



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

**ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DE ACOPLADORES DIRECIONAIS
MICROSTRIP NA MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM UMA BOBINA
DE HIDROGERADOR**

Patrese Veras Quelemes

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Abril de 2016

Patrese Veras Quelemes

**ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DE ACOPLADORES DIRECIONAIS
MICROSTRIP NA MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM UMA BOBINA
DE HIDROGERADOR**

Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Abril de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

Q3a

Quelemes, Patrese Veras.

Análise da sensibilidade de acopladores direcionais *microstrip* na medição de descargas parciais em uma bobina de hidrogerador / Patrese Veras Quelemes. – Campina Grande, 2016.

100 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

"Orientação: Prof. D. Sc. Edson Guedes da Costa".

Referências.

1. Acoplador Direcional *Microstrip*. 2. Descargas Parciais. 3. Filtragem *wavelet*. 4. Hidrogerador. I. Costa, Edson Guedes da. II. Título.

CDU 621.311.16(043)

**"ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DE ACOPLADORES DIRECIONAIS MICROSTRIP NA
MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM UMA BOBINA DE HIDROGERADOR"**

PATRESE VERAS QUELEMES

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 21/03/2016



**EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)**



**RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG
Examinador(a)**



**TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)**

CAMPINA GRANDE - PB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe e ao meu pai; aos meus irmãos, amigos, professores e a todos, que de alguma forma, contribuíram para o êxito desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me dado força e sabedoria ao longo dessa jornada.

A minha família, que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, me apoiando nos momentos de dificuldades. Obrigado por contribuir com tantos ensinamentos e tantas palavras de força e conhecimento.

A meu orientador, Prof. D. Sc. Edson Guedes da Costa, pelo apoio, acompanhamento e incentivo durante todas as etapas desta pesquisa.

Aos meus colegas de pós-graduação, que de alguma forma contribuíram no desenvolvimento deste trabalho. Em especial, agradeço a ajuda dos amigos da linha de pesquisa de descargas parciais: Luiz Augusto Nobrega, Pedro Venske e Margareth Mee.

A todos os professores e funcionários do Laboratório de Alta Tensão (LAT), pela convivência harmoniosa, pelas trocas de conhecimento e experiências que foram tão importantes na minha vida acadêmica. Em especial, ao professor Alexandre Serres pela ajuda na área de acopladores direcionais *microstrip* e a disponibilidade de materiais.

A Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) por disponibilizar as bobinas de hidrogenador utilizadas nesta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (COPELE) pelo apoio financeiro.

Patrese Veras Quelemes

*“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei; não fosse por elas, eu não
teria saído do lugar. As facilidades nos impedem de caminhar.
Mesmo as críticas nos auxiliam muito.”*

(Chico Xavier)

RESUMO

Neste trabalho é realizado um estudo, com base em dados experimentais, para a análise da sensibilidade de acopladores direcionais *microstrip* como sensores para medição de descargas parciais em uma bobina de hidrogerador. Para isso, foram confeccionados quatro acopladores direcionais *microstrip* e, através de testes realizados em laboratório, avaliou-se a aplicabilidade dos acopladores na detecção de pulsos eletromagnéticos provenientes de descargas parciais. Como forma de validar as medições de descargas parciais obtidas pelo acoplador de melhor sensibilidade, utilizou-se outros dois sensores: um transformador de corrente de alta frequência (*High Frequency Current Transformer - HFCT*) e um capacitor de acoplamento de 1000 pF. A aquisição dos dados foi realizada com um osciloscópio digital de quatro canais e o processamento dos dados com o *software* Matlab®. A avaliação das medições obtidas nos experimentos foi feita por meio da relação sinal-ruído (RSR), pela contagem do número de pulsos detectados e a verificação dos padrões representados em função da tensão aplicada, método conhecido por *PRPD (Phase Resolved Partial Discharge)*. Os resultados obtidos em laboratório demonstraram que o acoplador direcional *microstrip* proposto pode ser aplicado, como sensor, para a medição de descargas parciais em uma bobina de hidrogerador. O mesmo consiste em uma solução viável, de baixo custo de fabricação e com uma ótima sensibilidade. No entanto, para validar a aplicação do sensor proposto, ainda é necessário um estudo mais aprofundado, considerando todas as implicações decorrentes de sua instalação em um hidrogerador real, bem como o ambiente em que estará inserido.

Palavras-chave: acoplador direcional *microstrip*, descargas parciais; filtragem *wavelet*; hidrogerador.

ABSTRACT

In this work is realized a study based on experimental data, for analyzing the sensitivity microstrip directional couplers as sensors for measuring partial discharges in a hydro generator coil. To do so, four microstrip directional couplers were fabricated and through laboratory tests, we evaluated the applicability of these couplers for detecting electromagnetic pulses originating from partial discharges. In order to validate the measurements obtained by the partial discharges coupler better sensitivity, we used two sensors: a high frequency current transformer (HFCT) and a coupling capacitor 1000 pF. Data acquisition was performed with a digital oscilloscope four channels and data processing with the Matlab® software. The evaluation of the measurements obtained in the experiments was performed by the signal-to-noise ratio (SNR), the number of detected pulses counting and checking of the patterns plotted against the applied voltage, known method *PRPD* (Phase Resolved Partial Discharge). The results obtained in our laboratory demonstrated that the microstrip directional coupler proposed can be applied as a sensor for measuring partial discharges in a hydro generator coil. The same consists of a viable solution, with low manufacturing cost and a great sensitivity. However, to validate the application of the proposed sensor, a further study is still needed, considering all the implications of his installation in a real hydro generator, as well as the environment in which will be inserted.

Keywords: microstrip directional coupler, partial discharges; wavelet filtering; hydro generator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	- (a) Estator completo: enrolamentos fixados no núcleo; (b) Rotor completo.....	19
Figura 2.2	- Causas raízes de falhas em hidrogeradores.....	20
Figura 2.3	- Causas de falhas no sistema de isolamento elétrica.....	20
Figura 2.4	- Fontes de descargas parciais no isolamento do estator.....	24
Figura 2.5	- Tipos de descargas parciais em arranjos básicos: a) Descargas tipo corona; b) Descarga na superfície; c) Descargas internas; d) Descargas em material laminado; e) Descargas entre espiras, em enrolamentos de máquinas elétricas girantes.....	24
Figura 2.6	- Forma de onda característica de um pulso de descarga.....	27
Figura 2.7	- Mapa estatístico das descargas parciais em um hidrogerador....	30
Figura 2.8	- Fenômenos associados à ocorrência de descargas parciais.....	32
Figura 2.9	- Fotografia de acopladores capacitivos de 80 pF.....	33
Figura 2.10	- Fotografia de acopladores capacitivos de 80 pF.....	34
Figura 2.11	- Esquema simplificado de um acoplador na ranhura do estator..	35
Figura 2.12	- Impedância de medição de descargas parciais.....	36
Figura 2.13	- Ilustração de um acoplador direcional 2x2.....	38
Figura 2.14	- Acoplador direcional utilizado no monitoramento de potência..	39
Figura 2.15	- Estrutura geométrica de uma linha de transmissão microstrip..	40
Figura 2.16	- Campos em linhas de transmissão: a) linha coaxial; b) linha bifilar.....	40
Figura 2.17	- Campo elétrico em uma linha de transmissão microstrip.....	41
Figura 2.18	- (a) Estrutura não homogênea; (b) Estrutura homogênea.....	42
Figura 2.19	- Razão da potência acoplada em função do comprimento da linha de transmissão.....	43
Figura 2.20	- Limiares de rejeição: (a) suave; (b) brusco.....	50
Figura 4.1	- (a) Pedacos de uma bobina; (b) Dimensões do pedaço de bobina utilizado.....	57
Figura 4.2	- Detalhe da vista da secção transversal do sistema de isolamento de uma bobina de múltiplas espiras.....	58
Figura 4.3	- Ensaio de descargas parciais realizado para cada barra individualmente.....	58
Figura 4.4	- Estrutura para o ensaio de descargas parciais em uma bobina..	59
Figura 4.5	- Curto circuito no terminal de uma bobina de múltiplas espiras..	59
Figura 4.6	- Placa de circuito impresso dupla face (FR-4).....	60

Figura 4.7	- Cabo coaxial RG223 com impedância de 50 Ω	61
Figura 4.8	- Gráfico da impedância característica (Z_0) com relação à largura da linha de transmissão (W).....	62
Figura 4.9	- Gráfico da frequência para máxima transferência de potência (f) com relação ao comprimento da linha de transmissão (L).....	65
Figura 4.10	- (a) Fotografia das partes constituintes dos quatro acopladores microstrip, (b) Identificação dos componentes.....	66
Figura 4.11	- Fotografia dos acopladores direcionais microstrip construídos.	67
Figura 4.12	- Circuito eletrônico do filtro passa-altas RC projetado.....	68
Figura 4.13	- Resposta em frequência do filtro passa-altas RC projetado.....	69
Figura 4.14	- Filtros passa-altas RC instalados no osciloscópio.....	69
Figura 4.15	- Esquema de medição de descargas parciais utilizando o capacitor de acoplamento.....	70
Figura 4.16	- Arranjo de medição de descargas parciais utilizando o HFCT.....	71
Figura 4.17	- Arranjo de medição de descargas parciais utilizando o acoplador direcional microstrip (ADM).....	72
Figura 4.18	- Circuito de medição de descargas parciais montado em laboratório.....	73
Figura 4.19	- Detalhe da localização dos acopladores microstrip na bobina.....	74
Figura 5.1	- Sinal obtido com o acoplador de 40 cm sem a filtragem analógica.....	76
Figura 5.2	- Sinal obtido com o acoplador de 40 cm após a filtragem analógica.....	77
Figura 5.3	- Sinal original e filtrado do acoplador microstrip de 10 cm.....	78
Figura 5.4	- Sinal original e filtrado do acoplador microstrip de 20 cm.....	78
Figura 5.5	- Sinal original e filtrado do acoplador microstrip de 30 cm.....	79
Figura 5.6	- Sinal original e filtrado do acoplador microstrip de 40 cm.....	79
Figura 5.7	- Pulsos de descargas parciais de uma das 60 amostras obtidas com os três tipos de sensores.....	80
Figura 5.8	- Relação entre o número de pulsos detectados e o comprimento da linha.....	81
Figura 5.9	- Relação entre o número de pulsos detectados e a frequência para a máxima transferência de potência.....	82
Figura 5.10	- Gráfico <i>PRPD</i> do acoplador direcional microstrip de 10 cm.....	84
Figura 5.11	- Gráfico <i>PRPD</i> do acoplador direcional microstrip de 20 cm.....	84
Figura 5.12	- Gráfico <i>PRPD</i> do acoplador direcional microstrip de 30 cm.....	85

Figura 5.13	- Gráfico <i>PRPD</i> do acoplador direcional microstrip de 40 cm.....	85
Figura 5.14	- Sinal original e filtrado do acoplador microstrip de 40 cm.....	86
Figura 5.15	- Sinal original e filtrado do capacitor de acoplamento.....	87
Figura 5.16	- Sinal original e filtrado do HFCT	87
Figura 5.17	- Forma de onda de um pulso de descarga parcial obtido com o acoplador microstrip de 40 cm.....	88
Figura 5.18	- Forma de onda de um pulso de descarga parcial obtido com o capacitor.....	89
Figura 5.19	- Forma de onda de um pulso de descarga parcial obtido com o HFCT.....	89
Figura 5.20	- Sinais de descargas parciais obtidos com os três sensores após a filtragem.....	90
Figura 5.21	- Detalhamento dos pulsos obtidos com o acoplador <i>microstrip</i> de 40 cm.....	91
Figura 5.22	- Gráfico <i>PRPD</i> do acoplador direcional microstrip de 40 cm.....	92
Figura 5.23	- Gráfico <i>PRPD</i> do capacitor de acoplamento de 1000 pF.....	93
Figura 5.24	- Gráfico <i>PRPD</i> do HFCT.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	– Causas de falhas no sistema de isolação elétrica.....	21
Tabela 2.2	– Tipos de descargas parciais relacionadas a padrões de mapas estatísticos de Pesquisas de Energia Elétrica.....	31
Tabela 2.3	– Estado de degradação do isolamento de maquinas rotativas.....	35
Tabela 3.1	– Resumo das principais pesquisas e normas técnicas relacionadas a descargas parciais.....	51
Tabela 3.2	– Continuação: Resumo das principais pesquisas e normas técnicas relacionadas a descargas parciais.....	52
Tabela 4.1	– Características técnicas da placa de circuito impresso.....	61
Tabela 4.2	– Comprimento da linha <i>microstrip</i> e sua respectiva frequência para máxima transferência de potência.....	65
Tabela 5.1	– Análise de sensibilidade dos acopladores direcionais <i>microstrip</i> ...	81
Tabela 5.2	– Análise de sensibilidade dos três sensores.....	91

LISTA DE SIGLAS

ADM	-	Acoplador Direcional Microstrip
AM	-	Amplitude Modulation
ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEA	-	Canadian Electricity Association
BNC	-	British Naval Connector
CEPEL	-	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CHESF	-	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
CIGRÈ	-	International Council on Large Electric Systems
CNPq	-	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DPs	-	Descargas Parciais
HFCT	-	High Frequency Current Transformer
IEC	-	International Electrotechnical Commission
IEEE	-	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LAT	-	Laboratório de Alta Tensão
NQN	-	Quantidade de Número Normalizada
PCI	-	Placa de Circuito Impresso
PRPD	-	Phase Resolved Partial Discharge
RC	-	Resistor e Capacitor
RF	-	Rádio Frequência
RSR	-	Relação Sinal-Ruído
SMA	-	SubMiniature Version A
SNR	-	Signal Noise Ratio
SSC	-	Stator Slot Coupler
TEM	-	Transverse Electromagnetic
TWC	-	Transformada Wavelet Contínua
UFMG	-	Universidade Federal de Campina Grande
UHF	-	Ultra High Frequency
UTP	-	Unshielded Twisted Pair

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Motivação.....	15
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 Objetivo Geral.....	16
1.2.1 Objetivos Específicos.....	17
1.3 Organização do Trabalho.....	17

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores.....	18
2.1.1 Introdução.....	18
2.1.2 Falhas em Máquinas Rotativas.....	19
2.1.3 Causas de Falhas nos Enrolamentos do Estator.....	20
2.1.4 Fontes de Descargas Parciais no Isolamento do Estator.....	21
2.2 Descargas Parciais.....	25
2.2.1 Introdução.....	25
2.2.2 Forma do Pulso das Descargas Parciais.....	26
2.2.3 Grandezas Associadas às Descargas Parciais.....	27
2.2.4 Descargas Parciais Associadas à Fase - Mapas Estatísticos.....	29
2.2.5 Métodos de Medição de Descargas Parciais.....	31
2.2.6 Sensores de Descargas Parciais.....	33
2.2.7 Impedância de Medição.....	36
2.2.8 Instrumentos de Medição de Descargas Parciais.....	37
2.3 Acoplador Direcional <i>Microstrip</i>	37
2.3.1 Introdução.....	37
2.3.2 Linhas de Transmissão Impressas <i>Microstrip</i>	39
2.3.3 Modo Transversal Eletromagnético (TEM).....	40
2.3.4 Equações para o Cálculo dos Parâmetros da Linha de Transmissão <i>Microstrip</i>	42
2.4 Filtragem <i>Wavelet</i>	48
2.4.1 Introdução.....	48

2.4.2 Processo de <i>Denoising</i>	48
2.4.3 Limiares de Rejeição.....	49
CAPÍTULO 3	
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	51
CAPÍTULO 4	
MATERIAL E MÉTODOS.....	57
4.1 Material.....	57
4.1.1 Enrolamento Estatórico de Hidrogerador.....	57
4.1.2 Arranjo Experimental para Ensaios em Alta Tensão.....	58
4.2 Métodos.....	60
4.2.1 Local das Montagens Experimentais.....	60
4.2.2 Confeção dos Acopladores Direcionais <i>Microstrip</i>	60
4.2.3 Dimensionamento do Filtro Passa-altas RC.....	67
4.2.4 Esquemas de Medição de Descargas Parciais em uma Bobina de Hidrogerador.....	70
4.2.5 Aquisição dos Sinais de Descargas Parciais.....	72
4.2.6 Processamento e Análise dos Sinais de Descargas Parciais obtidos.....	74
CAPÍTULO 5	
RESULTADOS E ANÁLISES.....	76
5.1 Resultados Obtidos com os Quatro Acopladores Direcionais <i>Microstrip</i>	76
5.2 Resultados Obtidos com o Acoplador Direcional <i>Microstrip</i> de 40 cm, HFCT e Capacitor de Acoplamento.....	86
CAPÍTULO 6	
CONCLUSÕES.....	95
6.1 Trabalhos Futuros.....	96
REFERÊNCIAS.....	97

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

No contexto atual dos sistemas elétricos, os ativos são remunerados pelas horas de fornecimento de energia elétrica disponibilizadas. Assim, as linhas de transmissão, equipamentos das subestações e os hidrogeradores devem permanecer em plenas condições de uso. Com isso, a manutenção preditiva tornou-se uma 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 realização de sua manutenção.

Neste modelo, os desligamentos devem ser realizados de maneira programada, de forma a eliminar ou minimizar as perdas de ativos, além de evitar as altas multas impostas pela agência reguladora do setor elétrico (ANEEL), com relação às horas de fornecimento interrompido.

Paradas não planejadas, devido a falhas em máquinas rotativas, fizeram com que os engenheiros de manutenção buscassem meios de monitoramento dos principais tipos de falhas, de forma a possibilitar um melhor controle do seu funcionamento e da realização de manutenções preditivas. A adoção de manutenções preditivas, como forma de substituir as manutenções preventivas, busca migrar da condição de manutenção baseada no tempo para a manutenção baseada nas condições do equipamento, otimizando assim a sua vida útil.

Com base na análise de centenas de estudos, o Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE) concluiu que as falhas em grandes máquinas rotativas estão relacionadas com:

- Problemas em mancais e vibração, dentre outros (mecânicos - 50% das falhas);
- Problemas nos enrolamentos estáticos (elétricos - 40% das falhas);
- Problemas no rotor ou pólos (elétricos - 10% das falhas).

Quando existe uma diferença de potencial entre os terminais de um dielétrico (ar, SF₆, óleo isolante, fenolite, resinas, vidros, etc.), podem ocorrer pequenas descargas em parte desse dielétrico, nos pontos onde houver maior intensidade de campo elétrico ou onde a suportabilidade dielétrica for menor do que no restante do material isolante,

como no caso de pequenas cavidades gasosas no interior de um isolante sólido. Essas pequenas descargas são denominadas de descargas parciais (BARTNIKAS, 1979).

Na maioria das vezes, as falhas nos enrolamentos estatóricos (falhas elétricas) estão relacionadas ao aumento do nível de descargas parciais no sistema de isolamento. A ocorrência de descargas parciais nos sistemas de isolamento dos equipamentos de alta tensão é, portanto, um sintoma de fragilidade na sua suportabilidade dielétrica, cuja evolução, pode vir a acarretar graves consequências aos mesmos, logo, ao sistema elétrico interligado a eles. Assim, dependendo da intensidade das descargas parciais, a vida útil do equipamento poderá ser reduzida drasticamente (STONE et al., 1996).

Adicionalmente, experiências indicam que as descargas ocorrem anos antes da falha, oferecendo tempo suficiente para se planejar e executar as devidas manutenções. Dessa forma, um dos objetivos de se realizar o monitoramento dos níveis de descargas parciais é o de contribuir na determinação da relação entre as suas grandezas e a expectativa de duração útil do dielétrico e, se possível, definir a duração mínima dos equipamentos antes que seja necessária alguma intervenção (CUENCA, 2005).

Os estudos reiteram a importância da análise e avaliação dos enrolamentos estatóricos de máquinas rotativas, por meio do monitoramento dos seus níveis de descargas parciais. Os sensores que são tradicionalmente utilizados na medição de descargas parciais possuem um elevado preço. O acoplador direcional *microstrip* proposto neste trabalho, além de possuir um baixo custo de fabricação, também possui uma baixa captação de ruídos e ótima sensibilidade de detecção.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar, com base em dados experimentais, a aplicabilidade e sensibilidade de acopladores direcionais *microstrip*, como sensores para medição de descargas parciais em uma bobina de hidrogenador.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar em laboratório arranjos experimentais em uma bobina de hidrogenador, com o objetivo de estudar as técnicas de medição de descargas parciais mais viáveis;

- Desenvolver a prototipagem de quatro acopladores direcionais *microstrip*, e verificar qual acoplador possuirá a maior sensibilidade na detecção de pulsos de descargas parciais;
- Verificar a influência que o comprimento da linha de transmissão *microstrip* exerce na detecção de pulsos de descargas parciais;
- Analisar os resultados obtidos pelo acoplador direcional *microstrip* de melhor sensibilidade, comparando-o com as medições realizadas com um transformador de corrente de alta frequência (*High Frequency Current Transformer - HFCT*) e um capacitor de acoplamento, técnica já consolidada na literatura.

