resposta da propagação de sinais de descargas parciais através em uma parte dos enrolamentos do estator, utilizando diferentes sistemas de medição.

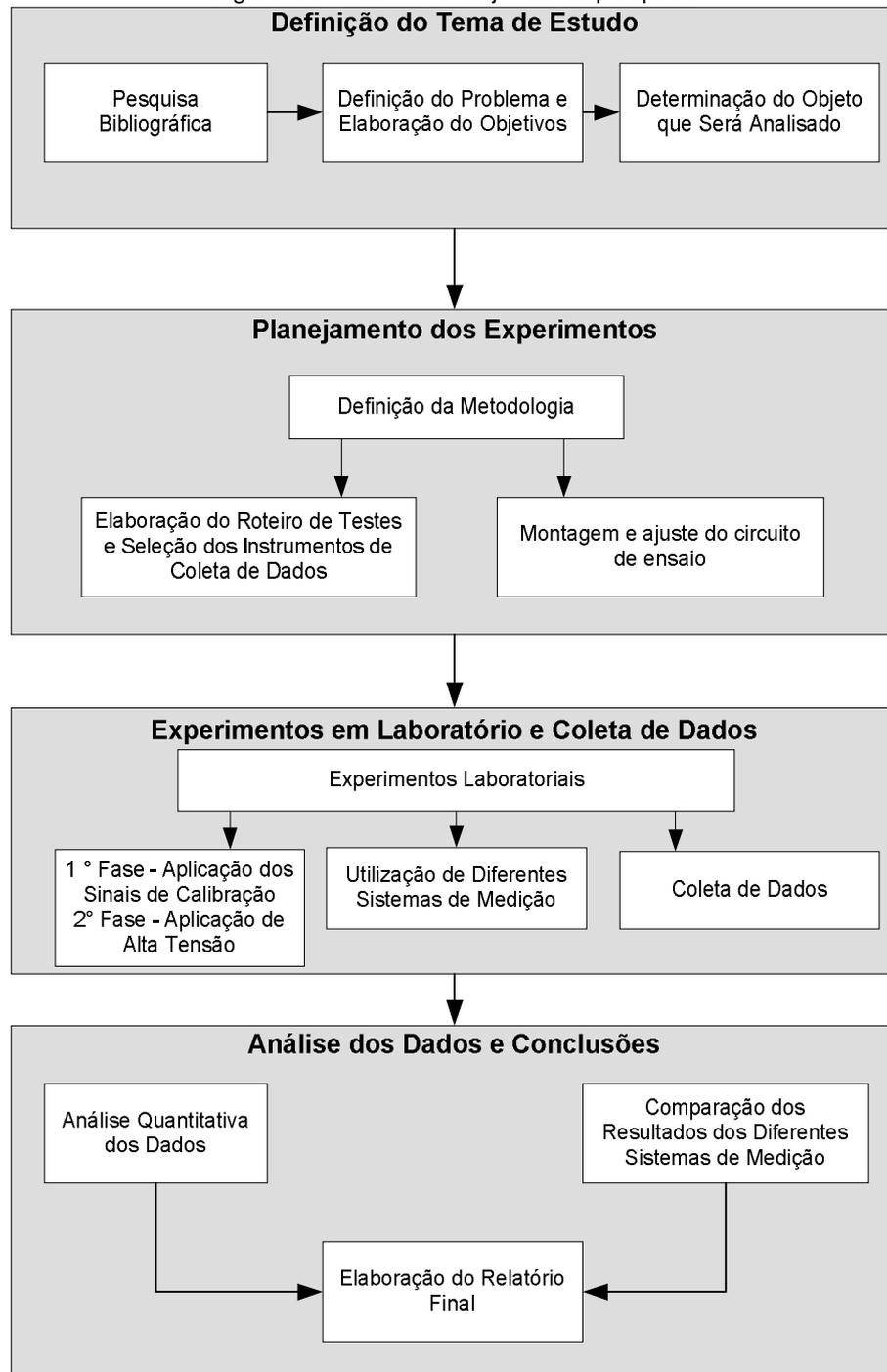
Serão apresentados os procedimentos metodológicos, o modelo experimental montado em laboratório, os instrumentos de coleta de dados e, por fim, como foi realizado o processo de tratamento de dados.

5.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho obedeceu a seguinte estrutura: primeiramente foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre o tema descargas parciais, com a revisão da literatura abordando a propagação dos sinais de descargas parciais nos enrolamentos do estator.

Em seguida foi feita uma pesquisa explicativa de natureza aplicada, utilizando métodos experimentais para identificar os fatores que influenciam nas respostas de diferentes sistemas de medição dos sinais de DPs quando se propagam através dos enrolamentos do estator. Segundo [37] a pesquisa explicativa visa identificar fatores que determinam ou contribuem para ocorrência dos fenômenos. Aprofunda o conhecimento da realidade porque explica a razão, o “porquê” das coisas. Quando realizada nas ciências naturais, requer o uso do método experimental. A natureza aplicada da pesquisa caracteriza-se pelo seu interesse prático, ou seja, os resultados serão utilizados na solução de problemas que ocorrem na realidade. Para uma melhor compreensão da proposta metodológica do trabalho, a Figura 5.1 apresenta uma síntese da trajetória da pesquisa.

Figura 5.1 – Síntese da trajetória da pesquisa.



5.2 ARRANJO EXPERIMENTAL

A fim de se analisar a resposta da propagação de sinais de descargas parciais através em uma parte dos enrolamentos do estator, experimentos foram realizados em laboratório em uma barra Roebel de 2,9 m, do tipo imbricada, retirada de um hidrogerador de 290 MW. A Figura 5.2 representa o diagrama do circuito de ensaio utilizado, e Figura 5.2 apresenta uma foto do circuito montado em laboratório.

Para a injeção dos pulsos de descargas parciais, foi utilizado um calibrador de DPs, de fabricação OMICRON, modelo 542, projetado de acordo com os requisitos da IEC 60270 (2000). Já para aplicação de alta tensão foi utilizada uma fonte de alta tensão de até 100 kV, de fabricação INSTRONIC.

Figura 5.2 – Diagrama do circuito de ensaio.