1.3 Organização do Trabalho

Esta dissertação está organizada em seis capítulos.

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica básica. Dentre os assuntos abordados, têm-se os tipos de falhas na isolação dos enrolamentos estatóricos de hidrogeradores, a descrição do fenômeno de descargas parciais, as técnicas de medição de descargas parciais, as principais equações que parametrizam uma linha de transmissão *microstrip* e uma breve abordagem sobre filtragem *wavelet*.

No capítulo 3 é feita uma revisão bibliográfica das principais pesquisas e normas técnicas relacionadas a descargas parciais, com ênfase em máquinas rotativas. A revisão bibliográfica realizada abrange estudos relacionados à propagação de sinais de descargas parciais nos enrolamentos do estator, bem como às técnicas de medição utilizadas na detecção destes sinais.

No Capítulo 4 são descritos materiais e métodos que possibilitaram as medições de descargas parciais em bobinas do hidrogerador, em laboratório.

No Capítulo 5 são expostos e analisados os resultados obtidos a partir das medições realizadas.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões da pesquisa e as propostas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No primeiro tópico deste capítulo, disserta-se sobre os enrolamentos estatóricos de hidrogeradores, os principais tipos de falhas e as características das diferentes fontes de descargas parciais encontradas no sistema de isolamento do hidrogerador.

No segundo tópico, é descrito a fundamentação teórica sobre descargas parciais, enfatizando os tipos de descargas, as definições das principais grandezas utilizadas, bem como os métodos e sensores utilizados nas medições.

No terceiro tópico, é apresentado um estudo sobre a teoria dos acopladores direcionais e as principais equações que parametrizam uma linha de transmissão *microstrip*. Tais informações servirão como base para a confecção de acopladores direcionais *microstrip*.

No último tópico, é feita uma breve descrição sobre a técnica de processamento digital de sinais, filtragem baseada em *wavelet*, utilizada na eliminação das componentes de frequência indesejadas (ruídos).

2.1 Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores

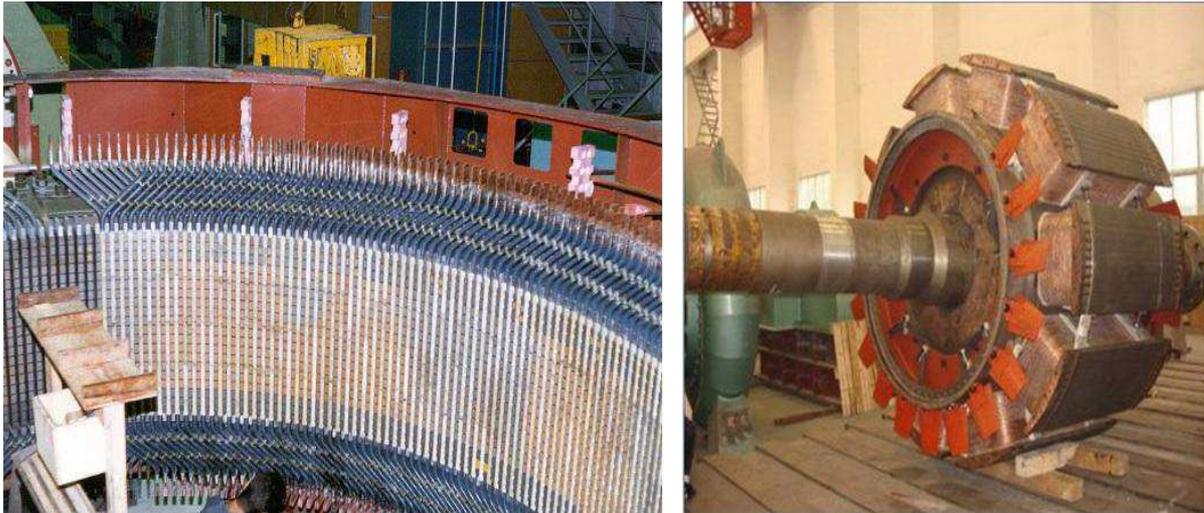
2.1.1 Introdução

Um hidrogerador é composto principalmente por dois componentes: o estator e o rotor. O rotor tem a função de desenvolver o campo magnético girante e o estator é um conjunto de condutores (bobinas) fixados por um núcleo aterrado, denominado núcleo do estator. Os enrolamentos funcionam como um condutor, proporcionando um caminho à corrente elétrica, enquanto que o núcleo concentra o campo magnético, fixa os enrolamentos e dissipa o calor gerado pelas altas correntes.

Uma vez que a diferença de potencial entre os enrolamentos e o núcleo aterrado do estator pode chegar a alguns milhares de volts, faz-se necessário separar essas duas superfícies com um material dielétrico. O material dielétrico também auxilia na transferência de calor para o núcleo, mas não tem nenhuma função na produção de energia elétrica ou torque em si. A isolação é a parte mais fraca e a que envelhece mais

rápido, por ação dos mais diversos tipos de estresses (elétricos, mecânicos, químicos e ambientais) que estão presentes em uma máquina em condições operacionais (IRIS POWER, 2004). Mostram-se na Figura 2.1, fotografias desses componentes em suas etapas de fabricação.

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



(a)

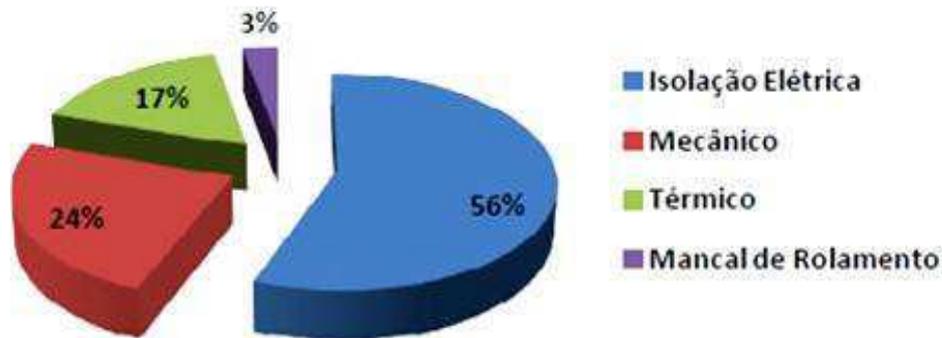
(b)

Fonte: (CEPEL, 2012).

2.1.2 Falhas em Máquinas Rotativas

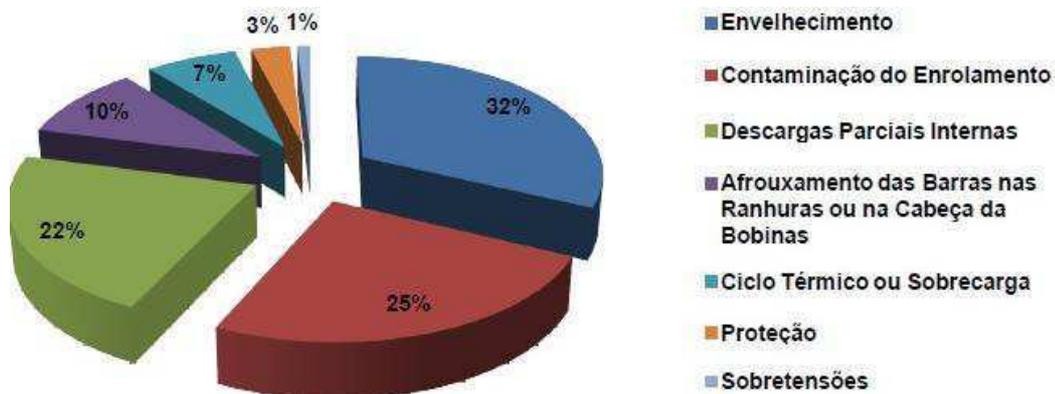
De acordo com Taylor (2010), existem duas formas de classificar as falhas em máquinas rotativas de alta tensão, uma é a condição em que a máquina foi encontrada após a falha; a outra é pela suspeita da causa raiz que originou a falha. Estudar a causa raiz pode ser muito mais interessante, mas, para fins de diagnóstico, o mais importante é saber 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.

Em um estudo sobre causas de falhas em hidrogeradores foram examinados 69 incidentes, em detalhes, e concluiu que as principais causas de falhas podem ser categorizadas na seguinte ordem: falhas no sistema de isolamento elétrico, defeitos mecânicos, problemas térmicos e, por último, falhas presentes nos mancais de rolamento (CIGRÈ 366, 2008). Pode-se observar na Figura 2.2 essa classificação:

Figura 2.2 – Causas raízes de falhas em hidrogeradores.

Fonte: Adaptado de Cigrè 366 (2008).

As falhas no sistema de isolação elétrica foram investigadas com mais detalhes e os resultados são ilustrados na Figura 2.3. As causas mais frequentes de falhas são relativas ao envelhecimento e à contaminação dos enrolamentos 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.

Figura 2.3 – Causas de falhas no sistema de isolação elétrica.

Fonte: Adaptado de Cigrè 366 (2008).

2.1.3 Causas de Falhas nos Enrolamentos do Estator

Na pesquisa de Stone *et al.* (2009) 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). Em particular, os estresses elétricos ocasionam a deterioração do isolamento

e que apresentam como sintoma a presença de descargas parciais com maiores magnitude e frequências. Na Tabela 2.1 são apresentados os resultados obtidos no estudo.

Tabela 2.1 – Causas de falhas no sistema de isolamento elétrica.

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: (STONE *et al.*, 2009)

2.1.4 Fontes de Descargas Parciais no Isolamento do Estator

A compreensão das características das diferentes fontes de descargas parciais encontradas dentro do isolamento do estator é importante durante a utilização de diferentes métodos de diagnóstico. De acordo com a norma IEC 60270 (2000), as fontes de descargas parciais em hidrogeradores são classificadas em quatro grupos: descargas

internas, descargas de ranhura, descargas na cabeça da bobina e descargas por partículas condutivas.

a) Descargas Internas

As descargas internas em hidrogeradores são classificadas em quatro tipos: cavidades internas, delaminação interna, delaminação entre condutores e a isolação e arborescência elétrica, que serão descritas a seguir.

Cavidades Internas

Embora os processos de fabricação objetivem minimizar cavidades internas, estas não são completamente eliminadas. O sistema de isolação de máquinas rotativas de alta tensão é geralmente composto por folhas de mica e tecido de fibra de vidro impregnado com resina sintética. A mica presente no sistema de isolação impede que as descargas parciais evoluam, o que resultaria na ruptura completa do dielétrico. Caso essas cavidades sejam pequenas e não aumentem significativamente com o passar do tempo, a confiabilidade operacional da máquina não é comprometida.

Delaminação Interna

A delaminação interna no isolamento do estator pode ser causada pelo processo de fabricação ou pelo sobreaquecimento dos enrolamentos, onde, à medida que o sistema de isolação é exposto continuamente a esse sobreaquecimento, as resinas orgânicas tendem a perder sua rigidez mecânica, acarretando em 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 intensidade, que podem comprometer significativamente o sistema de isolamento. A delaminação também irá reduzir a condutividade térmica da isolação, o que pode levar ao seu envelhecimento precoce. Por esse motivo, é necessária uma atenção especial, quando forem detectadas descargas parciais com o padrão característico da delaminação.

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 à falha, especialmente em bobinas de múltiplas espiras.

Arborescência Elétrica

A arborescência elétrica que ocorre na isolação de máquinas rotativas é um processo de envelhecimento em que finos canais se propagam através do epóxi em torno das barreiras de mica e pode finalmente levar à falha elétrica do isolamento principal. Este processo é associado à atividade de descargas parciais internas.

b) Descargas de Ranhura

Descargas de ranhura em hidrogeradores ocorrem quando o revestimento da parte condutiva se danifica devido ao movimento da barra ou bobina na ranhura. Altos níveis de descargas aparecerão quando sérios danos mecânicos já estão presentes, o 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; o 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 deterioração 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.

c) Descargas na Cabeça da Bobina

Descargas corona na área da cabeça da bobina podem ocorrer em diversos locais com alta concentração de campo elétrico. As descargas normalmente ocorrem nas interfaces entre diferentes elementos da cabeça da bobina dos enrolamentos do estator. Elas podem ser classificadas em descargas de superfície e descargas entre fases.

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. O fenômeno pode acontecer quando nenhum revestimento para controle de estresse for aplicado na cabeça da bobina ou o revestimento aplicado se tornar ineficiente devido à contaminação por sujeira, umidade, porosidade, efeitos térmicos, entre outros. Este tipo de descarga normalmente é um mecanismo de falha muito lento, mesmo que o comportamento das descargas parciais esteja sujeito a alterações

relativamente rápidas devido aos efeitos da superfície. Descargas de superfície normalmente resultam em uma falta fase-terra.

Descargas entre Fases

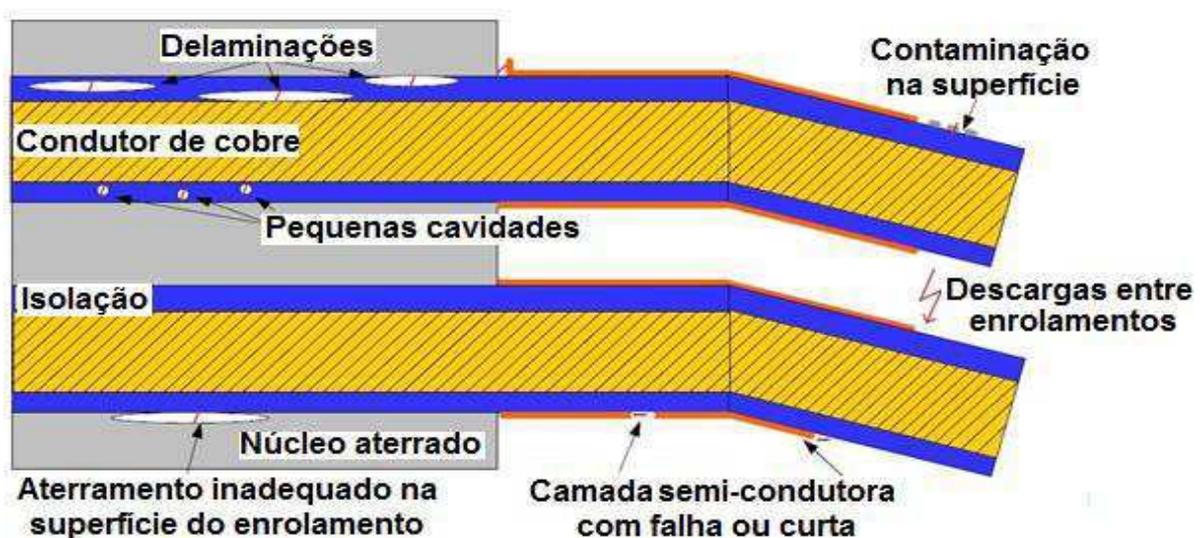
Descargas parciais entre fases podem ocorrer devido à inadequada distância de isolamento entre fases ou utilização de sistemas suporte da cabeça da bobina inadequado. Dependendo do projeto, as descargas podem ter magnitudes elevadas e ocorrer como descargas de superfícies ou descargas internas. Descargas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

d) Partículas Condutivas

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

Na Figura 2.4 são ilustrados dois enrolamentos que estão envolvidos por um núcleo aterrado. Na figura também se observa as fontes de falhas que provocam os principais tipos de falhas no isolamento do enrolamento de um hidrogerador. Os tipos mais comuns fontes de falhas são: pequenas cavidades internas, delaminações, falhas na camada semicondutora, aterramento inadequado, descargas entre enrolamentos muito próximos e contaminação na superfície do enrolamento.

Figura 2.4 – Fontes de descargas parciais no isolamento do estator.



Fonte: Adaptado de (BRASIL, 2014).

2.2 Descargas Parciais

2.2.1 Introdução

A descarga parcial é definida pela norma IEC 60270 (2000) como uma descarga elétrica localizada, que curto-circuita parte da isolação entre condutores e que pode ou não ocorrer adjacente a um condutor. De acordo com a norma IEC, também pode-se definir um pulso de descarga parcial como sendo um pulso de tensão ou corrente resultante de uma descarga parcial que ocorreu em um determinado isolamento sob teste. As descargas parciais são expressas em picoCoulombs (pC) ou milivolts (mV), e os seus sinais geralmente são de baixa amplitude e curta duração, tipicamente não mais de algumas centenas de nanosegundos (ns).

As descargas parciais são decorrentes da ionização de uma determinada região do dielétrico. A ionização é provocada pelo campo elétrico, cuja intensidade depende da forma do eletrodo, das características do dielétrico e da tensão aplicada. Devido a não uniformidade do campo elétrico, pequenas regiões do isolamento podem ser submetidas a solicitações superiores à sua rigidez dielétrica, resultando em descargas parciais (COSTA e NEVES, 1996; BARTNIKAS, 1979).

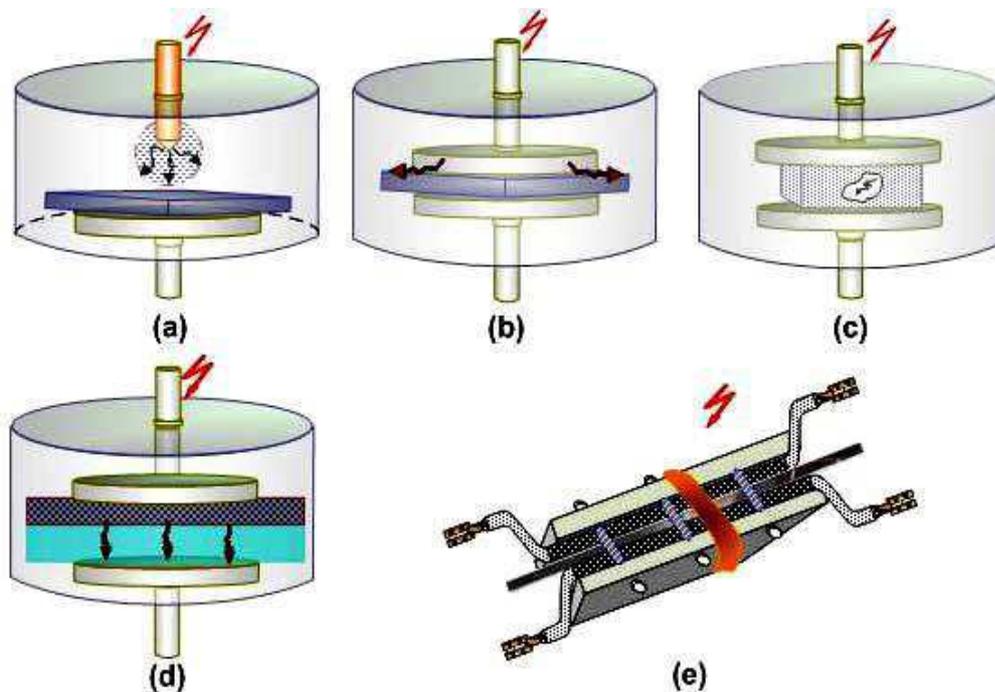
Considerando a intensidade e as características das descargas, tais como, taxa de repetição, a vida útil do material isolante pode ser reduzida. As descargas podem gerar, por exemplo, calor e agentes oxidantes como o ozônio, causando assim, a deteriorização do material isolante (NATTRASS, 1988).

O termo descargas parciais também envolve um amplo grupo de fenômenos de descarga, tais como: descargas internas, superficiais e corona. Descargas internas podem ocorrer em cavidades presentes em dielétricos sólidos ou bolhas contidas em dielétricos líquidos; descargas superficiais podem ocorrer na interface de isolamentos ou condutores e descargas corona são relativas a descargas em dielétricos gasosos, em regiões onde estão presentes elevados campos elétricos não-homogêneos (CUENCA, 2005).

São apresentadas na Figura 2.5, algumas descargas típicas baseadas em arranjos isolantes simples. Descargas tipo corona (Figura 2.5a) ocorrem em eletrodos tipo ponta ou condutores finos conectados a um alto potencial ou à terra, particularmente em instalações isoladas com ar/gás ou com materiais isolantes líquidos. Descargas na superfície (Figura 2.5b) e descargas em materiais laminados (Figura 2.5d) ocorrem nas

interfaces entre materiais isolantes diferentes como, por exemplo, entre gás/sólido. Descargas em pequenas cavidades de ar (Figura 2.5c) ocorrem em líquidos tanto quanto em materiais isolantes sólidos. Descargas tipo *slot* ocorrem em máquinas girantes: os modelos se baseiam em barras de geradores, as quais possuem ranhuras para reprodução do defeito, conforme pode ser visto na Figura 2.5e (RAJA, 2002).

Figura 2.5 – Tipos de descargas parciais em arranjos básicos: a) Descargas tipo corona; b) Descarga na superfície; c) Descargas internas; d) Descargas em material laminado; e) Descargas entre espiras, em enrolamentos de máquinas elétricas girantes.



Fonte: (RAJA, 2002).