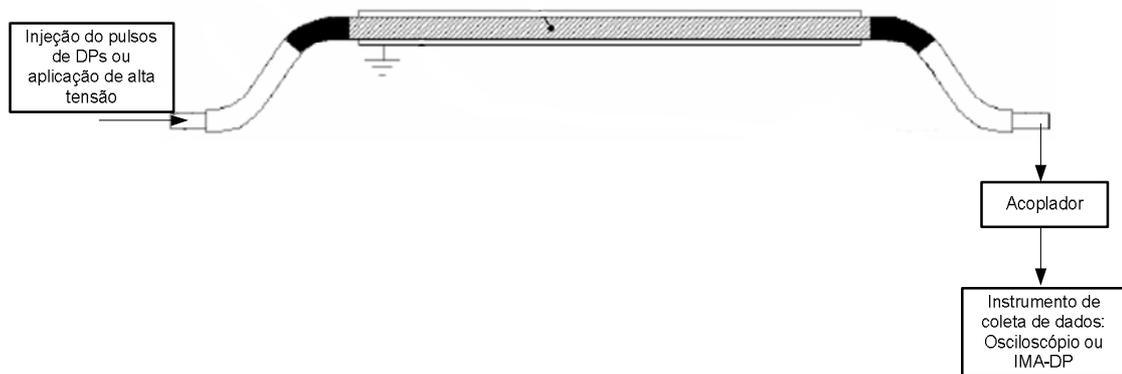
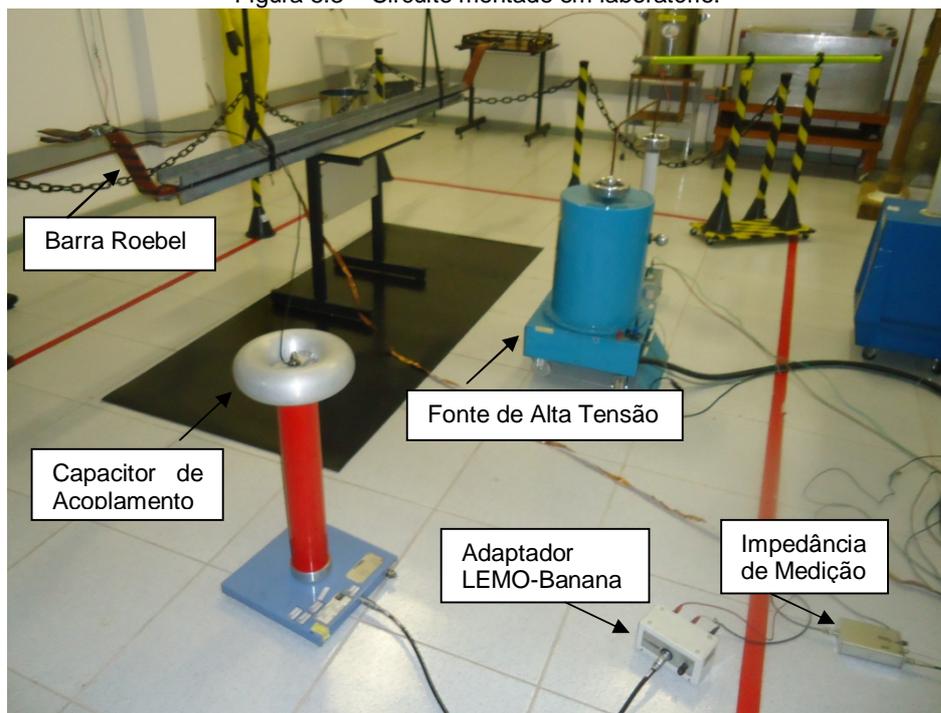


Figura 5.3 – Circuito montado em laboratório.



5.3 INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS

Para a coleta de dados, foram utilizados dois instrumentos de medição:

1. Instrumento de monitoração e análise de descargas parciais (IMA-DP) produzido pelo Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – Eletrobras Cepel;
2. Osciloscópio digital de fabricação Tektronix, modelo 3034B, 350 MHz e 2,5 GS/s.

O primeiro instrumento foi utilizado durante a realização de ensaios com alta tensão, para registro dos mapas estatísticos das descargas parciais, Já o segundo instrumento foi utilizado para registros dos sinais de DPs no domínio do tempo.

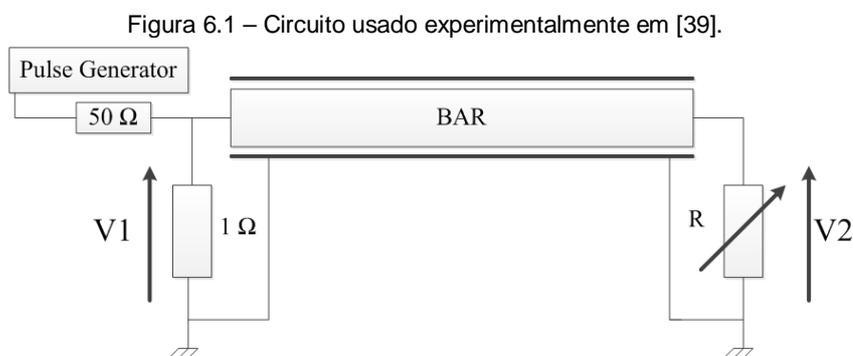
5.4 TRATAMENTO DOS DADOS

Os dados coletados através dos dois instrumentos de medição, osciloscópio e IMA-DP, foram tratados de forma quantitativa através do *software* Matlab 7.9, e os resultados analisados individualmente e, em seguida, foi feita uma comparação entre os diferentes sistemas de medição.

6 CAPÍTULO – ESTUDO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

Este capítulo apresentará os resultados relativos à avaliação de sensibilidade, realizada através da aplicação de um sinal conhecido de calibração e ensaios com alta tensão, para quatro acopladores capacitivos e dois sistemas experimentais, uma antena do tipo SSC e um cabo coaxial RG 58, desencapado, utilizado como antena. Será apresentado também o resultado de uma medição de descargas parciais realizada em campo em um hidrogerador de uma usina hidrelétrica.

Para o ajuste do circuito foi utilizada a metodologia proposta por [39], em que se aplica uma tensão V_1 em uma extremidade da barra e mede-se a tensão V_2 na outra extremidade da barra, conforme Figura 6.1.



Fonte: Adaptado de [39]

6.1 AVALIAÇÃO DA SENSIBILIDADE DOS SENSORES

6.1.1 Aplicação um Sinal Conhecido de Calibração

Nesta etapa do estudo, sinais conhecidos de calibração foram injetados na barra e medidos através de capacitores de acoplamento ligados ao terminal barra e em série com a impedância de medição. Foram utilizados quatro modelos comerciais de 80, 220, 500 e 1000 pF. A Figura 6.2, a seguir, ilustra os acopladores utilizados neste estudo.

Figura 6.2 – (a) Acopladores utilizados no estudo; (b) Utilização do acoplador de 500 pF.



As Figuras 6.3-6.6 apresentam a resposta para os quatro acopladores capacitivos utilizados. Pode-se observar que quanto maior a capacitância maior é amplitude do sinal registrado. Em relação aos espectros de frequência, notar-se que a maior densidade de energia dos sinais medidos pelos os acopladores de 220, 500 e 1000 pF se mostra na faixa de 0 a 15 MHz, com uma pequena concentração na faixa de 20 a 50 MHz. Já para o acoplador de 80 pF, a maior densidade de energia dos sinais medidos encontra-se na faixa de 25 a 35 MHz, com uma pequena concentração na faixa de 5 a 15 MHz e 35 e 50 MHz.

Figura 6.3 - Resposta do capacitor de 80 pF ao sinal do calibrador. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência.

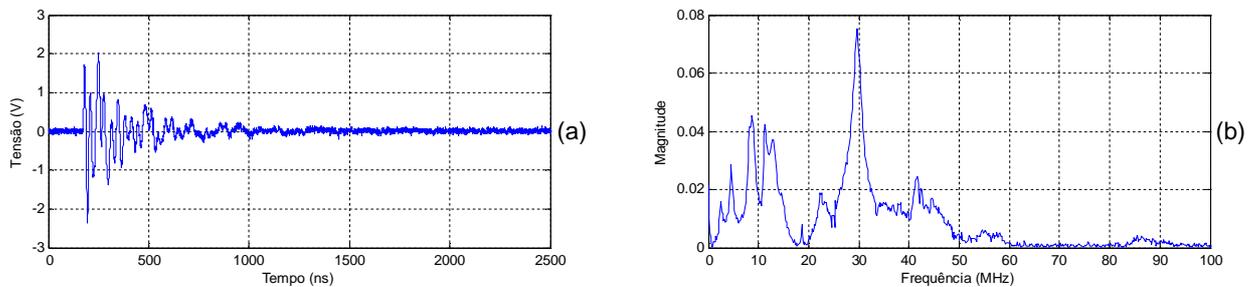


Figura 6.4 – Resposta do capacitor de 220 pF ao sinal do calibrador. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência.

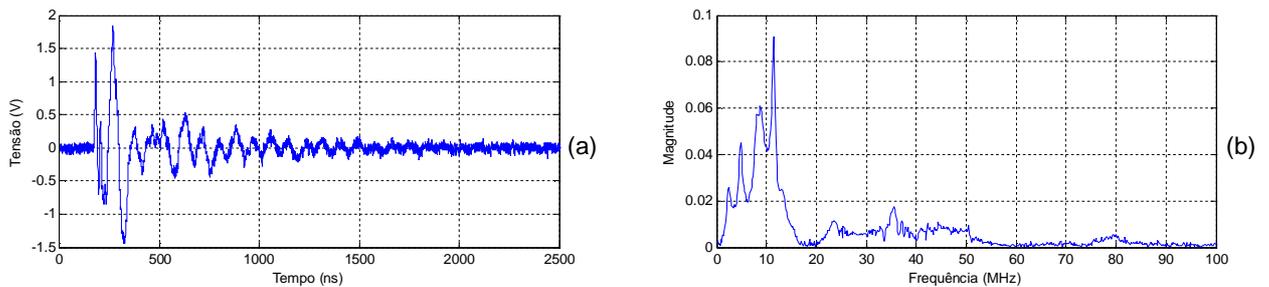


Figura 6.5 – Resposta do capacitor de 500 pF ao sinal do calibrador. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência.

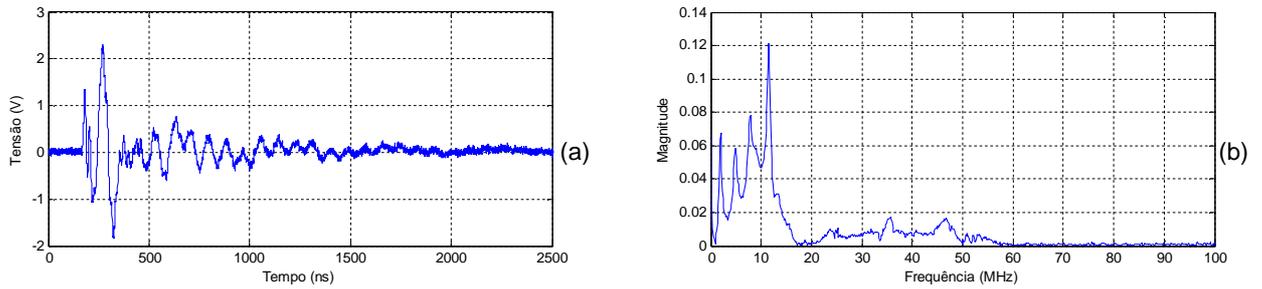
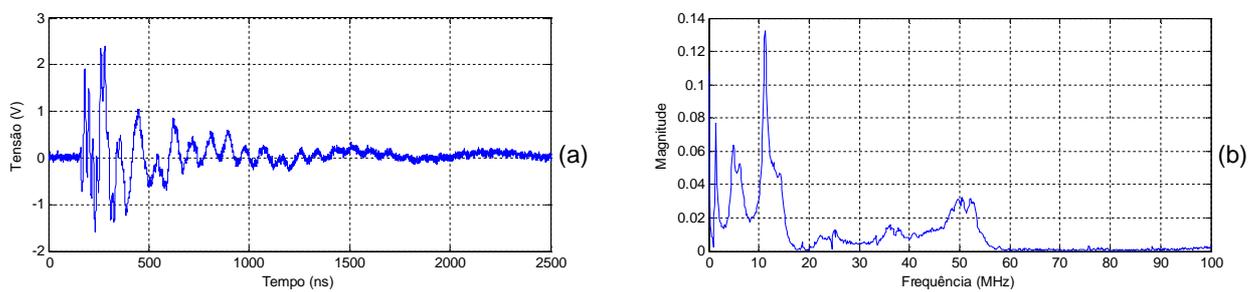


Figura 6.6 - Resposta do capacitor de 1000 pF ao sinal do calibrador. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência.



Dando sequência à avaliação da sensibilidade dos sensores, foi avaliada a eficiência de dois sistemas experimentais, uma antena do tipo SSC, descrita com detalhes no Capítulo 5, e um cabo coaxial RG 58, desencapado, utilizado com a função de antena.

Uma antena tipo SSC fabricada com microfita, ainda em fase experimental, desenvolvida em um projeto de pesquisa pela Universidade Federal do Pará [36], foi analisada para verificar sua aplicabilidade para captação dos sinais de DPs. A Figura 6.7, ilustra a antena utilizada nos testes laboratoriais.

Figura 6.7 – (a) Antena utilizada; (b) Antena instalada na barra.



(a)



(b)

A metodologia utilizada para avaliação da antena foi colocá-la em diferentes posições na barra, em seguida aplicar um sinal conhecido de calibração em uma das extremidades da barra e registrar o sinal captado com a antena.

Os testes laboratoriais mostram uma atenuação da amplitude do sinal registrado a medida que a antena se distanciava da fonte do sinal de calibração. As Figuras 6.8 e 6.9 apresentam um registro de captação de sinais de DPs com a antena próxima da fonte de DPs e um registro distante da fonte. Os gráficos dos espectros de frequência mostram que a maior densidade de energia dos sinais medidos pela antena se concentra na faixa de 5 a 15 MHz, com uma pequena concentração na faixa de 20 a 50 MHz, similar ao que foi obtido através dos acopladores de 220, 500 e 1000 pF.

Figura 6.8 – Sinais captados pela antena próxima a fonte. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência.