2.2.2 Forma do Pulso das Descargas Parciais

O pulso de uma descarga parcial tem um tempo de subida extremamente rápido e um curto período de duração. O período de oscilação, o tempo de subida e as magnitudes dos picos subsequentes variam para cada pulso. As características das descargas, normalmente, dependem da geometria da máquina, da localização dos pulsos e do material isolante (IEEE 1434, 2000).

Os pulsos de descargas parciais possuem espectro de frequência que varia de kHz a GHz. Portanto é possível detectar atividades de descargas parciais em diversas bandas de frequência com algumas vantagens e desvantagens para cada banda. Isto também

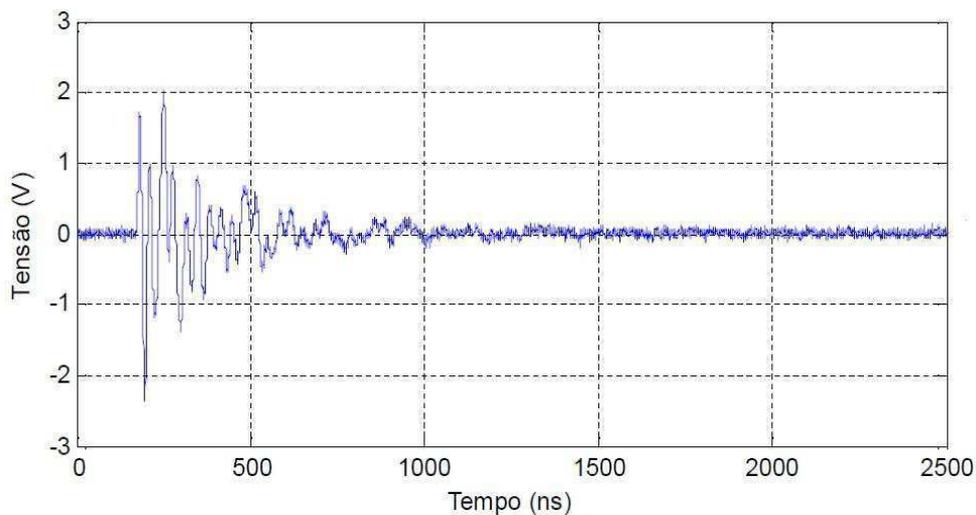
significa que nenhum instrumento pode detectar toda a energia dissipada devido a uma descarga parcial (IRIS POWER, 2004).

A maioria dos instrumentos de detecção de descargas parciais detecta apenas o início do pulso, que tem um tempo de subida de 1 a 5 ns. Considerando o tempo de subida (t_{sub}) como sendo quatro vezes o período da onda (T), a frequência do pulso é dada conforme Equação 2.1:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4 \times t_{sub}}. \quad (2.1)$$

Dessa forma, um tempo de subida de 1 a 5 ns corresponde a uma faixa de frequência de 50 a 250 MHz. A Figura 2.6 apresenta um pulso típico de descarga parcial.

Figura 2.6 – Forma de onda característica de um pulso de descarga.



Fonte: (CEPEL, 2012).

2.2.3 Grandezas Associadas às Descargas Parciais

A norma IEC 60270 (2000) estabelece as definições das grandezas relacionadas à medição de descargas parciais. A seguir, são descritas as principais grandezas.

a) Carga Aparente (q)

A carga aparente é o valor absoluto da carga que se injeta instantaneamente entre os terminais do objeto sob ensaio, provocando uma variação momentânea da tensão

entre seus terminais com valor igual ao da própria descarga parcial. A carga aparente é expressa em Coulomb (C).

b) Taxa de Repetição de Pulso (n)

A taxa de repetição de pulso é o número médio de pulsos de descargas por segundo, medido em um intervalo de tempo escolhido. Na prática, geralmente são considerados somente pulsos acima de uma intensidade específica.

c) Ângulo de Fase

O ângulo de fase é a posição do pulso de descarga em relação ao período da onda de tensão aplicada à frequência industrial, dado pela Equação 2.2:

$$\varphi = 360 \left(\frac{t_i}{T} \right), \quad (2.2)$$

em que:

φ : é o ângulo de fase ($^\circ$);

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

T : é o período da tensão de teste.

d) Tensão de Início de Descargas Parciais

A tensão de início de descargas parciais é o mais baixo valor de tensão na qual são observados os primeiros pulsos de descargas parciais, quando a tensão aplicada no objeto sob ensaio é gradualmente aumentada a partir de um valor, no qual ainda não são observadas descargas parciais.

e) Tensão de Extinção de Descargas Parciais

A tensão de extinção de descargas parciais é o mais alto valor de tensão na qual cessam as descargas parciais, quando a tensão é gradualmente diminuída a partir de um valor superior à tensão de início de descarga. Na prática, para fins de determinação das tensões de início e de extinção, levam-se em consideração apenas descargas parciais de intensidade superior a um valor especificado pela norma.

f) Frequências de Corte Inferior e Superior (f_1) e (f_2)

As frequências de corte inferior e superior 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.

g) Largura de Banda (Δf)

A largura de banda é a diferença entre as frequências de corte superior e inferior, dada pela Equação 2.3:

$$\Delta f = f_2 - f_1. \quad (2.3)$$

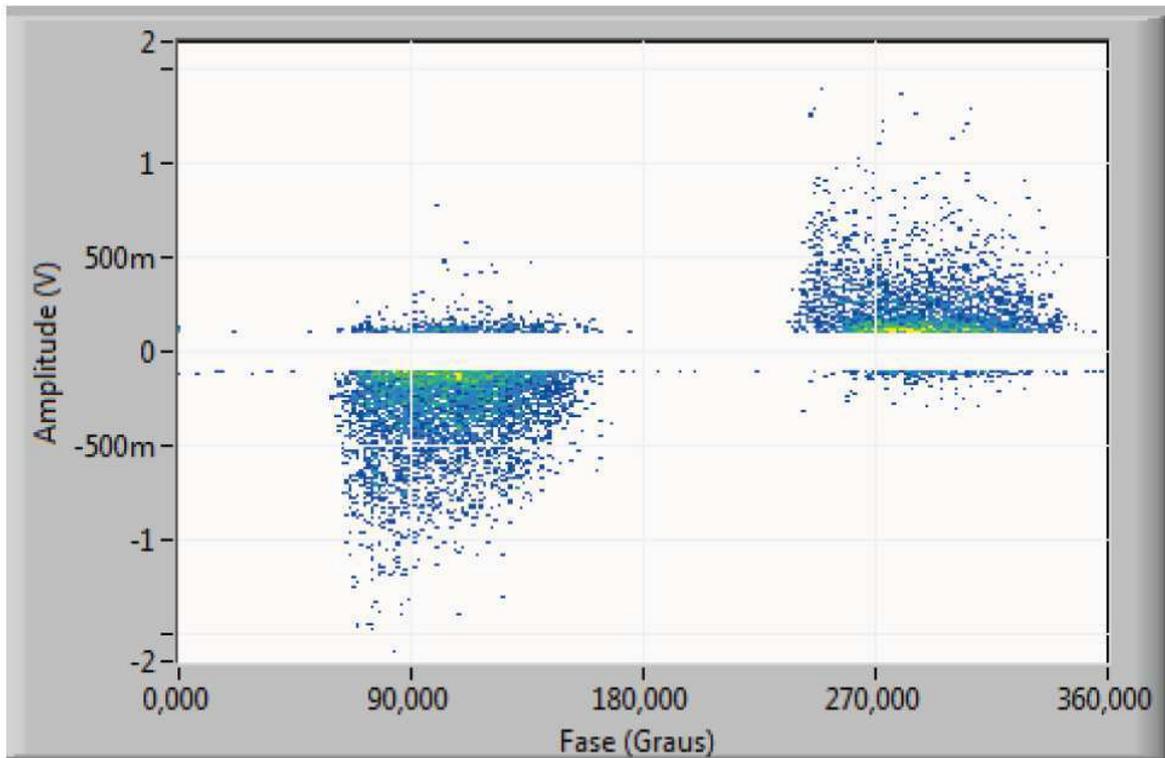
2.2.4 Descargas Parciais Associadas à Fase - Mapas Estatísticos

Segundo Hudon e Bélec (2005), a análise de associação à fase das descargas parciais atualmente é considerada uma das metodologias mais eficientes para a identificação das fontes de descargas parciais e foi incorporada aos mais modernos instrumentos de medição de descargas parciais.

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 das descargas parciais mede as amplitudes da carga aparente (q), relacionadas ao ângulo de fase (φ) da tensão de ensaio ou do sistema, durante certo intervalo de tempo.

Durante um determinado intervalo de tempo, os valores das amplitudes são acumulados e podem ser expressos pela razão da taxa de ocorrência (n), tais dados são classificados como mapas estatísticos das descargas parciais. Os *softwares* de análise exibem as informações como distribuições bivariadas do tipo (φ, q, n) , como exemplificado na Figura 2.7.

Pode-se observar na figura uma maior concentração de descargas parciais nas proximidades dos ângulos de fase (90° e 270°), características das descargas de delaminação ocorridas no isolamento do hidrogenador, com níveis de tensão que variam entre 0 e 1 Volt.

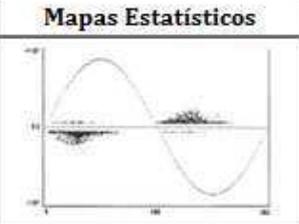
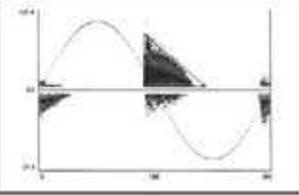
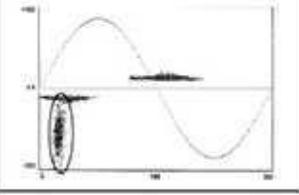
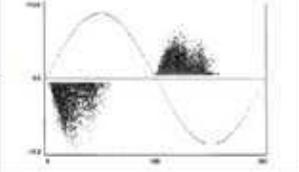
Figura 2.7 – Mapa estatístico das descargas parciais em um hidrogerador.

Fonte: (BRASIL, 2014).

Na Tabela 2.2 são apresentados alguns padrões de mapas estatísticos de descargas parciais em enrolamentos estáticos de hidrogeradores, obtidos nas pesquisas de Hudon e Bélec (2005). Os padrões são considerados importantes, pois auxiliam no diagnóstico mais exato do tipo de falha predominante no sistema de isolamento de um hidrogerador.

Conforme a tabela, as descargas internas possuem as mais baixas amplitudes de tensão, as descargas de ranhura possuem as maiores concentrações nas proximidades dos ângulos de fase (0° e 180°) e juntamente com as descargas por delaminações são os tipos de falhas no isolamento que possuem amplitudes de tensão mais elevadas, enquanto que as descargas de superfície possuem intensidades elevadas apenas em uma pequena região da senoide (30°).

Tabela 2.2 – Tipos de descargas parciais relacionadas a padrões de mapas estatísticos.

Tipos de Descargas	Mapas Estatísticos
Descargas Internas	
Descargas de Ranhura	
Descargas de Superfície	
Descargas de delaminações	

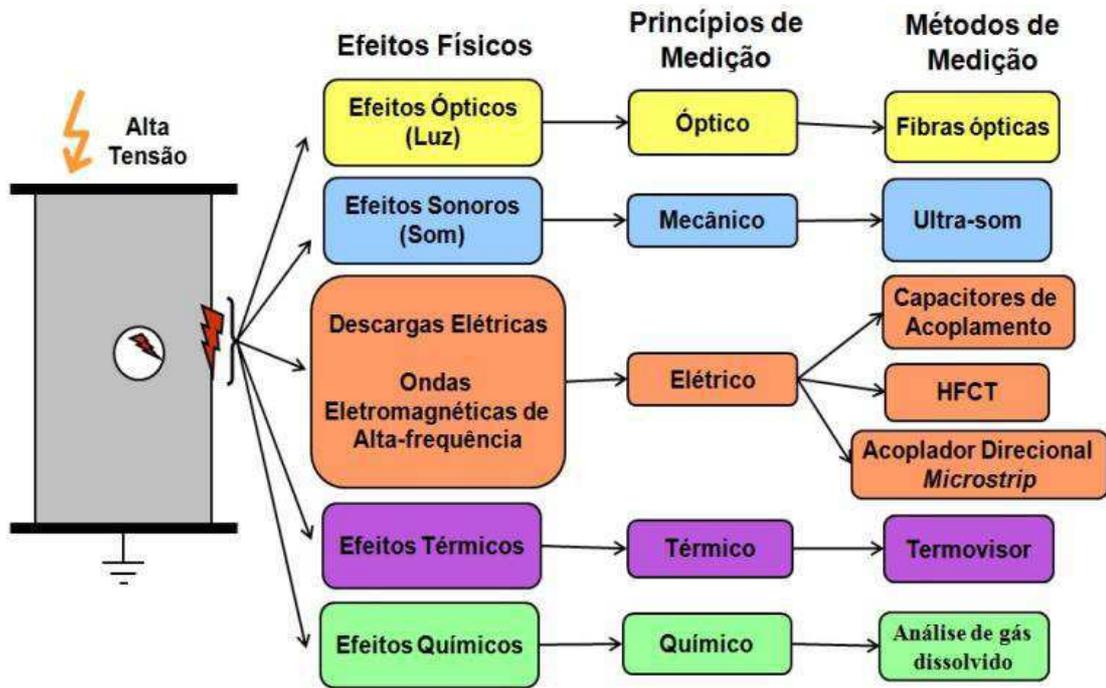
Fonte: (HUDON; BÉLIC, 2005)

2.2.5 Métodos de Medição de Descargas Parciais

De acordo com a norma IEEE 1434 (2000), as descargas parciais são acompanhadas por várias manifestações físicas, tais como: pulsos elétricos e pulsos de rádio frequências, perturbações acústicas, luz, assim como reações químicas em gases de resfriamento, que podem ser o ar ou o hidrogênio. Serão abordados apenas os métodos elétricos de medição, pois estes são os mais utilizados para avaliação da condição do isolamento dos enrolamentos de máquinas rotativas.

Os principais fenômenos associados à ocorrência de descargas parciais, bem como os seus princípios e métodos de medição estão ilustrados na Figura 2.8. Um pulso de descarga parcial propaga luz, que pode ser medido através de sensores de fibras ópticas; emite som, efeito monitorado por sensores de ultra-som; eleva a temperatura do material dielétrico, detectado com o auxílio de sensores térmicos; e em dielétricos líquidos, ocorrem manifestações químicas que podem ser quantificadas através da análise do gás dissolvido.

Figura 2.8 – Fenômenos associados à ocorrência de descargas parciais.



Fonte: Adaptado de (MACEDO, 2014).

Nas bobinas dos hidrogeradores, especificamente, a medição elétrica pode ser realizada utilizando sensores de descargas parciais que detectem as componentes dos sinais dos pulsos que se deslocam através dos enrolamentos do estator, ou por sensores que detectam as componentes do sinal irradiadas eletromagneticamente (IEC 60034-27-2, 2012).

a) Medição do Pulso Elétrico

Pelo fato das descargas parciais envolverem um fluxo de elétrons e íons ao longo de uma distância muito pequena e em um curto período de tempo, uma pequena corrente elétrica circula ao longo do enrolamento da máquina, toda vez que ela ocorre. A corrente total será formada pelo transporte de certo número de cargas em picoCoulomb (pC), que com o auxílio de uma impedância de medição, obtém-se uma tensão elétrica detectável pelos instrumentos de medição de descargas parciais.

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 detectados em cada segundo.

b) Medição da Radiação de Rádio Frequência

Em adição à criação de pulsos de tensão e de corrente nos enrolamentos do estator, a centelha (disrupção) também gera ondas eletromagnéticas de rádio frequência, que se propagam para além da fonte que originou a descarga parcial. A perturbação eletromagnética gerada por uma descarga parcial tem frequências de 100 kHz até várias centenas de MHz. Com um sensor eletromagnético apropriado, podem-se detectar as ocorrências de descargas parciais.

2.2.6 Sensores de Descargas Parciais

a) Capacitor de Acoplamento

O capacitor de acoplamento tem a função de transferir o espectro de alta frequência dos sinais de descargas parciais do enrolamento até o dispositivo de acoplamento, além de, simultaneamente, atenuar a tensão do sistema para baixas magnitudes. O capacitor de acoplamento deve ser livre de descargas parciais na tensão do sistema e deve possuir baixa indutância, para poder transmitir os pulsos de descargas parciais sem oscilações (CIGRÈ 366, 2008).

Na definição do valor do capacitor de acoplamento deve-se considerar a capacitância do objeto a ser avaliado, bem como a faixa de frequência em que se deseja realizar a medição. Comercialmente, alguns valores de capacitores de acoplamento foram estabelecidos por padronização, sendo possível encontrar capacitores de 80 pF, 220 pF, 550 pF e até 1000 pF (AMORIM, 2009). Na Figura 2.9, pode-se observar três acopladores capacitivos de 80 pF/15 kV, comercializado pela empresa HPVD®.

Figura 2.9 – Fotografia de acopladores capacitivos de 80 pF.



Fonte: Produzida pelo autor.

Uma configuração típica utilizando um acoplador capacitivo de 80 pF, com uma resistência de 690 Ω , apresenta uma frequência de corte inferior a aproximadamente 2,8 MHz. Isso significa que sinais abaixo desta frequência serão significativamente atenuados, o que pode representar perdas nos sinais de descargas parciais que compreendem essa região de corte.

b) HFCT (High Frequency Current Transformer)

O HFCT é um transformador de corrente de alta frequência projetado especificamente para captar sinais de descargas parciais. Ele tem um núcleo de ferrite, que pode ser aberto permitindo a sua instalação nos condutores de terra, sem a necessidade de desconexão. O corpo durável tem uma dobradiça e uma trava de liberação rápida, facilitando o manuseio. O HFCT é construído com um corpo de alumínio para fornecer blindagem RF e melhores desempenhos em ambientes ruidosos (HVPD, 2014). Na Figura 2.10, observam-se imagens de HFCT comercializados pela empresa HPVD®.

Figura 2.10 – Fotografias: (a) HFCT comercial; (b) HFCT instalado no condutor terra.



Fonte: <http://www.hvpd.co.uk/testing-and-monitoring-tools/sensors/high-frequency-current-transformer-hfct/>

Apresentam-se na Tabela 2.3, seis diferentes estados de degradação do isolamento utilizando o HFCT e capacitores de acoplamento, para máquinas rotativas de classe entre 10 -12 kV. O nível de descargas parciais é dado em picoCoulombs (pC) com o HFCT e em milivolts (mV) nos capacitores de acoplamento. Essa relação foi feita a partir

de dados da empresa *HVPD*[®] e também do guia *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS* e *CIGRE*.

Tabela 2.3 – Estado de degradação do isolamento de máquinas rotativas.

Estado do Isolamento	Nível de DP com <i>HFCT</i> (pC)	Nível de DP com Capacitores de Acoplamento (mV)
Excelente	<2000 pC	<20 mV
Bom	2000 a 4000 pC	20 a 40 mV
Médio	4000 a 10000 pC	40 a 100 mV
Ainda aceitável	10000 a 15000 pC	100 a 250 mV
Inspeção recomendada	15000 a 25000 pC	250 a 600 mV
Em risco	>25000 pC	>600 mV

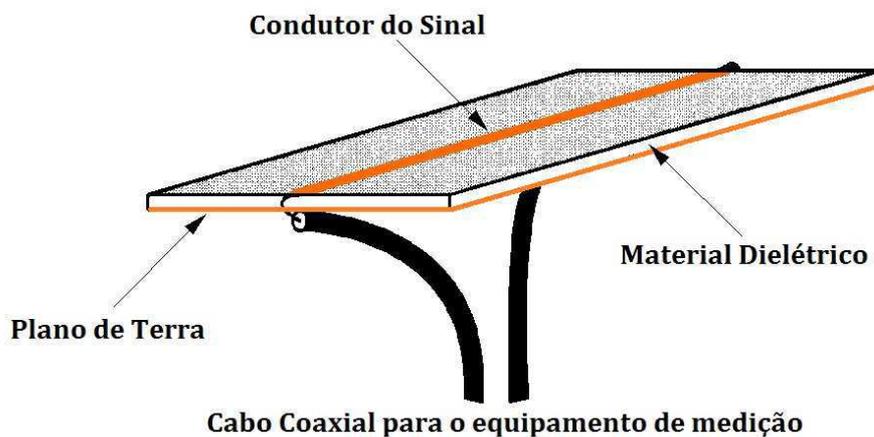
Fonte: Adaptado de *HPVD*, *IEEE* e *CIGRE*.

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

O SSC é, essencialmente, um acoplador eletromagnético, uma tecnologia bem conhecida no campo de micro-ondas. Porém, a aplicação como sensor de descargas em máquinas rotativas ainda é restrita. O acoplador é como o nome sugere geralmente instalado no *slot* do estator do gerador (IEC 60034-27-2, 2012).