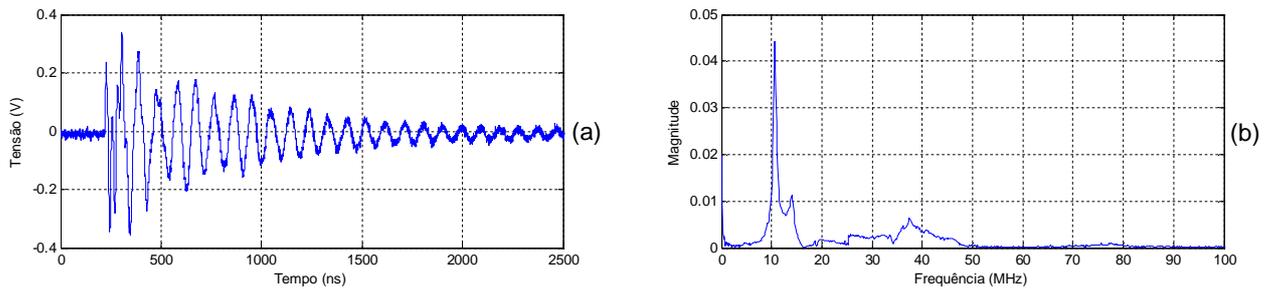
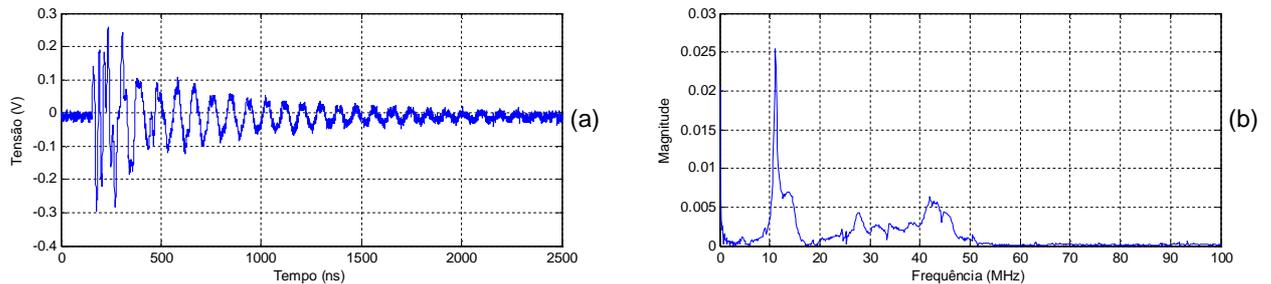


Figura 6.9 – Sinais captados pela antena distante da fonte. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência.



Nesta última situação um cabo coaxial, do tipo RG 58, foi utilizado com a função de uma antena para captar os sinais de DPs. Para utilização do cabo como antena, foi removido 26 cm (mesmo tamanho da antena SSC, cujos resultados foram apresentados anteriormente) da capa flexível de proteção e da blindagem, deixando apenas o dielétrico exposto, conforme ilustrado na Figura 6.10.

Figura 6.10 – (a) Cabo coaxial utilizado no estudo; (b) Utilização do cabo coaxial como antena.



(a)



(b)

A metodologia utilizada para avaliação do cabo coaxial funcionando como antena consistiu em acoplá-lo a barra, e em seguida aplicar um sinal de calibração conhecido em uma das extremidades da barra e registrar os sinais de DPs para diferentes comprimentos. Iniciou-se as medições com os 26 cm e foi-se diminuindo o comprimento do cabo, de 4 em 4 cm até zero. Os resultados para 26 cm são apresentados na Figura 6.11. Já a Figura 6.12 apresenta o comportamento da amplitude do sinal registrado em função comprimento da

parte exposta cabo. Os gráficos dos espectros de frequência mostram que a maior densidade de energia dos sinais medidos pelo cabo coaxial se mostra na faixa de 40 a 55 MHz, com uma pequena concentração na faixa de 10 a 20 MHz.

Figura 6.11 – Sinal registrado com 26 cm de cabo coaxial. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência.

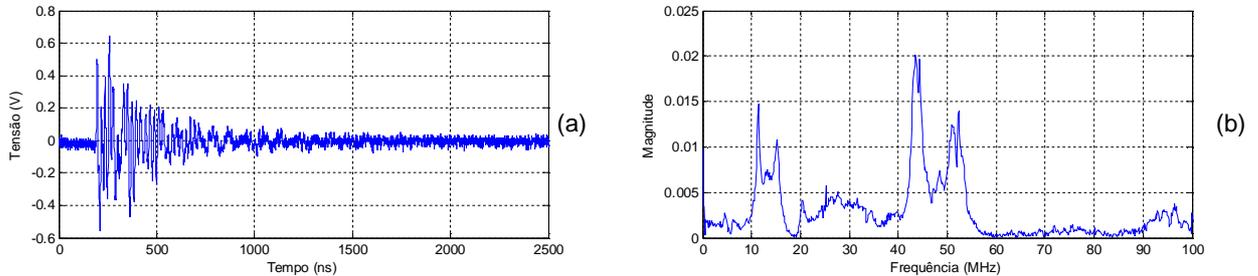
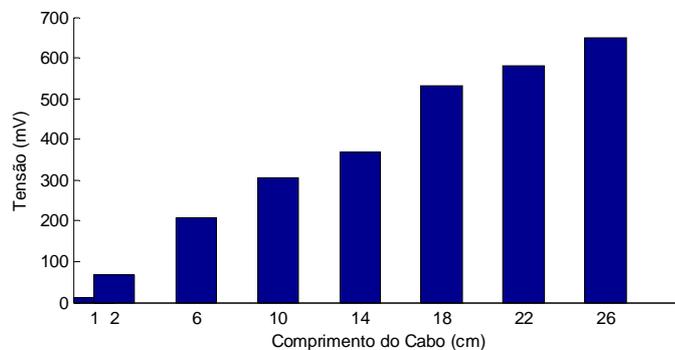
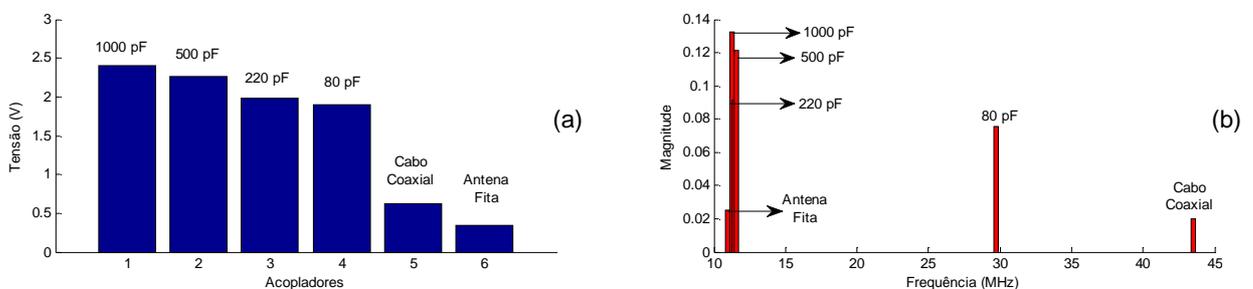


Figura 6.12 – Amplitude do sinal em função com comprimento do cabo.



A seguir, é feita uma comparação de sensibilidade para esta etapa do estudo. É feita a verificação da sensibilidade dos acopladores através da aplicação de um sinal conhecido de calibração. A Figura 6.13 ilustra essa comparação. Nota-se que para a aplicação de um sinal de calibração os acopladores capacitivos apresentaram maior sensibilidade em relação a antena e o cabo coaxial.

Figura 6.13 – Comparação entre os diferentes sistemas de medição durante os ensaios com alta tensão. (a) Máxima amplitude; (b) Magnitude máxima do sinais pela frequência.

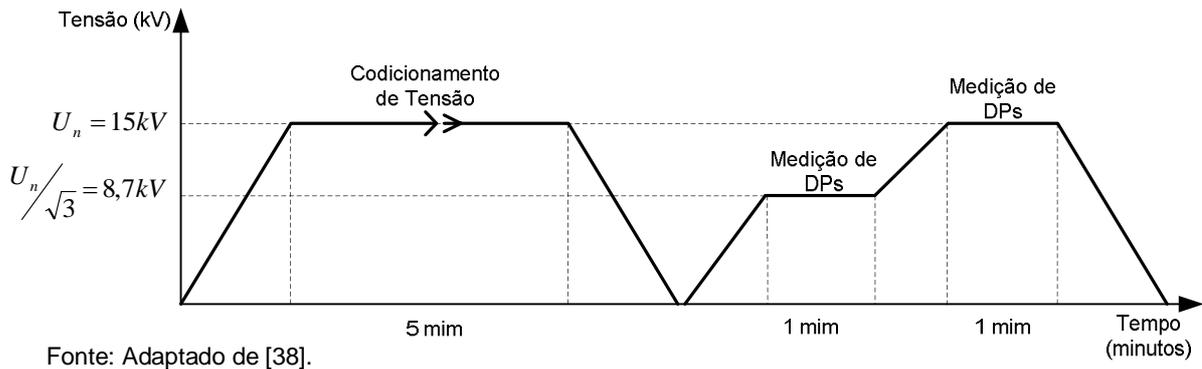


6.1.2 Ensaios com Alta Tensão

Os ensaios com alta tensão foram realizados utilizando a metodologia proposta por [38]. O ensaio da barra foi iniciado com um condicionamento de tensão U_n (tensão nominal

da barra) durante cinco minutos. Após isso, a tensão foi elevada a partir de zero até $U_n/\sqrt{3}$ onde efetuou-se a primeira medição do padrão de descargas parciais em um intervalo de aquisição de 60s. Após a obtenção dos dados da primeira medição, a tensão foi elevada até o próximo patamar de tensão (U_n) onde a segunda medição foi realizada. A Figura 6.14 ilustra as rampas de tensão usadas nas medições, incluindo a etapa de condicionamento.

Figura 6.14 – Procedimento de ensaio utilizado durante as medições de descargas parciais.



Os acopladores testados nesta fase do estudo foram os capacitores de 80 e 220 pF e a antena desenvolvida pela UFPA. Os outros dois capacitores (500 e 1000 pF) e o cabo coaxial não puderam ser testados nesta etapa, pois a impedância de medição utilizada nos ensaios com alta tensão para medição de DPs não era apropriada para a tensão de saída deles.

No primeiro momento, foram testados os capacitores de acoplamento e, durante a execução dos ensaios observou-se o surgimento dos primeiros inícios DPs a partir de 10 kV. As Figuras 6.15 e 6.16 apresentam os resultados obtidos para os capacitores de acoplamento de 80 e 220 pF em 15 kV, respectivamente. Observa-se nas figuras que o capacitor de 80 pF mediu um sinal mais atenuado em relação ao capacitor de 220 pF. Em relação aos espectros de frequência, notar-se que a maior densidade de energia dos sinais medidos pelos dois acopladores se concentram na faixa de 0 a 10 MHz, com uma pequena concentração na faixa de 30 a 40 MHz. Os mapas estatísticos medidos pelos dois acopladores mostraram uma simetria das descargas positivas (que ocorrem no semi ciclo negativo) e das descargas negativas (que ocorrem no semi ciclo positivo). Este padrão é classificado em [21] como descargas internas.

Figura 6.15 – Padrão de DPs, medido a 15 kV pelo acoplador de 80 pF. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência; (c) Mapa estatístico.

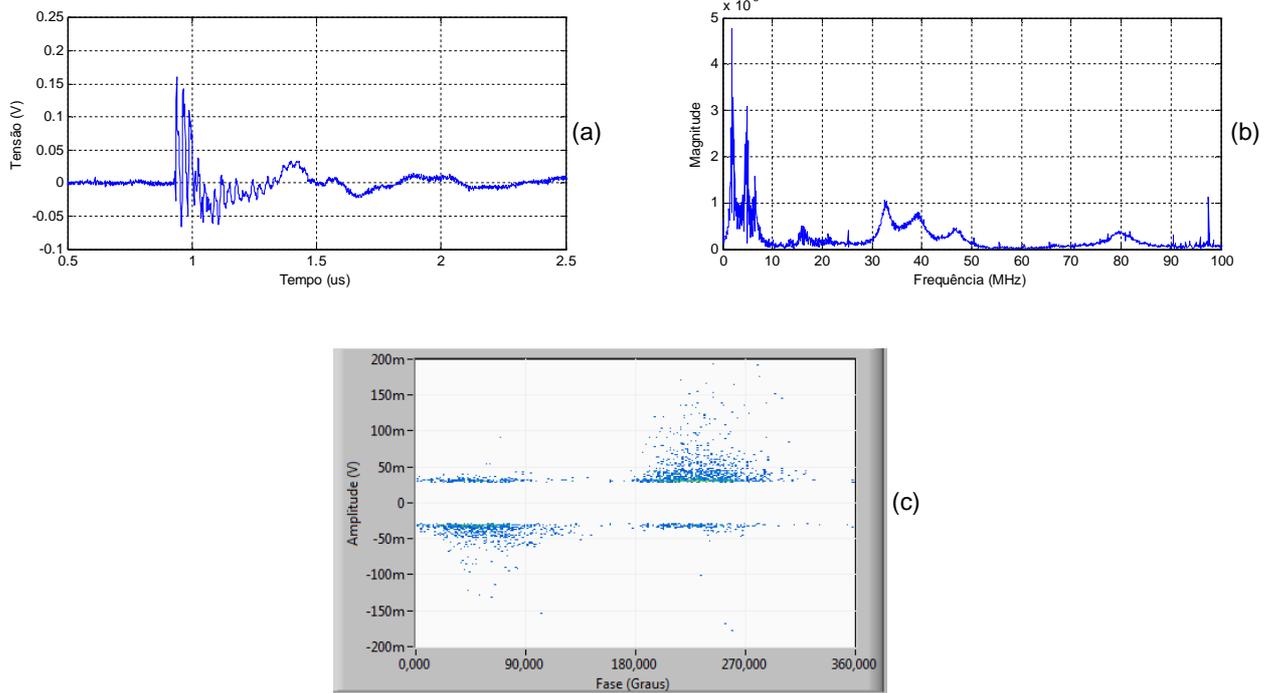
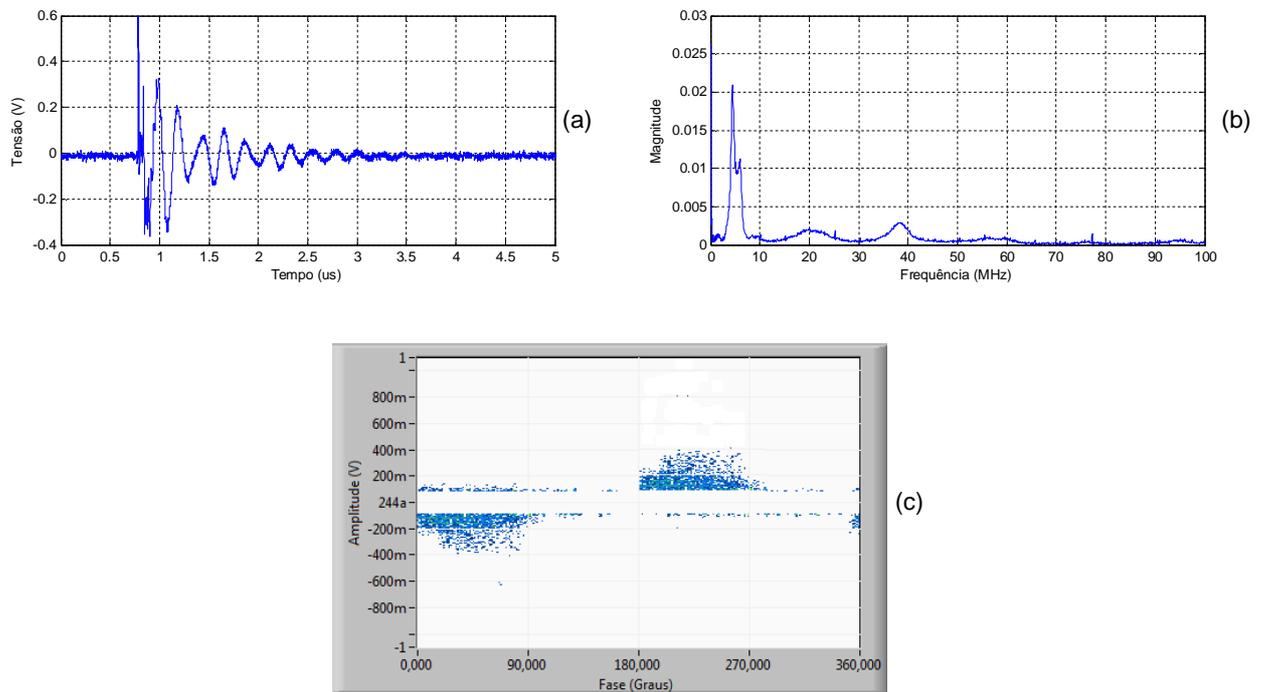