O SSC consiste de um plano de terra e uma linha sensora com cabos coaxiais em cada extremidade de saída, conforme pode ser visto na Figura 2.11. O arranjo permite que uma onda eletromagnética, ocasionada por um pulso de descarga parcial, propague-se ao longo da linha sensora e produza um pulso de saída em cada extremidade.

Figura 2.11– Esquema simplificado de um acoplador na ranhura do estator (SSC).



Fonte: Adaptado de (SEDDING *et al.*, 1991).

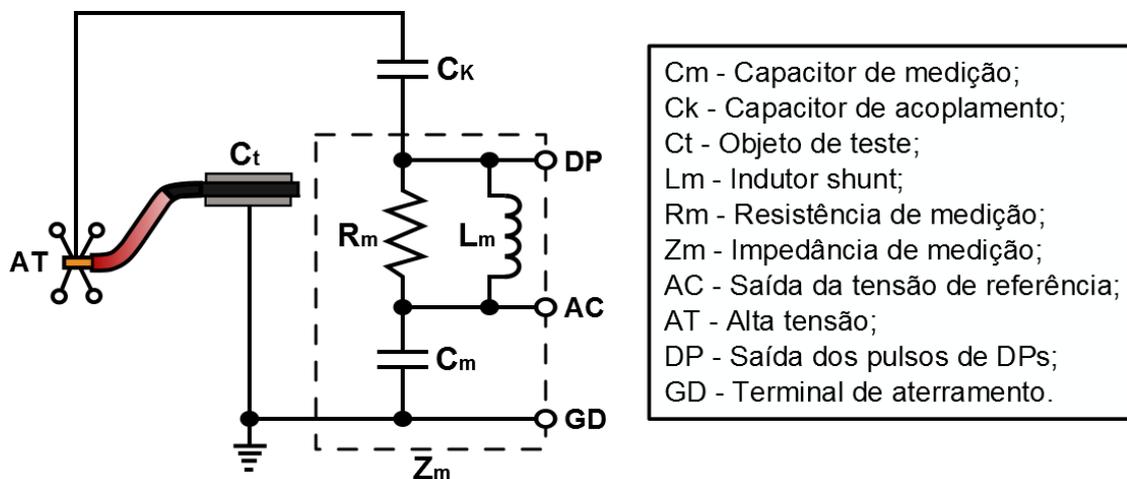
A impedância característica do SSC é, geralmente, de 50 ohms, casando com a impedância dos cabos coaxiais de saída padrão utilizados em medidores. A principal vantagem do SSC é a sua capacidade de produzir pulsos de respostas significativamente diferentes para as descargas parciais e para o ruído elétrico, permitindo a rejeição do ruído. Isso se deve aos efeitos naturais de filtragem do enrolamento do estator, em que todos os pulsos, não relacionados às descargas parciais, têm uma largura de pulso que excede 20 ns. Logo, os ruídos mais comuns, causados pela escova e arcos nos terminais, criam pulsos de tensão com duração relativamente longa, quando comparados com os sinais de descargas parciais (KAWAKATSU, 2009).

2.2.7 Impedância de Medição

Conforme a recomendação do CIGRÈ 366 (2008), para a medição dos parâmetros elétricos de tensão, faz-se necessária a introdução de uma impedância de medição, associada ao capacitor de acoplamento. A impedância de medição pode ser desde um simples resistor *shunt*, até um circuito envolvendo capacitores, indutores e resistores, que tenha como função, além de capturar os sinais de descargas parciais, fornecer o sinal de referência de tensão na frequência nominal.

No circuito da Figura 2.12, para as altas frequências, o indutor (L_m) funciona como um circuito aberto, enquanto que o capacitor como um curto-circuito (C_m). Por outro lado, para baixas frequências, o capacitor é um circuito aberto e o indutor um curto-circuito.

Figura 2.12 - Impedância de medição de descargas parciais.



Fonte: Adaptado de Cigrè 366 (2008).

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 60 Hz, sendo o indutor, um curto-circuito. Nas altas frequências, ele é um circuito aberto e somente a resistência é útil neste caso, onde é possível capturar os sinais de descargas parciais.

2.2.8 Instrumentos de Medição de Descargas Parciais

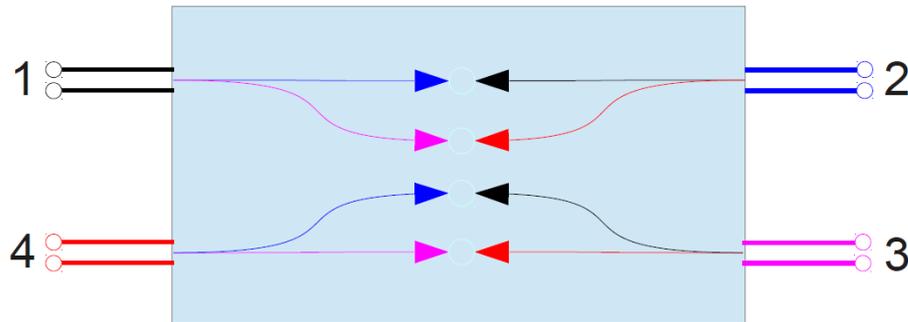
Os sinais elétricos dos dois tipos de sensores descritos podem ser medidos e adquiridos utilizando diversos instrumentos de medição. A norma IEC 60034-27-2 (2012) recomenda que se utilize um instrumento que possa, diretamente ou por processamento (analógico ou digital) subsequente dos sinais de descargas parciais medidos, fornecer ao menos: o valor da magnitude dos pulsos, a distribuição dos pulsos na fase e os mapas estatísticos. E pelo uso das informações disponibilizadas por *software*, seja possível realizar com confiabilidade a análise e interpretação do sinal de descargas parciais.

2.3 Acoplador Direcional *Microstrip*

2.3.1 Introdução

Um acoplador direcional ideal é um dispositivo de quatro portas, conforme a ilustração da Figura 2.13, que possuem as seguintes propriedades: uma onda eletromagnética incidente na porta 1 acopla potência nas portas 2 e 3, mas não na porta 4; uma onda eletromagnética incidente na porta 4 acopla potência nas portas 2 e 3, mas não na porta 1; uma onda eletromagnética incidente na porta 2 acopla potência nas portas 1 e 4, mas não na porta 3; uma onda eletromagnética incidente na porta 3 acopla potência nas portas 1 e 4, mas não na porta 2 (TRINTINALIA, 2013).

Conforme descrito acima, destaca-se a simplicidade do funcionamento dos acopladores direcionais *microstrip*, como uma das suas maiores vantagens. Além de possuírem um dimensionamento analiticamente equacionável, que será descrito posteriormente nesta seção.

Figura 2.13 – Ilustração de um acoplador direcional 2x2.

Fonte: (TRINTINALIA, 2013).

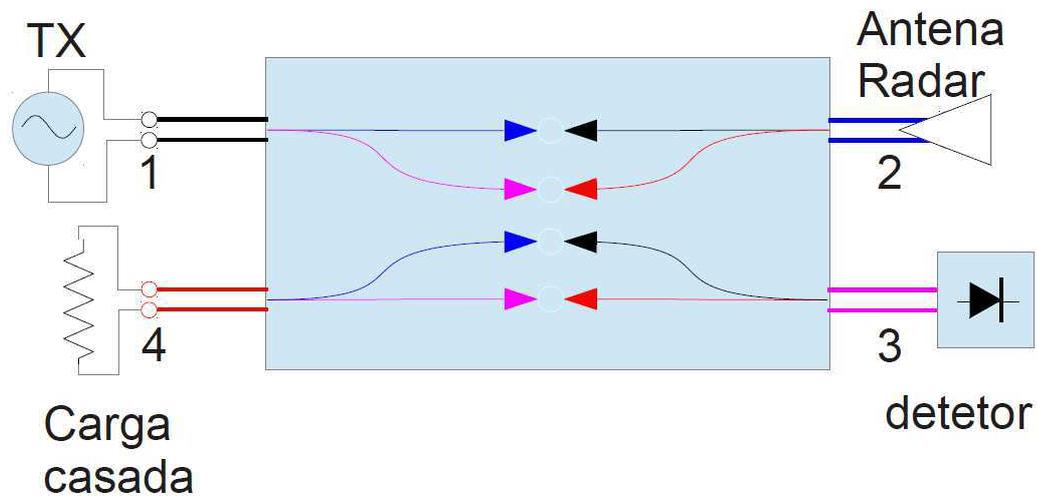
As quatro portas são casadas, isto é, se três portas forem terminadas com cargas casadas, a quarta porta aparece como se estivesse terminada por uma carga casada e uma onda incidente nessa porta não sofrera reflexão. Assim, as portas 1 e 4 são desacopladas, assim como as portas 2 e 3.

Conforme Trintinalia (2013) os acopladores direcionais são ferramentas largamente utilizadas em circuitos de radio frequência (RF) para isolar, separar ou combinar sinais. Algumas de suas principais aplicações:

- Monitoramento de potência;
- Controle de nível de potência;
- Isolamento de fontes de sinais;
- Amplificador com entrada balanceada;
- Modulador e demodulador AM;
- Modulador em quadratura;
- Medidas de coeficiente de reflexão e transmissão em varredura.

Um exemplo de sua aplicação no monitoramento de potência de um sistema de radar é mostrado na Figura 2.14. Como a onda refletida pela antena/radar, se existir, não acopla na porta 3, o detector monitora apenas a potência de saída do transmissor. Isso acontece devido à existência de uma carga casada na porta 4, que absorve possíveis ondas refletidas pela antena/radar.

Figura 2.14 - Acoplador direcional utilizado no monitoramento de potência.



Fonte: (TRINTINALIA, 2013).

2.3.2 Linhas de Transmissão Impressas *Microstrip*

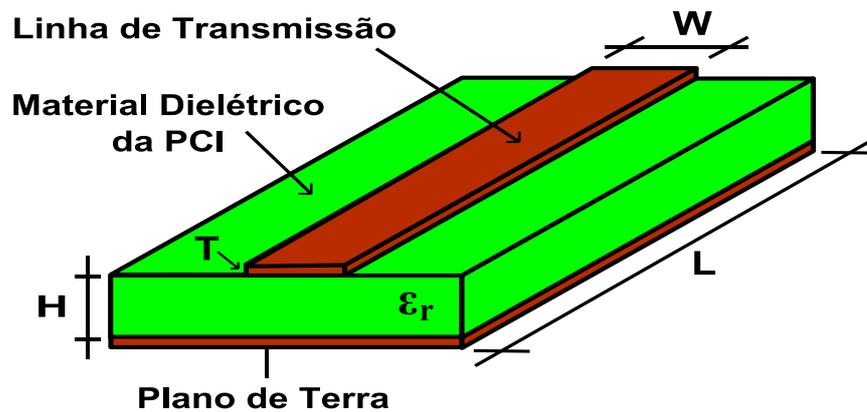
Os acopladores direcionais *microstrip* são linhas de transmissão impressa que permitem a propagação guiada de energia eletromagnética. Das várias estruturas impressas possíveis, a *microstrip* é a que é mais amplamente utilizada. Trata-se de uma linha de transmissão muito versátil, amplamente utilizada em frequências da ordem de MHz a GHz. A sua popularidade deve-se essencialmente à sua fácil construção (utiliza os mesmos processos que os circuitos impressos convencionais) e à vasta gama de aplicações, não só como linhas de transmissão, mas também como filtros e antenas (FRENZEL, 2013). Os parâmetros mais importantes de uma linha de transmissão *microstrip* são:

- Impedância característica (Z_0);
- Constante dielétrica relativa (ϵ_r);
- Constante dielétrica relativa efetiva (ϵ_{ref});
- Largura (W);
- Largura efetiva (W_{ref});
- Espessura (T);
- Comprimento físico (L);
- Constante de atenuação (α);

Alguns desses parâmetros apresentam dispersão com a frequência e dependem da geometria das estruturas do substrato e da linha de transmissão *microstrip*.

A linha de transmissão *microstrip* consiste em uma fita (*strip*) condutora, impressa sobre um substrato dielétrico, cuja forma mais usual é representada na Fig. 2.15. Os parâmetros construtivos mais importantes da linha condutora são a largura (W), a largura efetiva (W_{ef}), a espessura micrométrica (T), a impedância característica (Z_0) e o comprimento (L). Já os parâmetros do substrato são a altura (H) e a constante dielétrica relativa (ϵ_r) e efetiva (ϵ_{ref}). Em geral, tem-se que: $L > W$ e $W > H$.

Figura 2.15 - Estrutura geométrica de uma linha de transmissão *microstrip*.

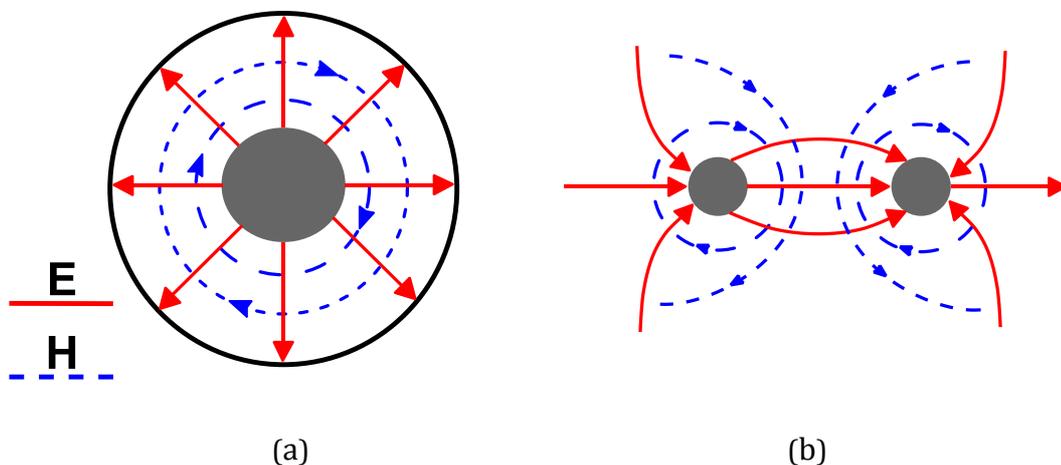


Fonte: Produzida pelo autor.

2.3.3 Modo Transversal Eletromagnético (TEM)

Um cabo coaxial e uma linha bifilar, conforme é ilustrado na Figura 2.16 em corte transversal são dois exemplos de estruturas que permitem guiar energia eletromagnética entre dois pontos. A distribuição dos campos elétricos e magnéticos nestas estruturas é mostrada na mesma figura.

Figura 2.16 - Campos em linhas de transmissão: a) linha coaxial; b) linha bifilar.

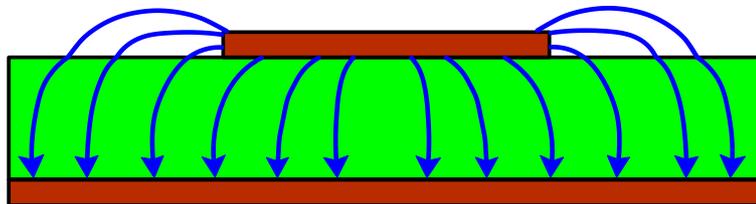


Fonte: Produzida pelo autor.

Ambas as estruturas suportam modos de propagação *TEM* – *Transverse electromagnetic*, isto é, o campo elétrico e o campo magnético são ortogonais entre si e ambos transversais à direção de propagação. Quando assim é, torna-se possível o estudo da propagação recorrendo à análise convencional de circuitos não sendo necessário recorrer à teoria eletromagnética geral. Mas há outros casos em que o modo *TEM* não pode ser considerado, é o exemplo das linhas de transmissão impressas *microstrip* (BURKHARDT, 1999).

Na Figura 2.17, mostram-se as linhas de campo elétrico em uma linha de transmissão *microstrip*. Como o topo da estrutura está em contato com o ar, algumas linhas de campo fecham-se no plano de massa passando pelo ar e pelo dielétrico. Há outras linhas que se fecham diretamente pelo dielétrico sem passar pelo ar. Este fato faz com que esta estrutura não seja homogênea e não suporte o modo *TEM*. No entanto, a maior parte do campo fecha-se sem passar pelo ar, pelo fato desse desvio ser relativamente baixo, diz-se que a estrutura *microstrip* possui um modo de propagação quase – *TEM* (BURKHARDT, 1999).

Figura 2.17 - Campo elétrico em uma linha de transmissão *microstrip*.

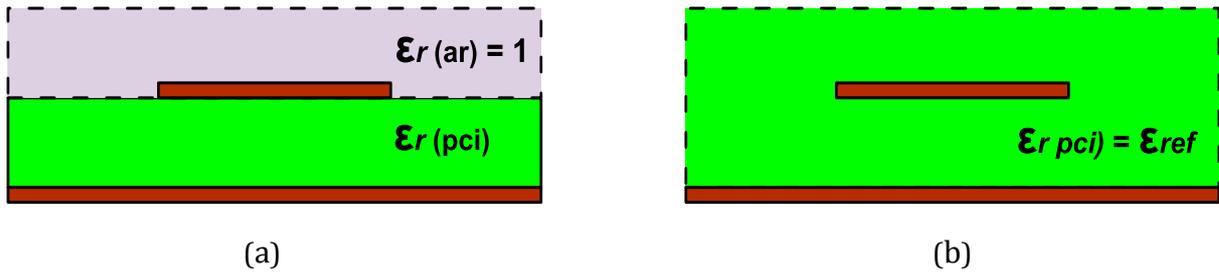


Fonte: Adaptado de (BURKHARDT, 1999).

Pode-se assim tratar a estrutura como sendo homogênea e imersa em um meio de constante dielétrica relativa efetiva ϵ_{ref} . Esta é uma espécie de constante dielétrica relativa média entre a constante dielétrica relativa do substrato e a do ar. Em outras palavras, ϵ_{ref} é o valor da constante dielétrica relativa de tal modo que a estrutura real imersa em um meio não homogêneo tenha o mesmo comportamento que a estrutura imersa em um meio homogêneo de constante dielétrica dada por ϵ_{ref} , tal como mostrado na Figura 2.18 (BURKHARDT, 1999).

Como a maior parte das linhas de força se fecha pelo substrato, a constante dielétrica relativa efetiva estará mais próxima da constante dielétrica do substrato da placa de circuito impresso, do que da constante dielétrica do ar, que é igual 1 (um).

Figura 2.18 – (a) Estrutura não homogênea; (b) Estrutura homogênea.



Fonte: Adaptado de (BURKHARDT, 1999).

2.3.4 Equações para o Cálculo dos Parâmetros da Linha de Transmissão *Microstrip*

Para uma determinada placa de circuito impresso, a Equação 2.4 pode ser utilizada para se determinar o valor da impedância exigida pelo circuito (W), desde que não se considere as ondas eletromagnéticas transmitidas pelo ar, ou seja, a constante dielétrica efetiva da linha (ϵ_{ref}), bem como a largura efetiva da linha (W_{ef}) e a frequência das ondas eletromagnéticas captadas (FRENZEL, 2013)

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1,41}} \ln \left[\frac{5,98H}{(0,8W + T)} \right] \text{ para } \frac{W}{H} \geq 1, \quad (2.4)$$

em que:

Z_0 = Impedância da linha de transmissão;

ϵ_r = Constante dielétrica do substrato;

W = Largura da linha de transmissão;

H = Espessura do material dielétrico;

T = Espessura da linha de transmissão.

Conforme a norma IPC-2141(2004), apresentam-se a seguir as expressões utilizadas para a obtenção do valor da impedância característica (Z_0) e a permissividade relativa efetiva ϵ_{ref} de uma linha de transmissão *microstrip* (válidas para baixas frequências e considerando o substrato isotrópico). São equações empíricas, baseadas em análise por mapeamento conforme (aproximação quase - TEM) e dispersão.

A admitância característica e a indutância característica são dadas por:

$$L = \frac{\mu_0 \epsilon_0}{C_a} e \quad (2.5)$$

$$C = \epsilon_{\text{ref}} C_a, \quad (2.6)$$

em que C_a representa a capacidade por metro de uma linha em que o dielétrico é ar. De (2.5 e 2.6) resulta na impedância característica, dada por:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \varepsilon_0}{\varepsilon_{ref}}} \frac{1}{C_a}. \quad (2.7)$$

O valor de C_a é dado por:

$$C_a = \frac{2\pi \varepsilon_0}{\ln\left(\frac{8H}{W} + \frac{W}{4H}\right)}, \text{ para } \frac{W}{H} < 1 \text{ ou} \quad (2.8)$$

$$C_a = \varepsilon_0 \left[\frac{W}{H} + 1,393 + 0,667 \ln\left(\frac{W}{H} + 1,444\right) \right], \text{ para } \frac{W}{H} \geq 1. \quad (2.9)$$

Se o material entre a linha de transmissão e o plano de terra estiver completamente preenchido por um material dielétrico, todo o campo elétrico é contido no interior do material dielétrico, tem-se como exemplo: *stripline* e cabo coaxial.

No entanto, algumas estruturas contêm apenas uma parte do campo eletromagnético imerso no interior do material dielétrico, tem-se como exemplo: linha de transmissão *microstrip*, cabo de rede *UTP* e cabo de fita.

Como visto anteriormente, no caso da linha de transmissão *microstrip*, a maior parte do campo eletromagnético circula através do material do substrato ($\varepsilon_r > 1$) e a parte restante através do ar ($\varepsilon_r = 1$). Com isso, quando aumenta-se a largura da linha *microstrip*, mais linhas de forças elétricas estarão se propagando pelo material dielétrico, fazendo com que a constante dielétrica efetiva aumente, conforme pode ser observado nas equações 2.10 a 2.13, que podem ser utilizadas para calcular a constante dielétrica efetiva (ε_{ref}) e a impedância característica da linha *microstrip* (Z_0):

De (2.7) a (2.9) resulta:

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{ref}}} \ln\left(\frac{8h}{W} + \frac{W}{4H}\right), \text{ para } \frac{W}{H} < 1; \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_{ref} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + \frac{12H}{W}\right)^{-1/2} + 0,04 \left(1 - \frac{W}{H}\right)^2 \right], \text{ para } \frac{W}{H} < 1; \quad (2.11)$$

$$Z_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{ref}}} \frac{120\pi}{\frac{W}{H} + 1,393 + 0,667 \ln\left(\frac{W}{H} + 1,444\right)}, \text{ para } \frac{W}{H} \geq 1; \quad (2.12)$$

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + \frac{12H}{W}}}, \text{ para } \frac{W}{H} \geq 1. \quad (2.13)$$

a) Equações para o Cálculo da Largura Efetiva (W_{ef})

Normalmente, a espessura da linha transmissora de cobre (H) é muito pequena, podendo ser considerada nula. No entanto, caso se considere a sua espessura, as expressões anteriores podem também ser utilizadas, desde que se faça $W = W_{ef}$. Em que W_{ef} é a largura efetiva da linha de transmissão, dada por:

$$W_{ef} = W + T \left[1 + \ln\left(\frac{2H}{T}\right) \right], \text{ para } \frac{W}{H} \geq \frac{1}{2\pi}; \quad (2.14)$$

$$W_{ef} = W + T \left[1 + \ln\left(\frac{4\pi W}{T}\right) \right], \text{ para } \frac{W}{H} < \frac{1}{2\pi}. \quad (2.15)$$

As expressões anteriores não dependem da frequência, porque estas expressões são válidas apenas para baixas frequências. Para frequências elevadas, a impedância característica (Z_0) e a constante dielétrica relativa efetiva (ϵ_{ref}) podem ser obtidas a partir da Equação 2.16:

$$Z_0(f) = Z_0(0) \sqrt{\frac{\epsilon_{ref}(0)}{\epsilon_{ref}(f)}}. \quad (2.16)$$

Em que:

$$\epsilon_{ref}(f) = \epsilon_r - \frac{\epsilon_r - \epsilon_{ref}(0)}{1 + \frac{\epsilon_{ref}(0)}{\epsilon_r} \left(\frac{f}{\frac{Z_0(0)}{2\mu_0 H}} \right)^2}. \quad (2.17)$$

Na Equação 2.17, $Z_0(0)$ e $\epsilon_{ref}(0)$ são obtidas pelas Equações 2.10 a 2.13. Assim sendo, a linha de transmissão *microstrip* é uma estrutura de propagação dispersiva, porque o seu funcionamento depende dos níveis frequência.

b) Atraso de Propagação de uma Linha de Transmissão *Microstrip*

Conforme Blood (2000) o atraso de propagação de uma linha de transmissão *microstrip* também pode ser calculado, de acordo com a Equação 2.18 ou 2.19. Este é o tempo de trânsito de sentido único para um sinal transmitido por uma linha *microstrip*, nota-se pela equação que para um determinado modelo de geometria, a constante de atraso (*ns/ft*) esta relacionada somente com o valor da constante dielétrica do substrato, não dependendo assim das dimensões geométricas da linha *microstrip*.

$$tp (ns/ft) = 1,007\sqrt{0,475\varepsilon_r + 0,67}. \quad (2.18)$$

Para linhas de transmissão impressa menores e que se comportam no modo quase-TEM, utiliza-se a constante dielétrica efetiva e o tempo de atraso pode ser expresso em termos de *ps/in*:

$$tp (ps/in) = 85\sqrt{0,475\varepsilon_{ref} + 0,67}. \quad (2.19)$$

c) Atenuação Devido à Tangente de Perda Dielétrica (α_d)

As perdas devido à tangente de perda dielétrica ($tg \delta$) podem ser muito importantes em circuitos que trabalham em altas frequências. A atenuação é proporcional à frequência, de modo que quanto mais alto for seu valor, maior será a perda global. O cálculo para obtenção da atenuação é simples, utiliza os elementos de um modelo de linha de transmissão como única condição e é descrito na Equação 2.20:

$$\alpha_d = 8,686 \tan(\delta) \frac{CZ_0}{2}. \quad (2.20)$$

Para qualquer linha de transmissão e de qualquer impedância, que se comporta no modo TEM, a equação para a atenuação devido à tangente de perda dielétrica pode ser simplificada ao seguinte:

$$\alpha_d = \frac{\pi\sqrt{\varepsilon_r} \tan(\delta)}{\lambda_0}. \quad (\text{Neper/comprimento}); \quad (2.21)$$

$$\alpha_d = \frac{27,3\sqrt{\epsilon_r} f \tan(\delta)}{c} \quad (\text{Neper/comprimento}); \quad (2.22)$$

$$\alpha_d = 0,9106\sqrt{\epsilon_r} F_{GHz} \tan(\delta) \quad (\text{dB/cm}). \quad (2.23)$$

Nota-se que as perdas devido à tangente de perda dielétrica independem da geometria da linha de transmissão. Para uma linha de transmissão que se comporta no modo quase-TEM, utiliza-se a constante dielétrica efetiva, assim tem-se:

$$\alpha_d = 0,9106\sqrt{\epsilon_{ref}} F_{GHz} \tan(\delta) \quad (\text{dB/cm}). \quad (2.24)$$

d) Influência do Comprimento da Linha de Transmissão *Microstrip* (L)

A linha de transmissão *microstrip*, quando funciona como um acoplador direcional, apresenta características de um filtro que permite a passagem de sinais de altas frequências. Com isso, o comprimento da linha de transmissão (L) está relacionado com o valor da transferência de potência do sinal induzido, dependendo assim, da faixa de frequência das ondas eletromagnéticas que se deseja captar com o acoplador.

Conforme Keiser (2000) em guias de onda reais, as características do acoplador podem ser expressas pela teoria de modo acoplado, resultando na seguinte equação:

$$P_3 = P_1 \text{sen}^2(kz)e^{-\alpha z}, \quad (2.25)$$

em que k é o coeficiente de acoplamento e α o coeficiente de atenuação.

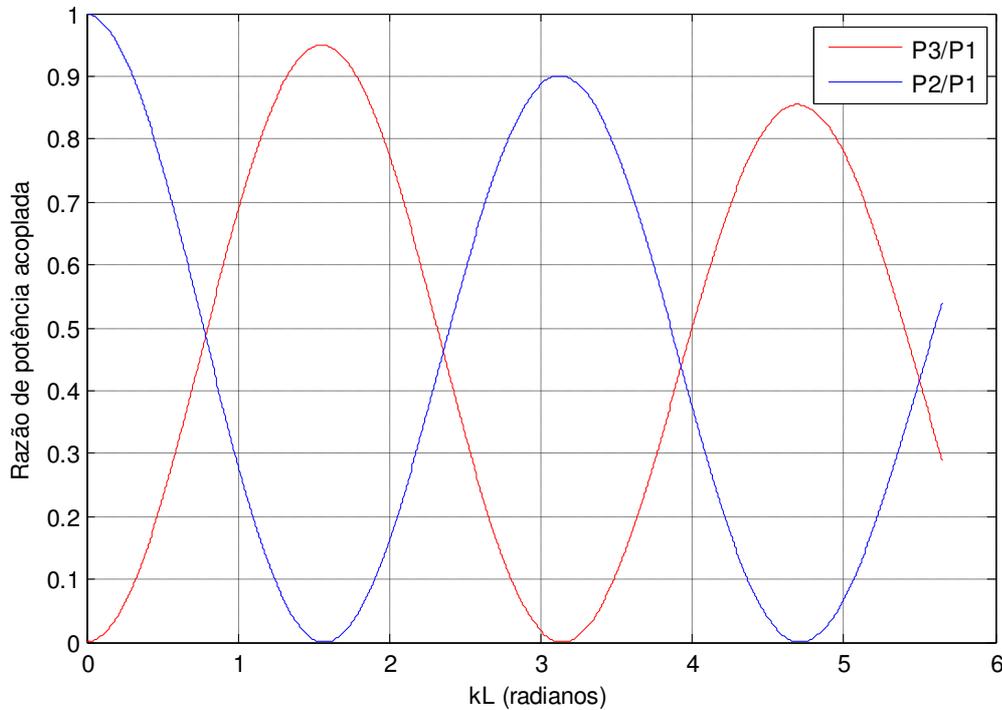
A distribuição de potência teórica em função do comprimento do guia é mostrada na Figura 2.19 (para $k=0,6 \text{ mm}^{-1}$ e $\alpha=0,02 \text{ mm}^{-1}$). Verifica-se que a transferência total de potência para o segundo guia ocorre quando o comprimento (L) é:

$$L = \frac{\pi}{2k}(m + 1), \text{ com } m = 0,2,4, \dots \quad (2.26)$$

Conforme foi visto, a linha de transmissão *microstrip* possui um campo elétrico quase - TEM, com isso, sua constante de acoplamento (k) é inversamente proporcional ao comprimento de onda. Dessa forma, conforme a Equação 2.25 tem-se que a razão de

acoplamento varia como uma função seno elevado ao quadrado, sendo a potência de saída do acoplador (P_3/P_1), em que P_1 é a potência de entrada e P_3 é a potência acoplada.

Figura 2.19 – Razão da potência acoplada em função do comprimento da linha de transmissão.



Fonte: Produzida pelo autor.

De acordo com a Equação 2.27, através da condição de $\frac{1}{4}$ (um quarto) do comprimento de onda, pode-se encontrar o valor do comprimento físico da linha de transmissão *microstrip*, para que se obtenha a máxima transferência de potência das ondas eletromagnéticas geradas pelas descargas parciais.

$$f = \frac{4c}{L\sqrt{\epsilon_{ref}}}, \quad (2.27)$$

em que:

L = comprimento físico da linha de transmissão (cm);

c = velocidade da luz no vácuo (cm/s);

f = frequência para máxima transferência de potência (Hz);

ϵ_{ref} = constante dielétrica efetiva do substrato.

2.4 Filtragem *Wavelet*

2.4.1 Introdução

O avanço computacional e o desenvolvimento de novas tecnologias de aquisição de dados fizeram com que surgissem novas aplicações em muitos campos tais como, astronomia, visão computacional, processamento de imagens e sinais. Entretanto, dados coletados geralmente possuem ruídos, quer seja devido aos processos de aquisição dos dados ou aos fenômenos naturais ocorridos durante o processo. Para que os dados sejam corretamente analisados faz-se necessário a utilização de técnicas para remoção dos ruídos indesejados (BURRUS, 1998).

Um dos processos utilizados para a remoção de ruídos é realizado através do método numérico computacional conhecido como filtragem *wavelet*. O método apresenta como características a concentração de energia localizada em um dado ponto no tempo, permitindo a análise de fenômenos transitórios, não-estacionários e variantes no tempo. Com isso, mantêm-se as características oscilatórias das ondas, o que possibilita a análise no domínio do tempo e da frequência (TASWELL, 1994).

De forma análoga à transformada de Fourier, na qual um sinal pode ser representado por infinitas funções seno e cosseno, na transformada *wavelet* é possível representar um sinal a partir de funções denominadas *wavelets*-mãe. A Equação 2.28 define matematicamente a transformada *wavelet* contínua (TWC).

$$TWC(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}(t) dt, \quad (2.28)$$

em que $f(t)$ é o sinal que se deseja analisar, $\psi_{a,b}(t)$ a *wavelet*-mãe, e os parâmetros escala e deslocamento denotados por “ a ” e “ b ”, respectivamente.

2.4.2 Processo de *Denoising*

A presença de interferências em sinais faz com que exista a necessidade de eliminá-las, para que se obtenha o sinal desejado. O processo de eliminação destas interferências é denominado *denoising*, o qual pode ser realizado com o auxílio de diversas ferramentas, tais como: a transformada de Fourier, a transformada *wavelet*, dentre outras. O objetivo deste processo é remover o ruído dos dados medidos,

preservando as informações do sinal essenciais para a aplicação (MA, ZHOU e KEMP, 2002).

O processo de *denoising* utilizando a transformada *wavelet* consiste em realizar a decomposição *wavelet* do sinal medido e submeter os coeficientes, provenientes da transformada, a valores de limiar de rejeição, com o intuito de eliminar aqueles associados ao ruído, preservando os que representam o sinal de interesse. Após a aplicação dos limiares de rejeição, o sinal é recomposto pela transformada *wavelet* inversa, em que o sinal filtrado é reconstituído (MA, ZHOU e KEMP, 2002).

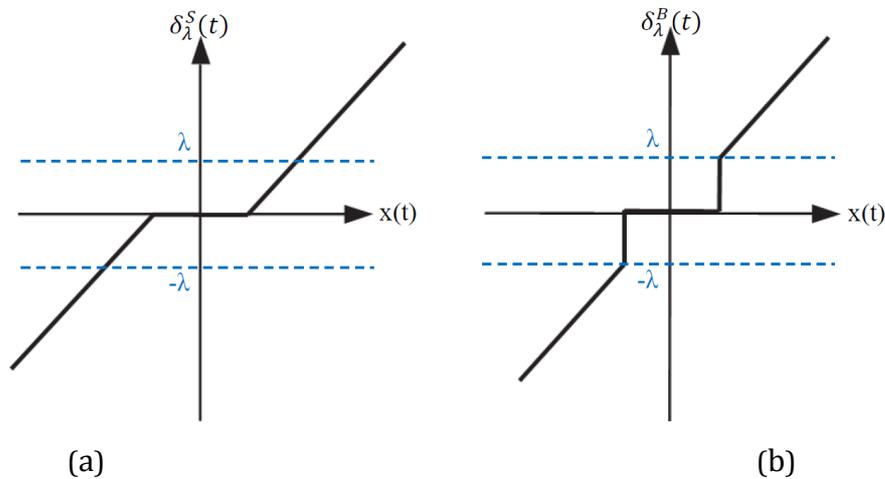
2.4.3 Limiares de Rejeição

Os métodos de *denoising* que utilizam a transformada *wavelet* são baseados em limiares de rejeição suaves ou bruscos. O limiar brusco é naturalmente intuitivo, pois ele mantém as amplitudes altas e zera as que são inferiores ao valor do limiar, enquanto que quando se utiliza o limiar suave, as amplitudes dos coeficientes abaixo do limiar são zeradas e os demais possuem uma amplitude subtraída do limiar (SHIM, SORAGHAN e SIEW, 2001). Os limiares de rejeição suave e brusco são, respectivamente:

$$\delta_{\lambda}^S(t) = \begin{cases} \text{sgn}(x(t))(|x(t)| - \lambda), & \text{se } |x(t)| > \lambda; \\ 0, & \text{se } |x(t)| \leq \lambda \end{cases}; \quad (2.29)$$

$$\delta_{\lambda}^B(t) = \begin{cases} x(t), & \text{se } |x(t)| > \lambda; \\ 0, & \text{se } |x(t)| \leq \lambda \end{cases}; \quad (2.30)$$

em que $x(t)$ corresponde aos coeficientes da transformada *wavelet*, λ é o valor de limiar de rejeição e a função $\text{sgn}(x(t))$ corresponde ao sinal do coeficiente. São ilustrados na Figuras 2.20 (a) e (b) os gráficos dos limiares suave e brusco, respectivamente, em que λ é o valor do limiar de rejeição. Os gráficos dos limiares suave e brusco são ilustrados, respectivamente, nas Figuras 2.20 (a) e (b).

Figura 2.20 - Limiares de rejeição: (a) suave; (b) brusco.

Fonte: (SHIM, SORAGHAN e SIEW, 2001).

Comparações entre os métodos de limiar suave e brusco foram feitas por (SHIM, SORAGHAN e SIEW, 2001), em que foi mostrado que a utilização do limiar suave provoca uma redução nos pulsos de descargas parciais de forma que os locais das descargas não são claramente evidentes, enquanto que com a utilização do limiar brusco, as relações sinal ruído (*Signal to Noise Ratio* – *SNR*) foram melhoradas, fazendo com que os resultados se aproximassem mais do desejado.

Apresentou-se neste capítulo a fundamentação teórica dos principais assuntos referentes a este trabalho. No próximo capítulo será feita a revisão bibliográfica das principais pesquisas e normas técnicas relacionadas às descargas parciais em máquinas rotativas.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta um resumo das principais pesquisas e normas técnicas relacionadas ao fenômeno das descargas parciais, com ênfase em máquinas elétricas rotativas. A revisão bibliográfica realizada abrange estudos relacionados à propagação de sinais de descargas parciais nos enrolamentos do estator, bem como, às técnicas de medição utilizadas na detecção destes sinais. O resumo das principais pesquisas e normas técnicas relacionadas a descargas parciais é mostrado nas Tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1 – Principais pesquisas e normas técnicas relacionadas a descargas parciais.

Pesquisadores/Normas Técnicas	Estudos realizados / Contribuições
Bartnikas e McMahon (1979)	Autores de " <i>Engineering Dielectrics</i> ", clássico livro de medição e interpretação de descargas parciais.
Natrass (1988)	Apresentou uma visão geral dos padrões de descargas parciais, a sua avaliação e determinação da sua origem.
Tavner e Jackson (1988)	Possibilitaram um melhor entendimento sobre as distorções que ocorrem nos sinais de descargas parciais.
Geary <i>et al.</i> (1990)	Obtiveram melhorias na sistemática de medição dos sinais de descargas parciais nos enrolamentos estatóricos de hidrogeradores.
Sedding <i>et al.</i> (1991)	Foram os pioneiros no desenvolvimento do sensor <i>Slot Stator Coupler</i> (SSC), para medição de descargas parciais em hidrogeradores.
Morshuis (1993)	Realizou um amplo estudo dos mecanismos e processos físicos envolvidos na ocorrência de descargas parciais.
Wood <i>et al.</i> (1993)	Apresentou critérios para a realização de medição de descargas parciais em máquinas rotativas.
Hudon <i>et al.</i> (1996)	Apresentou, através de mapas estatísticos, os primeiros padrões de descargas parciais em máquinas rotativas.

Tabela 3.2 – Continuação: Principais pesquisas e normas técnicas relacionadas a descargas parciais.

Pesquisadores/Normas	Estudos realizados / Contribuições
Guia IEEE 1434 (2000)	Detalha as técnicas de medição de descargas parciais realizadas por meio de ensaios <i>off-line</i> , <i>on-line</i> e em barras/bobinas individualmente.
Norma IEC 60270 (2000)	Apresentou as principais grandezas relacionadas às descargas parciais, os tipos de sistemas de detecção, os circuitos utilizados na medição e calibração.
Pemen <i>et al.</i> (2001)	Contribuíram com mais informações sobre o tipo e a origem das descargas parciais em máquinas rotativas.
Gross <i>et al.</i> (2002, 2003)	Destacaram a importância da utilização de mapas estatísticos em alta resolução na medição de descargas parciais.
Hudon e Bélec (2005)	Deram continuidade aos seus estudos sobre mapas estatísticos, iniciados em 1996, obtendo novos padrões.
Guia CIGRÈ 366 (2008)	Teve como base a norma IEC 60270 (2000), mas com uma maior ênfase nos sistemas digitais de medição de descargas parciais.
Amorim <i>et al.</i> (2009)	Avaliaram a influência de acopladores capacitivos de diversas capacitâncias, na sensibilidade da medição de descargas parciais em máquina rotativas.
Guomin e Daming (2010)	Avaliaram dois métodos de medição de descargas parciais: Transformador de Corrente de Alta Frequência (<i>HFCT</i>) e Frequência Ultra Alta (<i>UHF</i>).
Norma IEC 60034-27-2 (2012)	Detalha a técnica de medição de descargas parciais em máquinas elétricas (<i>on-line</i>), às técnicas de supressão de ruídos e os padrões de mapas estatísticos.
Brasil (2014)	Verificou que a medição de descargas parciais através do acoplador na ranhura do estator possuía uma maior sensibilidade com relação às medições utilizando acopladores capacitivos.