Figura 6.16 - Padrão de DPs, medido a 15 kV pelo acoplador de 220 pF. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência; (c) Mapa estatístico.



A segunda fase dos ensaios com alta tensão foi o teste com a antena No primeiro momento, a antena foi acoplada à camada condutiva da barra, conforme Figura 6.17(a), porém, nesta posição, apesar da antena captar os sinais de DPs, não foi possível obter o sincronismo do sinal de 60 Hz com os sinais de DPs para a montagem do mapa estatístico, a explicação para ausência de sincronismo nessa região é que nesta área da barra o campo

elétrico é muito baixo. Por este motivo a antena foi reposicionada para a posição da barra onde o campo elétrico é mais intenso, conforme a Figura 6.17 (b). Os resultados são apresentados na Figura 6.18. Observa-se que a antena mediu um sinal com maior amplitude em relação aos dois acopladores. Em relação ao espectro de frequências, notar-se que novamente a maior densidade de energia dos sinais medidos se concentra na faixa de 0 a 10 MHz, com uma pequena concentração na faixa de 10 e 30 MHz. O mapa estatístico medido pela antena mostrou a mesma simetria, entre as descargas positivas e negativas, apresentada no mapa dos acopladores, porém com um deslocamento de 90° em relação ao mapa medido pelos acopladores.

Figura 6.17 – Antena instalada na barra para os ensaios com alta tensão. (a) Instalada na ranhura; (b) Instalada na extremidade da barra, região com maior intensidade campo elétrico.

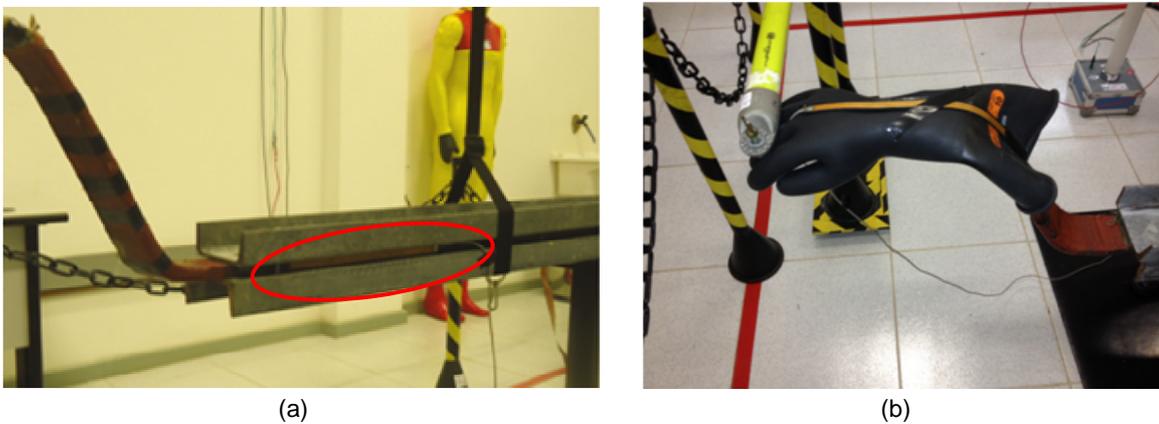
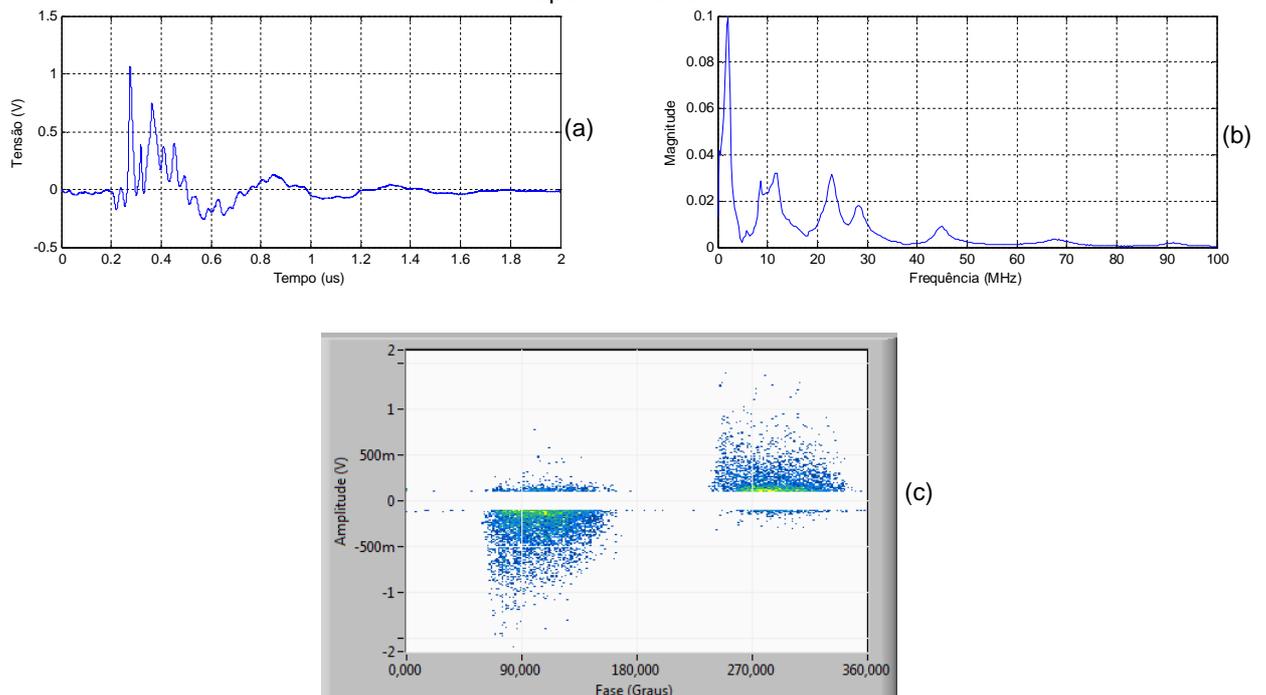


Figura 6.18 - Padrão de DPs, medido a 15 kV pela antena. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência; (c) Mapa estatístico.