BARTNIKAS e McMAHON (1979) são os autores de “*Engineering Dielectrics*”, clássico livro de medição e interpretação de descargas parciais em materiais dielétricos. Eles desenvolveram o primeiro modelo de circuito equivalente, denominado circuito A-B-C, em que (A) correspondia à capacitância do dielétrico em bom estado e (B) à capacitância do dielétrico em série com a capacitância do vazio (C). O circuito era uma aproximação simplificada utilizada para facilitar a compreensão da ocorrência das descargas parciais sob tensão alternada.

NATRASS (1988) apresentou uma visão geral dos padrões de descargas parciais, a sua avaliação e determinação da sua origem. Algumas breves comparações de equipamentos de testes também foram feitas. A intenção do trabalho era auxiliar os profissionais na interpretação dos resultados, bem como na discriminação precisa entre verdadeiras descargas parciais dentro de uma estrutura de isolamento e outros sinais de interferência induzida por radiação indesejada ou de condução. Os autores constataram que era possível relacionar a forma de onda dos sinais de descargas parciais, com o tipo de falha no isolamento que o enrolamento possuía. O artigo de Natrass pode ser considerado o percussor das técnicas atuais de monitoramento e diagnóstico de envelhecimento de materiais e equipamentos elétricos de potência, por descargas parciais.

TAVNER e JACKSON (1988) pesquisaram os efeitos da componente indutiva do acoplamento entre os condutores de um enrolamento através do núcleo de ferro laminado. Os resultados possibilitaram um melhor entendimento sobre as distorções que ocorriam nos sinais de descargas parciais no caminho entre a fonte geradora desses pulsos e o sistema de medição.

GEARY *et al.* (1990) obtiveram melhorias na sistemática de medição dos sinais de descargas parciais no enrolamento do estator. Para isso, os autores utilizaram métodos de processamento digital de sinais para determinar a fonte mais provável das descargas parciais. A técnica baseou-se na análise de altas e baixas frequências dos sinais de descargas parciais e sua distribuição no tempo. Com os resultados obtidos, os autores constataram que era possível relacionar a forma de onda dos sinais de descargas parciais, com o tipo de falha no isolamento que o enrolamento possuía.

SEDDING *et al.* (1991), com o patrocínio da *Canadian Electricity Association* (CEA), desenvolveram um novo sensor de medição de descargas parciais que era capaz de diferenciar, de forma inequívoca, os pulsos de descargas parciais geradas pelos

enrolamentos estatóricos e os outros tipos de interferência elétrica presentes nesse meio. Os sensores de medição de descargas parciais não requeriam ligação à alta tensão dos enrolamentos estatóricos, ao contrário dos acopladores capacitivos, e era facilmente instalado na ranhura de estator. O novo sensor, chamado de *Slot Stator Coupler* (SSC), foi instalado em seis grandes geradores de turbinas. Durante os testes, não foi constatado nenhum risco mecânico ou eletromagnético para o hidrogenador em funcionamento.

MORSHUIS (1993) realizou em sua tese um amplo estudo dos mecanismos e processos físicos envolvidos na ocorrência de descargas parciais, em cavidades presentes em materiais dielétricos, quando submetidos à tensão alternada. De acordo com seu estudo, uma vez satisfeitas às condições necessárias para o início da ocorrência das descargas e tendo sido iniciado o processo de avalanche, uma quantidade significativa de carga espacial se acumulava nas cavidades.

WOOD *et al.* (1993) apresentaram critérios para medição de descargas parciais em máquinas rotativas, como a melhor faixa de frequências a ser utilizada para evitar atenuações e ressonância, além de descrever os mecanismos de transferência dos sinais de descargas parciais.

HUDON *et al.* (1996) apresentaram, por meio de mapas estatísticos, os primeiros padrões de descargas parciais em máquinas rotativas. Até então, os padrões utilizados eram baseadas na Quantidade de Número Normalizada (NQN).

O Guia IEEE 1434 foi lançado no ano de 2000. Neste Guia, foi feita uma revisão da natureza das descargas parciais nos enrolamentos do estator, sendo detalhadas as técnicas de medição de descargas parciais para: máquinas paradas (*off-line*), máquinas em operação (*on-line*) e ensaios laboratoriais realizados em bobinas de múltiplas espiras e barras *Roebel*.

A norma internacional IEC 60270 foi lançada no ano de 2000, sendo, até hoje, uma das principais referências no que diz respeito à medição de descargas parciais em ensaios com alta tensão. Esta norma apresentou as principais grandezas relacionadas às: descargas parciais; os circuitos utilizados na medição; os tipos de sistemas de detecção; além dos procedimentos utilizados para a calibração do circuito.

PEMEN *et al.* (2001), utilizando-se das características da forma de onda e dos padrões de descargas parciais, contribuíram com mais informações sobre o tipo e a origem das descargas parciais em máquinas rotativas. Para isso, os autores do estudo

realizaram ensaios por meio da injeção de sinais de descargas parciais nos enrolamentos estatóricos de um gerador de 35MW e medição das respostas nos seus terminais.

GROSS *et al.* (2002, 2003) destacaram a importância da utilização de mapas estatísticos em alta resolução na medição e monitoramento de descargas parciais em máquinas rotativas.

HUNDON e BÉLEC (2005) deram continuidade aos seus estudos sobre mapas estatísticos, iniciados em 1996. Por meio de ensaios realizados em laboratório, os autores determinaram vários padrões de mapas estáticos, típicos da ocorrência de descargas: internas, de superfície, de ranhura e de delaminação.

O Guia CIGRÈ 366 foi lançado no ano de 2008, sendo um guia de medição de descargas parciais elaborado seguindo às diretivas da IEC 60270(2000), mas com uma maior ênfase nos sistemas digitais de medição de descargas parciais, quem haviam evoluído bastante ao longo de oito anos.

AMORIM *et al.* (2009) realizaram um estudo em laboratório sobre a influência de acopladores capacitivos na sensibilidade da medição de descargas parciais em máquina rotativas, no qual foi avaliado a sensibilidade da detecção de pulsos de descargas parciais entre capacitores de acoplamento de diversas capacitâncias. No mesmo ano, os autores publicaram um artigo em que abordaram os aspectos práticos das medições *on-line* de descargas parciais em motores e geradores.

GUOMIN e DAMING (2010) avaliaram dois métodos de medição de descargas parciais: o transformador de corrente de alta frequência (*HFCT*) e frequências ultra-elevadas (UHF). Os dois sensores foram testados sob diferentes frequências de amostragem. Logo depois, foram feitas comparações do desempenho de cada um, no domínio do tempo e da frequência. Os resultados mostraram que o sensor de UHF, com amplo espectro de frequências, é mais sensível do que o *HFCT*. No entanto, o *HFCT*, que está diretamente ligado a aparelhos de alta tensão, pôde detectar pulsos de descargas parciais com maior magnitude.

A norma IEC 60034-27-2 (2012) abordou sobre a medição *on-line* de descargas parciais nos enrolamentos estatóricos de máquinas rotativas. Além de apresentar os assuntos já tratados nas normas anteriores, esta norma constava de assuntos relacionados às técnicas de supressão de ruídos e aos padrões de mapas estatísticos obtidos nos estudo de HUNDON *et al.* (2005). No mesmo ano, foi lançada a norma IEEE

1799 (2012), que tratava de recomendações práticas para o controle de qualidade em ensaios de descargas parciais em enrolamento de máquinas elétricas rotativas.

Em BRASIL (2014), foram avaliadas experimentalmente duas técnicas de medição de descargas parciais em enrolamentos de hidrogeradores, nas quais, foram feitas medições com o uso de capacitores de acoplamento e acopladores na ranhura do estator. Os resultados obtidos em laboratório mostraram que a medição de descargas parciais por meio do acoplador na ranhura do estator possuía uma maior sensibilidade com relação às medições utilizando um acoplador capacitivo de 220 pF.

Este capítulo apresentou um resumo das principais pesquisas e normas técnicas relacionadas ao fenômeno das descargas parciais, com ênfase em máquinas elétricas rotativas. O próximo capítulo será dedicado à descrição dos materiais aplicados e métodos utilizados para medição de descargas parciais em uma bobina de hidrogerador, com os três diferentes tipos de sensores: acoplador direcional *microstrip*, *HFCT* e capacitor de acoplamento.

CAPÍTULO 4

MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos material e métodos empregados nas medições de descargas parciais realizadas na pesquisa. No primeiro tópico são apresentados o material utilizado como objeto de teste, bem como os arranjos montados em laboratório para os ensaios experimentais. Na seção de metodologia é descrita como foi feita a parametrização e confecção dos quatro acopladores direcionais *microstrip*.

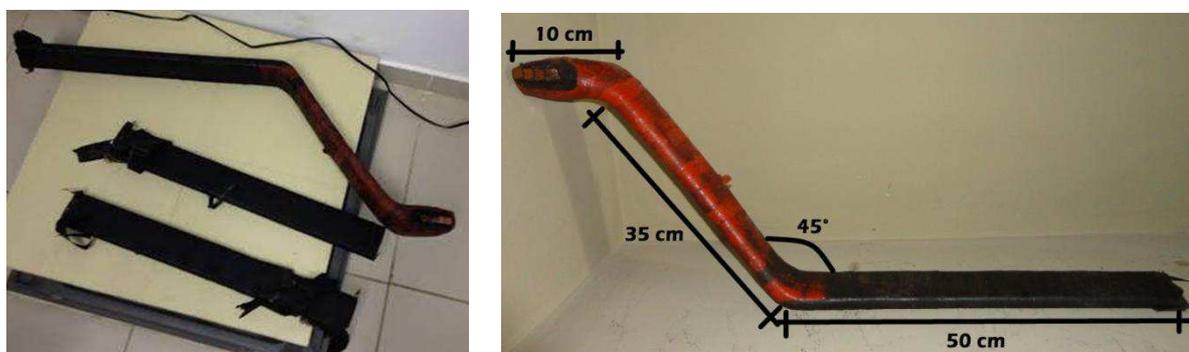
São apresentados também os esquemas para medição de descargas parciais utilizando o capacitor de acoplamento, o *HFCT* e os acopladores direcionais *microstrip*. E por fim, como foram realizadas as aquisições e as análises dos sinais de descargas parciais obtidos nos ensaios em alta tensão.

4.1 Material

4.1.1 Enrolamento Estatórico de Hidrogerador

O objeto de teste utilizado nos experimentos é um pedaço de bobina de múltiplas espiras do primeiro hidrogerador de Paulo Afonso I, que entrou em operação em dezembro de 1954. Na Figura 4.1 são exibidas fotografias de pedaços de bobinas que foram cedidos pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), para serem utilizadas nos ensaios.

Figura 4.1 - (a) Pedaços de uma bobina; (b) Dimensões do pedaço de bobina utilizado.



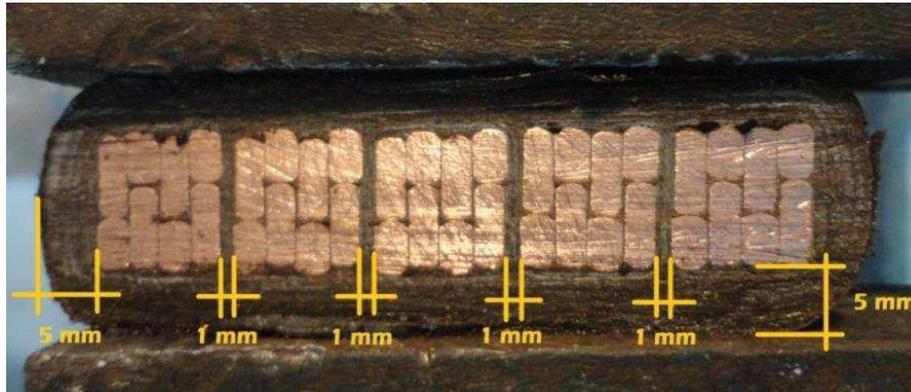
(a)

(b)

Fonte: Produzida pelo autor.

Na Figura 4.2 pode-se observar o enrolamento disponibilizado, composto, por um conjunto de 5 espiras, isoladas entre si, cada espira possuem 8 pequenos condutores de cobres, que também são isoladas entre si.

Figura 4.2 – Detalhe da vista da secção transversal do sistema de isolamento de uma bobina de múltiplas espiras.

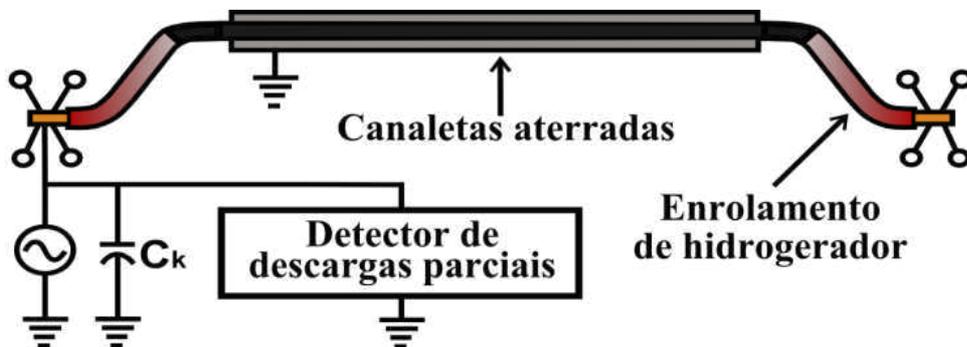


Fonte: Produzida pelo autor.

4.1.2 Arranjo Experimental para Ensaios em Alta Tensão

O ensaio para medição de descargas parciais foi realizado em uma única bobina, seguindo a norma IEC 60270 (2000). Conforme a norma, para o ensaio de um enrolamento estático de hidrogeradores, o corpo de prova deve estar devidamente alocado em canaletas metálicas aterradas, com a finalidade de simular uma das ranhuras (cunhas) da estrutura do estator, conforme é exemplificado na Figura 4.3. Isto possibilita a reprodução das condições mais próximas da sua aplicação em campo.

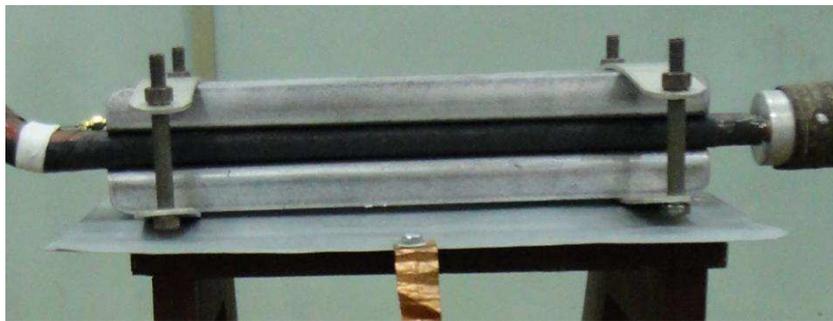
Figura 4.3 – Diagrama esquemático do ensaio de descargas parciais realizado.



Fonte: Adaptado da norma IEC 60270 (2000).

Em conformidade com a norma IEC 60270 (2000), foi construída uma estrutura metálica para o alojamento do enrolamento, em que duas canaletas de ferro fazem a função de referencial de terra das cunhas do estator de um hidrogerador, para a medição de descargas parciais no isolamento da bobina. Foram empregadas quatro peças de alumínio, fixadas por meio de parafusos. Utilizou-se esta estrutura de pressão, como forma de garantir um bom contato superficial do isolamento externo da bobina com as canaletas metálicas, assim como ocorre em um hidrogerador.

Figura 4.4 – Estrutura para o ensaio de descargas parciais em uma bobina.



Fonte: Produzida pelo autor.

Para que se pudesse verificar a integridade do isolamento que compõe a bobina, foi necessário fazer um curto-circuito em todas as 5 espiras, para que a energização do isolamento fosse feita de maneira homogênea. Ilustra-se na Figura 4.5 a ligação de curto-circuito do terminal da bobina (a), em que uma pequena peça de cobre estanhada (b) é utilizada para conectar eletricamente as 5 espiras. Um bloco cilíndrico de alumínio conecta-se a um tubo flexível (c), utilizado para evitar descargas corona, que liga o terminal do enrolamento ao potencial do circuito. Devido à proximidade do potencial elétrico à camada de tinta semicondutora da extremidade da bobina, fez-se necessária a remoção de 15 mm desta camada, como forma de evitar um curto-circuito fase-terra (d).

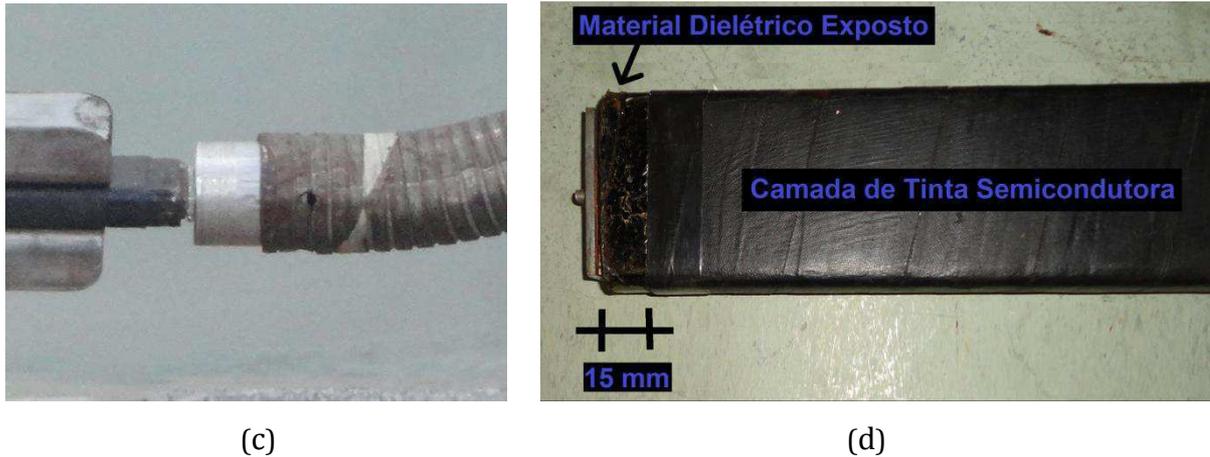
Figura 4.5 – Curto-circuito no terminal de uma bobina de múltiplas espiras.



(a)



(b)



Fonte: Produzida pelo autor.

4.2 Métodos

4.2.1 Local das Montagens e Ensaio Experimentais

Os ensaios para medição das descargas parciais na bobina de hidrogenador foram realizados nas dependências do Laboratório de Alta Tensão (LAT), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

4.2.2 Confeção dos Acopladores Direcionais *Microstrip*

Para a confecção dos acopladores direcionais *microstrip*, foi utilizada uma placa de circuito impresso (PCI) de dupla face, com material dielétrico de fibra de vidro (FR-4). Comparado com as tradicionais placas de fenolite (FR-1), o FR - 4 possui melhor resistência térmica, mecânica e tolerância à umidade. Na Figura 4.6, mostra-se a placa de circuito impresso de fibra de vidro utilizada e na Tabela 4.1, podem-se ver as suas respectivas características técnicas.

Figura 4.6 – Placa de circuito impresso dupla face (FR-4).



Fonte: Produzida pelo autor.

Tabela 4.1 – Características técnicas da placa de circuito impresso.

Características	Placa de Circuito Impresso
Fabricante	Hitachi Chemical Co. Ltd
Material do substrato	Fibra de vidro (FR-4)
Espessura do cobre (T)	1 oz = 0.035 mm
Espessura do substrato (H)	0,75 mm
Constante dielétrica relativa do substrato (ϵ_r)	4,5

Fonte: Hitachi Chemical Co. Ltd.

Tendo como base os parâmetros da placa de circuito impresso e as equações descritas na subseção 2.3.5, calculou-se a largura da linha de transmissão *microstrip*, para que sua impedância característica resultasse o mais próximo possível de 50Ω . Assim, estabelece-se o casamento de impedância com o cabo coaxial utilizado para a transmissão dos sinais para o equipamento de medição (osciloscópio). Observa-se na Figura 4.7 o valor da impedância do cabo coaxial que foi utilizado nas medições.

Figura 4.7 – Cabo coaxial RG223 com impedância de 50Ω .

Fonte: Produzida pelo autor.