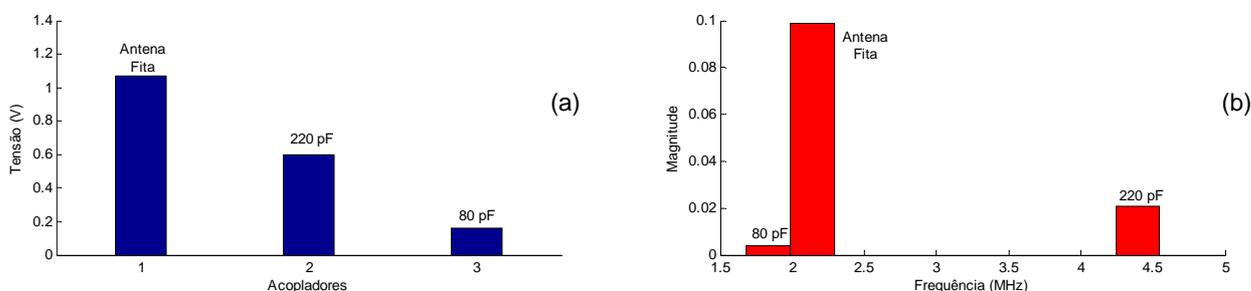
Uma comparação é realizada, a seguir, entre os ensaios com alta tensão para medição de descargas parciais utilizando os acopladores capacitivos e a antena através da Tabela 6.1 e a Figura 6.19. Nelas pode-se observar que a sensibilidade da antena, durante os ensaios com alta tensão, é maior que a do método convencional de medição de DPs em hidrogeradores utilizando os acopladores capacitivos de 80 e 220 pF.

Os resultados obtidos em laboratório mostraram que a medição de descargas parciais através da antena pode ser realizada de forma satisfatória na avaliação da condição operacional dos enrolamentos do estator de hidrogeradores, sem perda significativa de informação ou sensibilidade na quantificação do fenômeno.

Tabela 6.1 – Características das medições de descargas parciais.

Acoplador	Amplitude Média das Descargas (mV)		Número de Pulsos	
	Positiva	Negativa	Positivos	Negativos
Antena	231,38	280,24	3645	5590
Capacitor de Acoplamento de 220 pF	151,76	140,88	2475	2103
Capacitor de Acoplamento de 80 pF	43,14	36,08	1584	1099

Figura 6.19 – Comparação entre os diferentes sistemas de medição durante os ensaios com alta tensão. (a) Máxima amplitude; (b) Magnitude máxima do sinais pela frequência.

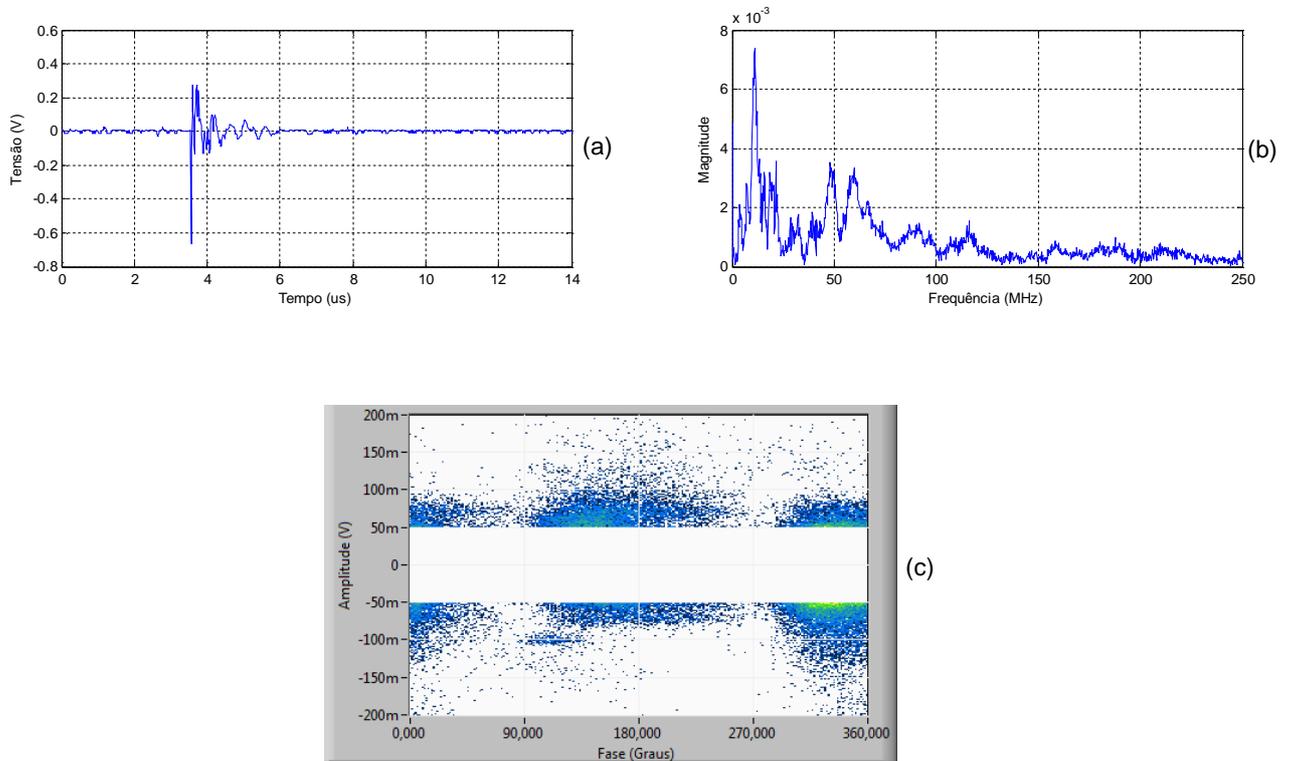


6.2 MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS NO CAMPO

Nos dias 18 e 19 de Junho de 2013, foi realizada uma campanha de medição de descargas parciais em três máquinas de uma usina hidrelétrica de 78 MW que possui o acoplador de 220 pF instalado na saída de fase das máquinas. As medições foram feitas em todas as fases das três máquinas e, no decorrer das medições constatou-se que apenas a fase A da máquina 2, de 24 MW, apresentava sinais com características de DPs. As Figura 6.20 (a) e (b) apresentam um exemplo desses sinais no domínio do tempo e da frequência, em que pode-se observar componentes de alta frequência da ordem de algumas dezenas de MHz.