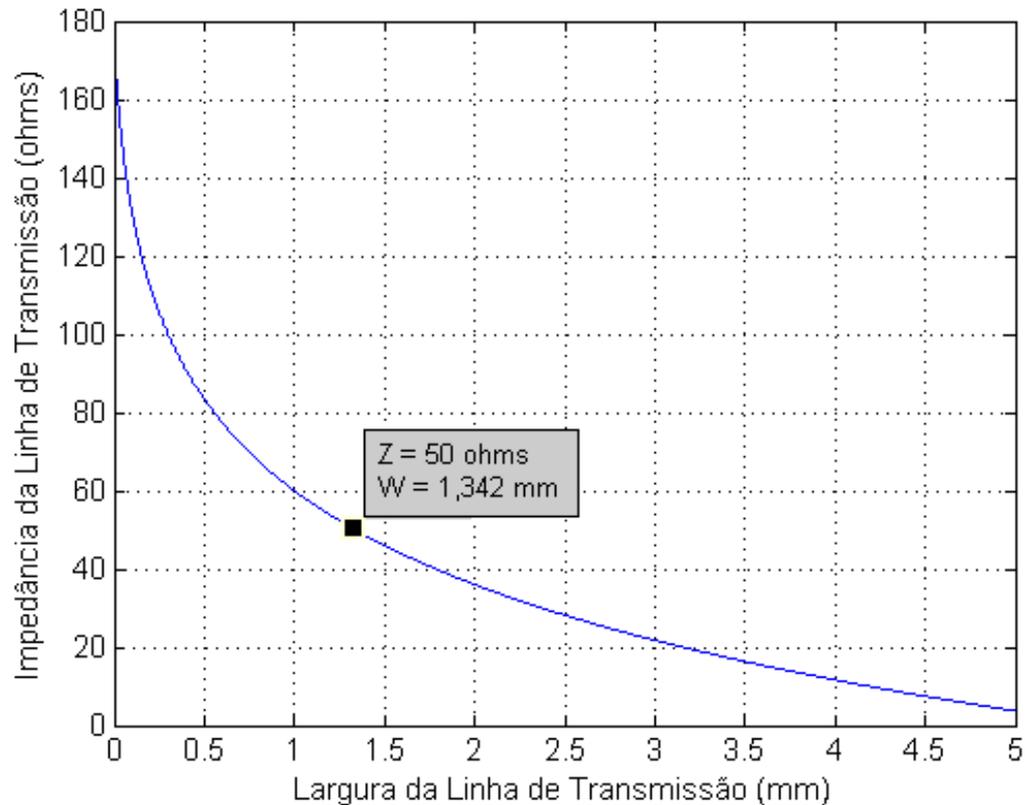
a) Dimensionamento da Largura da Linha de Transmissão (W)

Para facilitar a confecção da linha de transmissão do sinal, adotou-se que a relação (W/H) entre a largura da linha de transmissão (W) e a espessura do material dielétrico (H) fosse maior ou igual a 1 (um). Assim, utilizou-se a Equação 2.4, que não considera a influência do ar, dentre outros parâmetros. Com isso, para que a impedância

característica da linha de transmissão (Z_0) fosse de 50 ohms, o valor de W deverá ser 1,342 mm. A relação é representada pelo gráfico da Figura 4.8.

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1,41}} \ln \left[\frac{5,98H}{(0,8W + t)} \right] \quad \text{para } \frac{W}{H} \geq 1 \quad (2.4)$$

Figura 4.8 – Gráfico da impedância característica (Z_0) com relação à largura da linha de transmissão (W).



Fonte: Produzida pelo autor.

Com base nos valores obtidos, e para facilitar a confecção da linha de transmissão, adotou-se W como sendo 1,5 mm e através das Equações 2.12 a 2.17 obteve-se o valor real da impedância característica da linha de transmissão *microstrip*.

b) Cálculo da Largura Efetiva (W_{ef})

$$W_{ef} = W + t \left[1 + \ln \left(\frac{2h}{t} \right) \right] \quad \text{para } \frac{W}{h} \geq \frac{1}{2\pi}, \quad (2.14)$$

$$W_{ef} = 1,5 + 0,035 \left[1 + \ln \left(\frac{2 * 0,75}{0,035} \right) \right],$$

$$\boxed{W_{ef} = 1,67 \text{ mm.}}$$

c) Cálculo da Constante Dielétrica Efetiva (ϵ_{ref})

$$\epsilon_{ref} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2 \sqrt{1 + \frac{12h}{W_{ef}}}}, \quad (2.13)$$

$$\epsilon_{ref} = \frac{4,5 + 1}{2} + \frac{4,5 - 1}{2 \sqrt{1 + \frac{12 * 0,75}{1,67}}},$$

$$\epsilon_{ref} = 3,44$$

d) Cálculo da Impedância Característica para Baixas Frequências (Z_0)

$$Z_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{ref}}} \frac{120\pi}{\frac{W_{ef}}{h} + 1,393 + 0,667 \ln\left(\frac{W_{ef}}{h} + 1,444\right)}, \quad (2.12)$$

$$Z_0 = \frac{1}{\sqrt{3,44}} \frac{120\pi}{\frac{1,67}{0,75} + 1,393 + 0,667 \ln\left(\frac{1,67}{0,75} + 1,444\right)}$$

$$Z_0(0) = 48,38 \Omega.$$

e) Cálculo da Impedância Característica para Altas Frequências [$Z_0(f)$]

Considerando o valor da frequência dos pulsos característicos de descargas parciais em torno de 1 a 100 MHz, a constante dielétrica efetiva (ϵ_{ref}) da linha de transmissão será, conforme a Equação 2.17:

$$\epsilon_{ref}(f) = \epsilon_r - \left[\frac{\epsilon_r - \epsilon_{ref}(0)}{1 + \frac{\epsilon_{ref}(0)}{\epsilon_r} \left(\frac{f}{\frac{Z_0(0)}{2\mu_0 h}} \right)^2} \right], \quad (2.17)$$

$$\epsilon_{ref}(100MHz) = 4,5 - \left[\frac{4,5 - 3,44}{1 + \frac{3,43}{4,5} \left(\frac{100 * 10^6}{53,19} \right)^2} \right],$$

$$\epsilon_{ref}(100MHz) = 3,44$$

Logo, conforme a Equação 2.16 verifica-se que a captação de ondas eletromagnéticas, da ordem de frequência das descargas parciais, não influirá no valor da impedância característica da linha de transmissão.

$$Z_0(f) = Z_0(0) \sqrt{\frac{\epsilon_{ref}(0)}{\epsilon_{ref}(100MHz)}} \quad (2.16)$$

$$Z_0(100MHz) = Z_0(0)$$

$$Z_0(100MHz) = 48,38 \Omega$$

f) Dimensionamento do Comprimento da Linha de Transmissão (L)

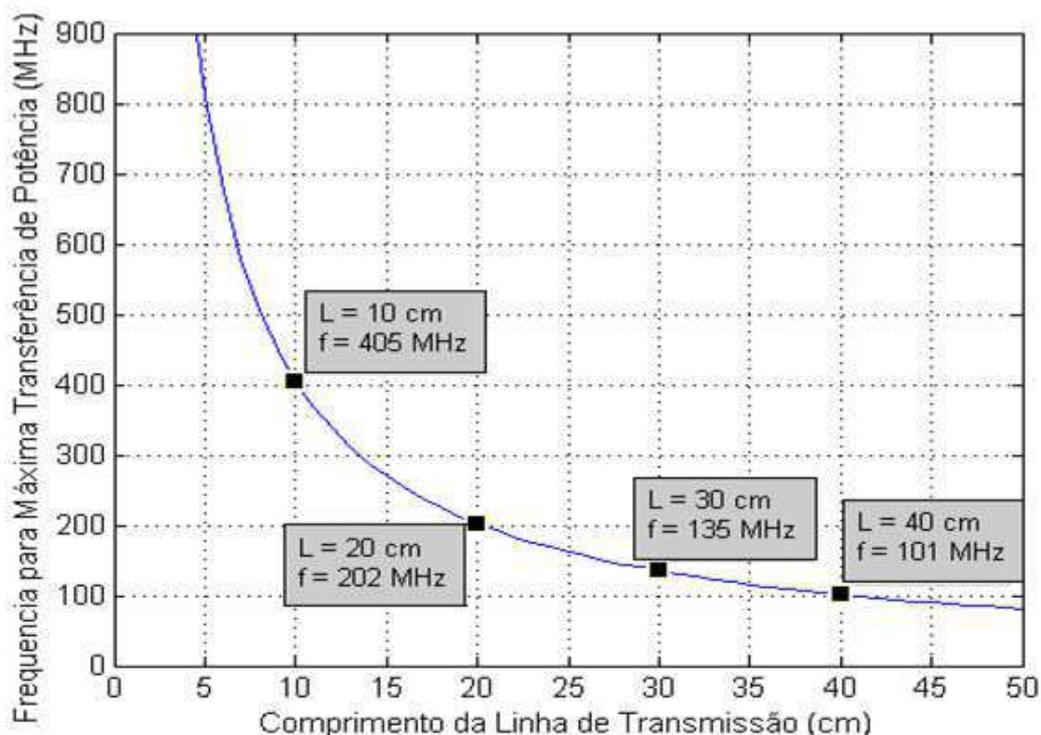
A linha de transmissão *microstrip*, quando funciona como um acoplador direcional, apresenta características de um filtro passa-altas. Com isso, o comprimento da linha de transmissão (L) está relacionado com o valor da transferência de potência do sinal induzido. Depende assim, da faixa de frequência das ondas eletromagnéticas que se deseja captar. Utilizando-se a Equação 2.27:

$$f = \frac{4c}{L\sqrt{\epsilon_{ref}}}, \quad (2.27)$$

em que “c” é a velocidade da luz no vácuo e por meio da condição de $\frac{1}{4}$ (um quarto) do comprimento de onda, pode-se encontrar o valor do comprimento físico da linha de transmissão, para que se obtenha a frequência de máxima transferência de potência (f) das ondas eletromagnéticas geradas pelas descargas parciais no isolamento da bobina.

Dessa forma, o valor de (f) para máxima transferência de potência de cada acoplador direcional *microstrip*, é dado pela Figura 4.9 e Tabela 4.2.

Figura 4.9 – Gráfico da frequência para máxima transferência de potência (f) com relação ao comprimento da linha de transmissão (L).



Fonte: Produzida pelo autor.

Tabela 4.2 – Comprimento da linha *microstrip* e sua respectiva frequência para máxima transferência de potência.

Comprimento da Linha de Transmissão <i>Microstrip</i>	Frequência Calculada Para Máxima Transferência de Potência
10 cm	405,8 MHz
20 cm	202,5 MHz
30 cm	134,9 MHz
40 cm	101,1 MHz

Fonte: Produzida pelo autor.

Com base na Figuras 4.9 e a Tabela 4.2, foram confeccionadas quatro linhas de transmissão *microstrip*, que podem ser vistas nas Figuras 4.10 e 4.11. As linhas de transmissão possuem 10 cm, 20 cm, 30 cm e 40 cm de comprimento, com 1,5 mm de largura. Enquanto o plano de terra possui 15 mm de largura.

Foram utilizados conectores do tipo SMA, com impedância de 50 ohms, nas extremidades das linhas de transmissão. Optou-se por esse tipo de conector devido as suas pequenas dimensões e por serem específicos para o trabalho em frequências da ordem de MHz e GHz, possibilitando uma baixa atenuação dos sinais.

Para a conexão do conector SMA ao conector BNC do cabo coaxial, fez-se necessária a utilização de um adaptador (SMA para BNC) com impedância de 50 ohms.

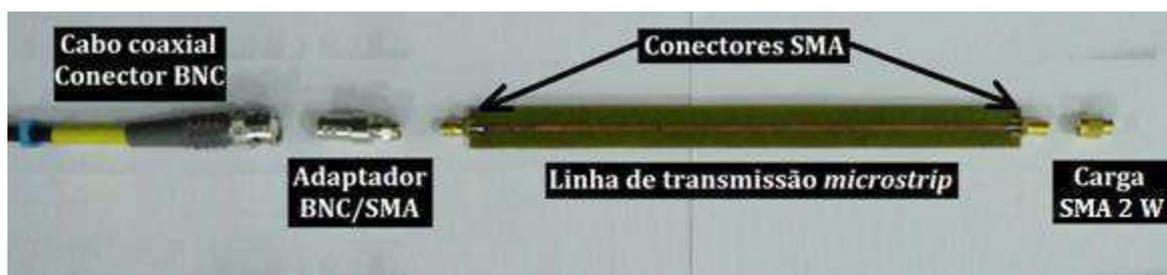
Uma carga SMA puramente resistiva de 2 W, com uma impedância de 50 ohms, é conectada ao conector SMA de uma das extremidades da linha de transmissão. A inclusão da carga resistiva tem como finalidade absorver toda a potência incidida na direção oposta à extremidade conectada ao cabo coaxial (funcionando como terminador), evitando assim, reflexões e interferências com o sinal de interesse.

Todos os componentes possuem impedância de 50 ohms, estabelecendo-se assim, o devido casamento de impedância com as linhas de transmissão *microstrip*. Cujas impedância foi calculada em 48,3 ohms.

Figura 4.10 – (a) Fotografia das partes constituintes dos quatro acopladores *microstrip*,
(b) Identificação dos componentes.



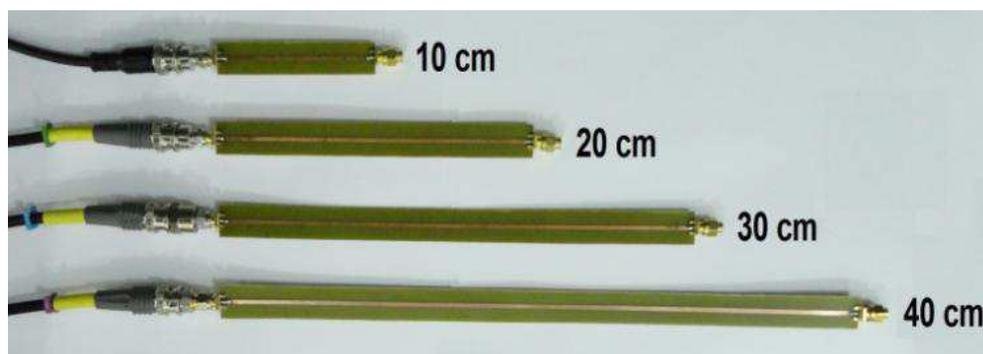
(a)



(b)

Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 4.11 – Fotografia dos acopladores direcionais *microstrip* montados.



Fonte: Produzida pelo autor.

4.2.3 Dimensionamento do Filtro Passa-altas RC

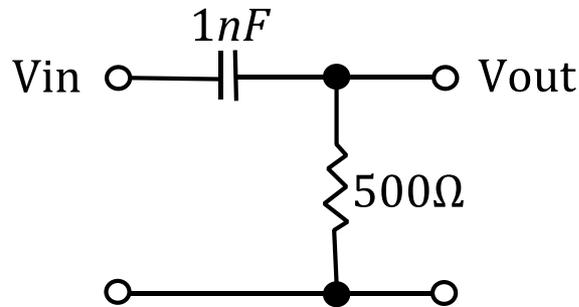
O acoplador direcional *microstrip*, quando acoplado à superfície isolante do enrolamento, não somente capta as ondas eletromagnéticas provenientes dos pulsos de descargas parciais, mas também, de forma induzida, a tensão que está sendo aplicada no enrolamento. Com base em ensaios preliminares, constatou-se que a bobina energizada com uma tensão nominal de pico (fase-terra) de 11,1 kV induz uma tensão de 17,4 V no acoplador *microstrip* de 40 cm e uma tensão um pouco menor que 17,4 V nos outros três acopladores. Dessa forma, esse nível de tensão, com frequência da ordem de 60 Hz, sobrepõe completamente todos os pulsos de descargas parciais captados.

Pelo exposto, torna-se necessário a filtragem do sinal. Um filtro analógico do tipo passa-altas RC (resistor + capacitor), localizado antes da entrada do instrumento de medição, foi empregado. Dessa maneira, foi possível atenuar a tensão de alimentação induzida no acoplador, que possui frequência fundamental conhecida de 60 Hz, bem como, as suas harmônicas de ordem imediatamente superiores. Com isso, é permitida a passagem das ondas eletromagnéticas com a frequência de interesse, acima de alguns MHz, ordem de frequência característica das descargas parciais geradas pelo isolamento. Utilizou-se um filtro de 1º ordem tem em vista a sua simplicidade de confecção e a eficiência na filtragem do sinal de interesse.

Visando a atenuação do nível tensão induzida de 17,4 V, para 17,4 mV (valor da ordem de nível do ruído natural da medição), projetou-se um filtro analógico passa-altas RC de 1º ordem, conforme o circuito eletrônico da Figura 4.12, composto por dois

resistores de 1000 ohms em paralelo, resultando em uma resistência equivalente de 500 ohms e um capacitor de cerâmica de 1 nF.

Figura 4.12 – Circuito eletrônico do filtro passa-altas RC projetado.



Fonte: Produzida pelo autor.

Com esses parâmetros e conforme as Equações 4.2, 4.3 e 4.4, obteve-se um filtro analógico com frequência de corte de -3 dB para 318,4 kHz e -60 dB para 318,4 Hz.

$$f_{c(-3dB)} = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (4.2)$$

$$f_{c(-3dB)} = \frac{1}{2\pi * 500 * 10^{-9}},$$

$$f_{c(-3dB)} = \mathbf{318,4 \text{ kHz}}$$

$$G_{dB} = 20 \log \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right), \quad (4.3)$$

$$G_{dB} = 20 \log \left(\frac{1,74 \times 10^{-2}}{17,4} \right),$$

$$G_{dB} = \mathbf{-60dB}$$

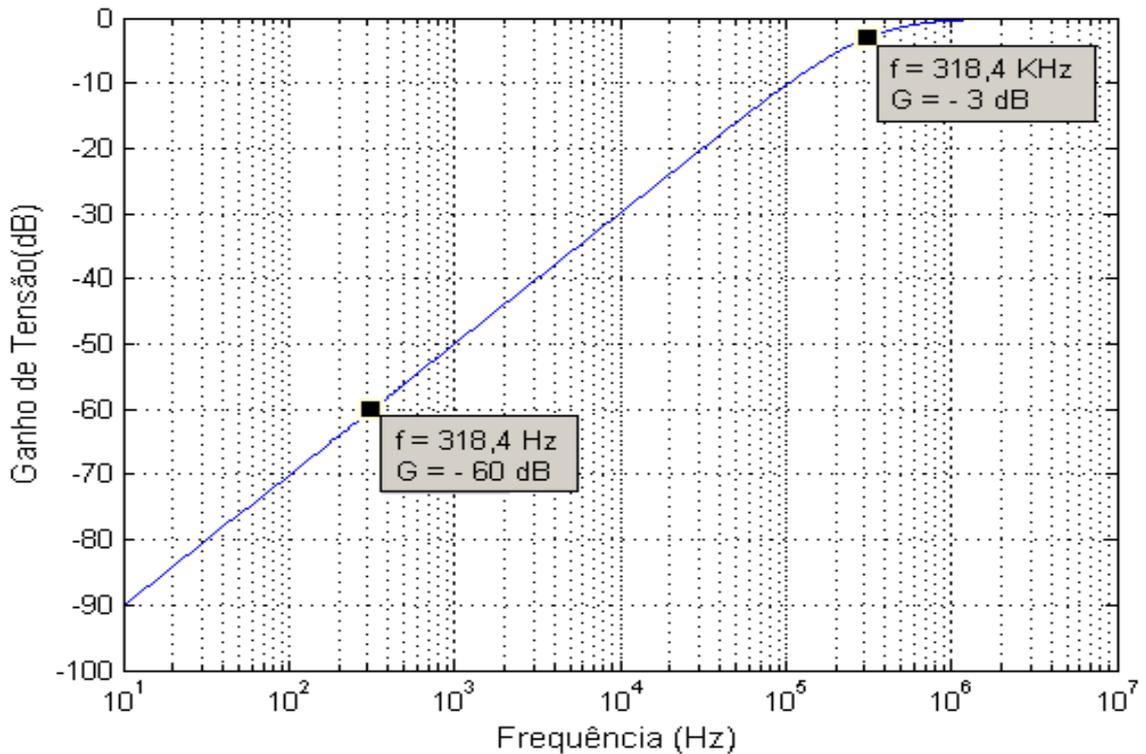
$$f_{c(-60dB)} = f_{c(-3dB)} \times \frac{V_{out}}{V_{in}}, \quad (4.4)$$

$$f_{c(-60dB)} = 318,4 \times 10^3 \times \left(\frac{1,74 \times 10^{-2}}{17,4} \right),$$

$$f_{c(-60dB)} = \mathbf{318,4 \text{ Hz}}$$

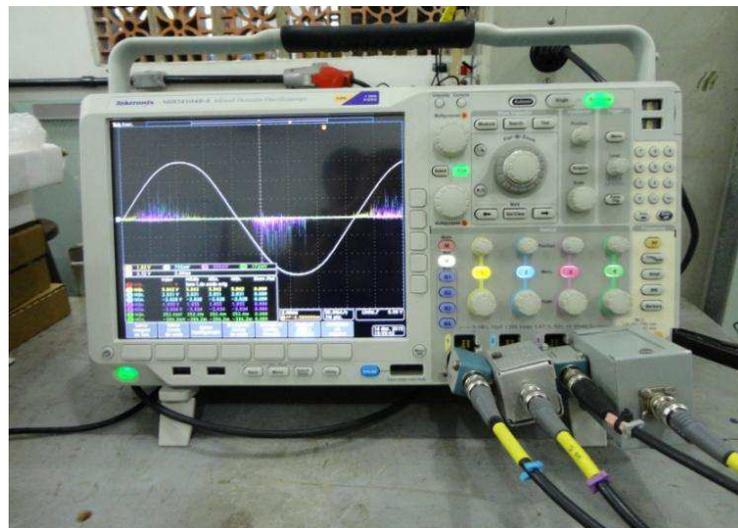
Na Figura 4.13 é apresentado o gráfico com a resposta em frequência do filtro passa-altas RC projetado. Na Figura 4.14 mostram-se os quatro filtros passa-altas RC confeccionados. Eles foram instalados na entrada dos quatro canais do osciloscópio para a aquisição dos sinais obtidos, simultaneamente, com os quatro acopladores *microstrip*.