Para auxiliar na identificação da origem dos sinais registrados na fase A da máquina 2 foi utilizado o *software* IMA-DP para o levantamento do mapa estatístico das descargas parciais, o resultado desta medição é apresentado na Figura 6.20 (c), pode-se observar um padrão assimétrico no mapa estatístico, as DPs negativas que ocorrem no semi ciclo positivo da senoide de 60 Hz são maiores em número e amplitude que as DPs positivas que ocorrem no semi ciclo negativo. Este padrão é classificado em [21] como descarga de delaminação entre condutores e a isolamento. Como maioria dos sinais apresentavam baixa intensidade, inferior a 200 mV, a recomendação foi acompanhar sua evolução, e, em uma próxima parada da máquina, investigar com mais atenção a fase A.

Figura 6.20 – Sinal de descarga registrado na fase A da máquina 2. (a) Domínio do tempo; (b) Domínio da frequência; (c) Mapa estatístico.



7 CAPÍTULO – CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo geral analisar experimentalmente técnicas para medição de descargas parciais nos enrolamentos do estator de hidrogeradores. Para atingir o objetivo proposto, foi montado em laboratório um arranjo experimental para o estudo das técnicas de medição de descargas parciais nos enrolamentos do estator utilizando seis acopladores diferentes. Deste seis, quatro eram acopladores capacitivos convencionais (utilizados na maioria das usinas hidrelétricas) de 80, 220, 500 e 1000 pF, e dois sistemas experimentais, uma antena tipo SSC fabricada com microfita e um cabo coaxial RG 58, desencapado, utilizado com a função de antena.

A avaliação da sensibilidade destes seis sistemas foi dividida em duas etapas: primeiro foi analisada a respostas dos acopladores a aplicação de um sinal conhecido de calibração e em seguida foi analisada a resposta dos mesmos durante ensaios com alta tensão. Para aplicação de um sinal conhecido de calibração os acopladores capacitivos apresentaram maior sensibilidade em relação a antena e o cabo coaxial, observou-se que quanto maior a capacitância maior é a sensibilidade. Já a resposta durante os ensaios com alta tensão mostrou que a sensibilidade da antena, é maior que a do método convencional de medição de descargas parciais em hidrogeradores utilizando os acopladores capacitivos de 80 e 220 pF, ressalta-se que todos os sistemas avaliados com alta tensão detectaram o padrão de descargas internas quando a barra era submetida a uma tensão de 15 kV.

Os resultados obtidos em laboratório mostraram que a medição de descargas parciais através da antena pode ser realizada de forma satisfatória com resultados comparáveis aos dos métodos convencionais, utilizando acopladores capacitivos, porém com maior sensibilidade.

Sugestões para Trabalhos Futuros:

Para os próximos trabalhos sugere-se, investigar em laboratório, através do arranjo experimental, os padrões para os demais tipos de descargas nos enrolamentos do estator como: descargas de ranhura, descargas na cabeça da bobina e descargas por partículas condutivas.

Sugere-se também, após o levantamento de todos os padrões, a criação de um sistema inteligente que classifique as descargas através de padrões conhecidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] 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.
- [02] SANTOS, R.L.S., “Estudo da Influência do Ciclo de Partidas e Paradas no Estator de Geradores Síncronos”. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, 2011,
- [03] TAVNER, P.J., JACKSON, R.J., “Coupling of Discharges Current Between Conductor of Electrical Machines”, IEEE Electric Power Application, vol.135, No 6, 1988.
- [04] 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.
- [05] 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.
- [06] 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.
- [07] 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.
- [08] 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, 394-397.
- [09] 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.
- [10] 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.

[11] 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.

[12] SU, Q., “Analysis of Partial Discharges Pulse Propagation Along Generator Stator Windings”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 1, 2000, pp. 269-272.

[13] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, “IEEE Std 1434 Guide to Measurement of Partial Discharge in Rotating Machinery”, USA, 2000.

[14] INTERNACIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION, “IEC 60270 High Voltage Test Techniques – Partial Discharges Measurements”. Suíça, 2000.

[15] CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES, “CIGRÉ 366 Guide for Partial Discharges Measurements in Compliance to IEC 60270”. Working Group D1.33, 2008.

[16] PEMEN, A.J.M., LAAN VAN DER, P.C.T., LEEUW, W., “Analysis and Localization of Spurious Partial Discharge Activity in Generator Units”, IEEE 7th International Conference on Proceedings, Eindhoven, 2001, pp. 489-492.

[17] GROSS, D.W., “Partial Discharge Measurement and Monitoring on Rotating Machines”, Electrical Insulation, IEEE International Symposium on Conference Record, 2002.

[18] GROSS, D.W., “Signal Transmission and Calibration of On-line Partial Discharge Measurement”, 7th International Conference on Proceedings of the Properties and Applications of Dielectric Materials, vol. 1, 2003, pp. 335-338.

[19] 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.

[20] AMORIM, H.P., LEVY, A.F.S., CARVALHO, A.T., “Estudo Sobre a Influência dos Acopladores Capacitivos na Sensibilidade da Medição de Descargas Parciais em Máquinas Elétricas Rotativas”. In: XX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Grupo de Estudo de Geração Hidráulica – GGH, Recife, Brasil, 2009.

- [21] 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.
- [22] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, "IEEE Std 1799 Recommended Practice for Quality Control Testing of External Discharges on Stator Coils, Bars and Windings", USA, 2012.
- [23] UEMORI, M., ROCHA, J., "Fundamentos de Projetos e Reabilitação de Geradores para Centrais Hidrelétricas", Princípios de Manutenção e Reabilitação de Geradores Síncronos, Brasil, 2012.
- [24] IRIS POWER ENGINEERING, "PD Seminar – Volume 1", version 4.2, Toronto, Canada, 2004.
- [25] 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.
- [26] STONE, G.C., BOULTER, E.A., CULBERT, I., DIRHANI, H., "Electrical Insulation for Rotating Machines", Wiley Interscience/ IEEE Press, USA, 2004, pp. 01-40.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] TAYLOR, N., "Dielectric Response and Partial Discharge Measurements on Stator Insulation at Varied Low Frequency". Tese de Doutorado, School of Electrical Engineering, Suécia, 2010.
- [30] CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEAUX ÉLECTRIQUES, "CIGRÉ 392 Survey of Hydrogenerator Failures", Working Group A1.10, 2009.
- [31] 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.

- [32] NAIDU, M.S., KAMARAJU, V., "High Voltage Engineering – Second Edition". 2ª ed, McGraw-Hill, USA, 1996, pp. 01-48.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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, Comite de Estudos A1 – Máquinas Elétricas Rotativas, Puerto Iguazú, Argentina, 2009.
- [36] 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.
- [37] TURRIONI, J.B., MELLO, C.H.P., "Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção", Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá, 2012, pp. 69-89.
- [38] SILVA, M.J, FERREIRA, F., POMPEU, I., CORDEIRO, J.F., "Desenvolvimento de uma Metodologia de Medição de Descargas Parciais para o Controle de Qualidade de Componentes Elétricos de Máquinas Rotativas". In: III ENAM – Encontro Nacional de Monitoramento, Foz do Iguaçu, Brasil, 2006.
- [39] Lesaint, O.; Lebey, T.; Dinculescu, S.; Debruyne, H.; Petit, A., "Propagation of fast PD signals within stator bars performance and limitations of a high frequency monitoring system," Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003. Conference on Proceedings of the 7th International, vol.3, 1-5, 2003, pp.1112-1115.