Figura 4.13 – Resposta em frequência do filtro passa-altas RC projetado.



Fonte: Produzida pelo autor

Figura 4.14– Filtros passa-altas RC instalados no osciloscópio.



Fonte: Produzida pelo autor.

4.2.4 Esquemas de Medição de Descargas Parciais em uma Bobina de Hidrogerador

Os processos de medição de descargas parciais, em uma bobina de hidrogerador, utilizando-se um capacitor de acoplamento, um *HFCT* e acopladores direcionais *microstrip*, estão descritos a seguir.

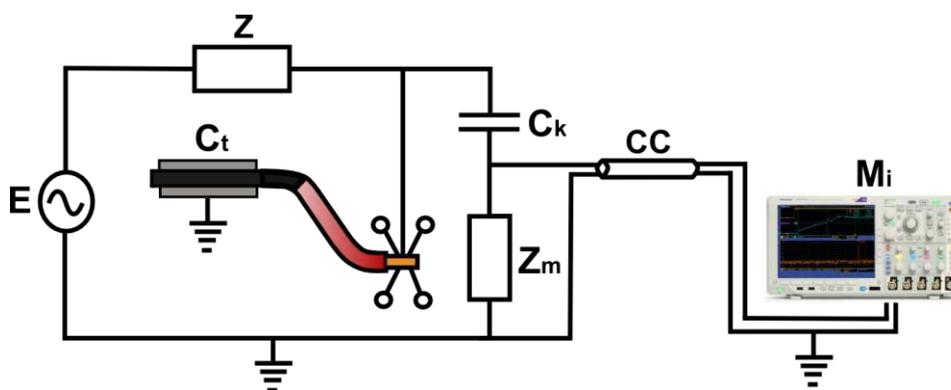
a) Medições Utilizando o Capacitor de Acoplamento

Na Figura 4.15 pode-se observar o esquema de medição de descargas parciais, utilizando um capacitor de acoplamento. Este tipo de medição de descargas parciais, já consolidado na literatura, é o adotado pela norma IEC 60270 (2000).

Para o circuito de ensaio, faz-se necessária uma fonte de alta tensão alternada $E\sim$; um capacitor de acoplamento C_k , isento de descargas parciais na tensão de ensaio e que facilitará a circulação dos impulsos de corrente de alta frequência, aumentando dessa maneira a sensibilidade da medição; o objeto em teste C_t , que neste caso é uma bobina de hidrogerador e um impededor de medição Z_m , na qual os impulsos de corrente gerarão uma queda de tensão proporcional ao pulso de descarga parcial, conectado a um instrumento de medição M_i por meio de um cabo coaxial CC .

Este arranjo é o único que provê conexão galvânica com a amostra. A sensibilidade do impededor é um parâmetro do circuito, e sua constituição depende apenas de uma frequência de ressonância definida. Existem diversas soluções de circuitos para atender esta condição de ressonância, de forma que a sensibilidade pode ser variada de acordo com a vontade do projetista.

Figura 4.15 – Arranjo para medição de descargas parciais utilizando o capacitor de acoplamento.



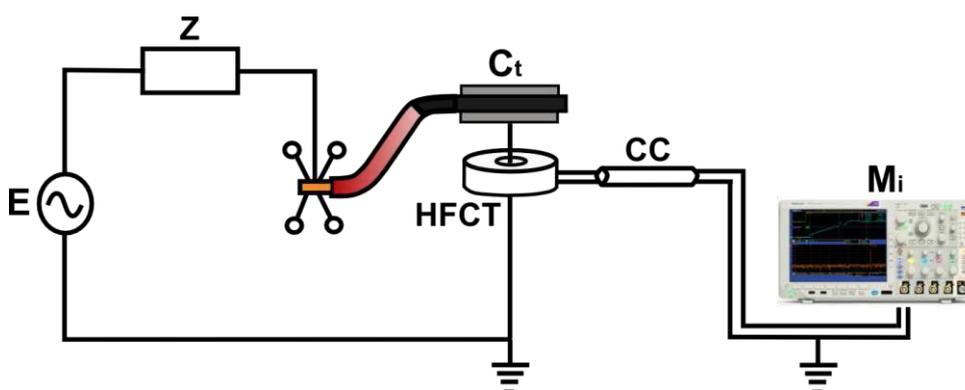
Fonte: Adaptado da norma IEC 60270 (2000).

b) Medições Utilizando o HFCT

O esquema de medição utilizando o HFCT é representado na Figura 4.16. Esta técnica de medição elétrica de descargas parciais é baseada na conexão não-invasiva de um sensor indutivo de alta frequência e alta permeabilidade magnética ao cabo que liga o equipamento sob teste à malha de terra.

O HFCT é conectado, de forma não invasiva, à fita de cobre que faz a conexão do equipamento sob teste, ao terminal de terra. Neste caso, o nível de segurança da equipe responsável pela medição é maximizado, pois, caso haja a falha do equipamento sob teste, o sensor de corrente irá saturar e o mesmo não conduzirá alta tensão para os equipamentos de medição.

Figura 4.16 – Arranjo para medição de descargas parciais utilizando o HFCT.



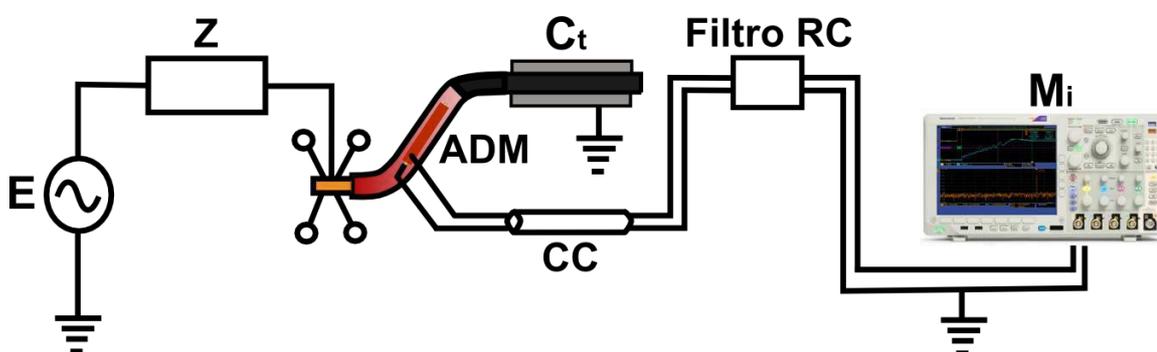
Fonte: Produzida pelo autor.

c) Medições Utilizando o Acoplador Direcional *Microstrip*

Na Figura 4.17 é mostrado o arranjo para medição de descargas parciais com o uso de acopladores direcionais *microstrip*. Para as medições com os acopladores direcionais *microstrip*, é necessário que eles estejam posicionados na superfície isolante da extremidade da bobina, região que não possui camada de tinta semicondutora, o que blindaria os pulsos eletromagnéticos de descargas parciais

Após ser posicionado na bobina, o acoplador *microstrip* é conectado a um cabo coaxial CC, e em seguida a um filtro analógico passa-altas RC, antes de chegar a um dos canais do instrumento de medição (osciloscópio).

Figura 4.17 – Arranjo para medição de descargas parciais utilizando o acoplador direcional *microstrip* (ADM).



Fonte: Produzida pelo autor.

4.2.5 Aquisição dos Sinais de Descargas Parciais

Para os registros dos sinais de descargas parciais no domínio do tempo, foi utilizado um osciloscópio digital de alta resolução fabricado pela Tektronix®, modelo 5014B, que possui quatro canais analógicos e largura de banda de 1GHz. As medições foram realizadas com 5 MSa de memória por canal, taxa de amostragem de 250 MSa/s e representação numérica de 16 bits por ponto.

Para a ligação das saídas dos sensores ao osciloscópio, foram utilizados 4 cabos coaxiais (RG-223) de 50 Ω de impedância e 5 m de comprimento. Os ensaios com alta tensão foram realizados aplicando a tensão nominal da bobina, 11,1 kV (pico):

$$V_{ft} = \frac{V_{ff}}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} = \frac{13,8}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} = 11,1 \text{ kV},$$

em que:

V_{ff} = Tensão nominal fase-fase;

V_{ft} = Tensão nominal fase-terra (pico).

a) Ensaio utilizando os quatro acopladores direcionais *microstrip*

Com o intuito obter sinais de descargas parciais em regime foi adotado um tempo de condicionamento 10 minutos. Após o condicionamento, foram feitas aquisição de sinais oriundos dos quatro acopladores direcionais *microstrip*. O tempo de aquisição foi de 20 ms, suficiente para captar um ciclo completo de uma onda senoidal, que possui 16,66 ms. O processo de aquisição de sinais foi repetido por mais 59 vezes. As aquisições foram realizadas simultaneamente em quatro canais do osciloscópio.

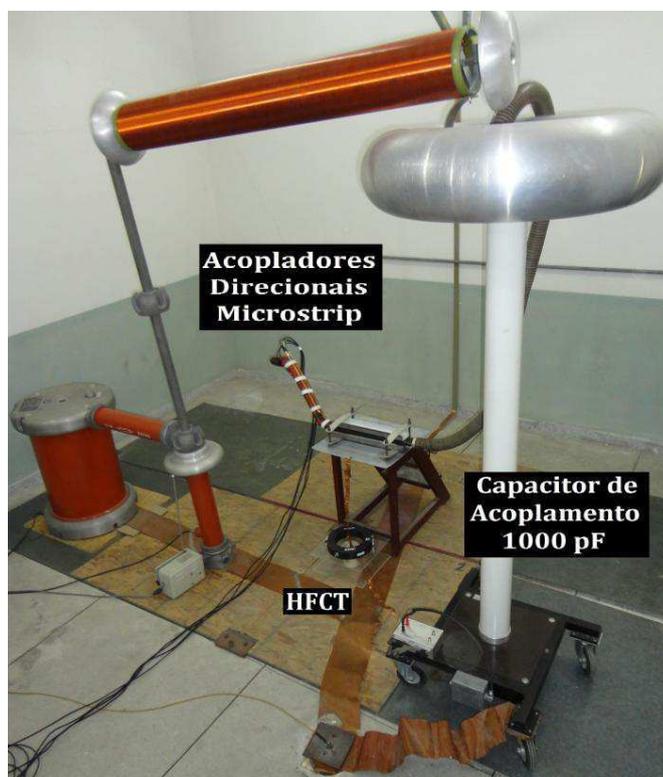
b) Ensaio utilizando o acoplador mais sensível, capacitor e HFCT

Os ensaios anteriores tinham como objetivo a escolha da melhor configuração de acoplador direcional *microstrip*, na captação de pulsos eletromagnéticos de descargas parciais, proveniente da bobina de hidrogerador. O acoplador direcional *microstrip* que apresentou a melhor sensibilidade foi utilizado na avaliação, como sensor para medição de descargas parciais.

Após a escolha do acoplador direcional *microstrip* mais adequado, um novo ensaio foi implementado. Novamente adotou-se 10 minutos como tempo de condicionamento da bobina, e logo após, foram adquiridos 60 sinais de 20 ms, mas agora com o acoplador direcional *microstrip* que obteve a melhor sensibilidade, juntamente com o HFCT e o capacitor de acoplamento de 1000 pF.

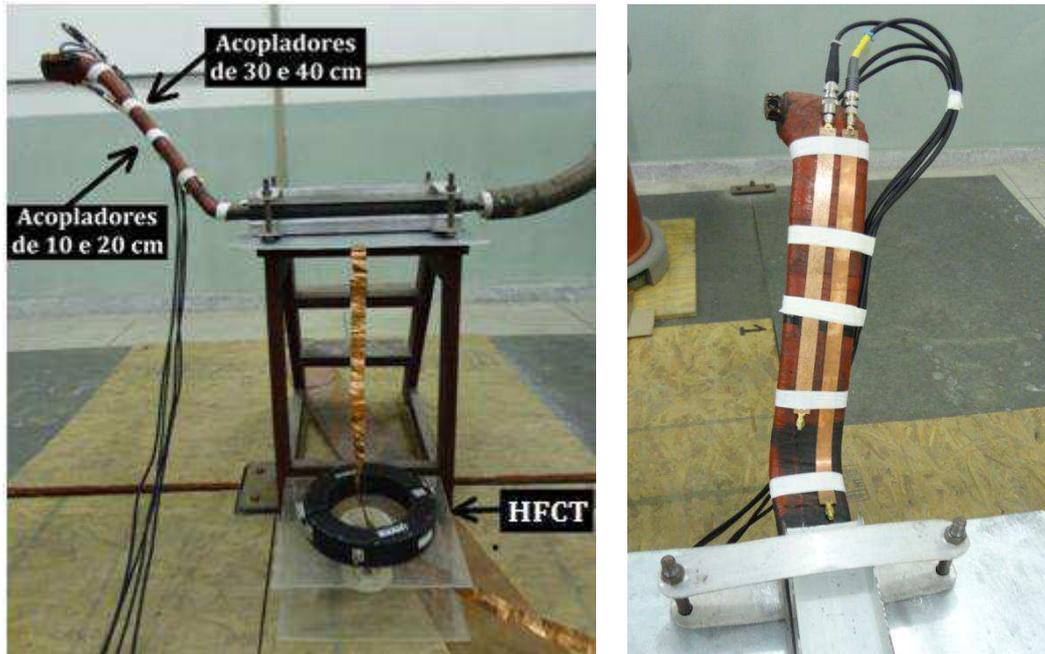
Para que ocorresse a correlação dos sinais dos três sensores no domínio do tempo, as aquisições também foram feitas de forma simultânea em três canais do osciloscópio. A foto do arranjo experimental montado em laboratório é apresentada na Figura 4.18 e na Figura 4.19 pode-se observar melhor a localização dos quatro acopladores direcionais *microstrip* na extremidade da bobina.

Figura 4.18 - Circuito de medição de descargas parciais montado em laboratório.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 4.19 – Detalhe da localização dos acopladores *microstrip* na bobina.



Fonte: Produzida pelo autor.

4.2.6 Processamento e Análise dos Sinais de Descargas Parciais Obtidos

Após as aquisições realizadas nos ensaios, os dados obtidos foram importados para o computador. Com o auxílio do *software* Matlab R2012®, foram implementadas as seguintes rotinas:

- Filtragem *wavelet* dos sinais;
- Cálculo da relação sinal-ruído (RSR);
- Identificação dos pulsos de descargas parciais;
- Contagem dos pulsos de descargas parciais;
- Elaboração dos padrões representados em função da tensão aplicada, método conhecido por *PRPD* (*Phase Resolved Partial Discharge*).

Primeiramente, os sinais de descargas parciais foram tratados utilizando a filtragem *wavelet*, para a atenuação das componentes de frequência indesejadas (ruídos brancos), captados pelos três diferentes tipos de sensores.

Após a separação dos sinais de descargas parciais dos ruídos provenientes das medições, fez-se o cálculo da relação sinal-ruído (RSR), parâmetro estatístico que mensura a qualidade do sensor em captar apenas o sinal de interesse.

Nas medições obtidas, a relação sinal-ruído comparou o nível do sinal desejado (no caso, apenas os pulsos de descargas parciais) com o nível do ruído de fundo (ruído branco). O critério de julgamento adotado assume que quanto mais alta fosse a relação sinal-ruído, menor seria o efeito do ruído de fundo sobre a detecção ou medição do sinal, logo, melhor a qualidade do sensor.

Assim, fez-se uso desse parâmetro para a análise da qualidade de detecção de cada um dos quatro acopladores direcionais *microstrip* confeccionados, como também, o *HFCT* e o capacitor de acoplamento.

Em seguida, foi utilizada uma rotina que realiza uma varredura na janela de tempo de cada um dos 60 ciclos senoidais adquiridos, fazendo a identificação e contagem dos pulsos de descargas parciais de cada medição realizada.

Por fim, os 60 ciclos de tensão, contendo os sinais de descargas parciais, foram utilizados (após a filtragem *wavelet*) para a elaboração dos padrões representados em função da tensão aplicada, método conhecido por *Phase Resolved Partial Discharge* (PRPD).

Dessa forma, utilizaram-se os resultados obtidos com as rotinas descritas para a avaliação da sensibilidade na detecção de pulsos de descargas parciais, dos quatro acopladores direcionais *microstrip*. Com o acoplador direcional *microstrip* de melhor sensibilidade, foram realizadas as mesmas comparações, mas agora entre ele e os outros dois sensores: *HFCT* e capacitor de acoplamento.

Neste capítulo foram descritos os materiais aplicados e métodos utilizados para medição de descargas parciais em uma bobina de hidrogerador. No capítulo seguinte será realizado a análise dos resultados das medições de descargas parciais obtidas com os quatro acopladores direcionais *microstrip*, o *HFCT* e o capacitor de acoplamento de 1000 pF.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E ANÁLISES

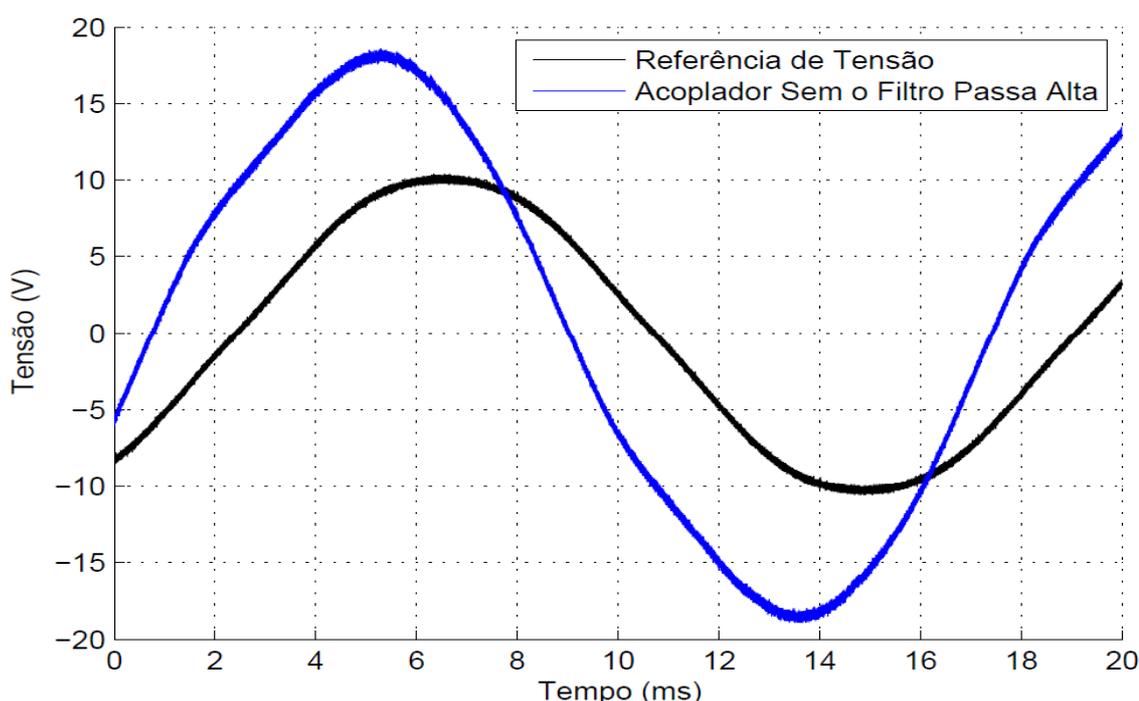
Neste capítulo são apresentados os resultados e análises dos dados provenientes dos testes realizados. Primeiramente, será realizada a análise dos resultados obtidos com os quatro acopladores direcionais *microstrip*. Em seguida, será feita a análise do acoplador direcional *microstrip* que obteve a maior sensibilidade, e os outros dois sensores utilizados para a comparação: *HFCT* e o capacitor de acoplamento de 1000 pF.

As análises foram realizadas por meio da relação sinal-ruído (RSR) calculada, da contagem dos números de pulsos de descargas parciais detectados e da análise dos gráficos *PRPD* de cada um dos sensores.

5.1 Resultados Obtidos com os Quatro Acopladores Direcionais *Microstrip*

Na Figura 5.1 é apresentado o sinal captado com o acoplador *microstrip* de 40 cm, sem a instalação do filtro analógico passa-altas RC. Observou-se que, sem a presença do filtro, a tensão induzida foi de 17,4 V para uma tensão aplicada de 11,1 kV, em 60 Hz.

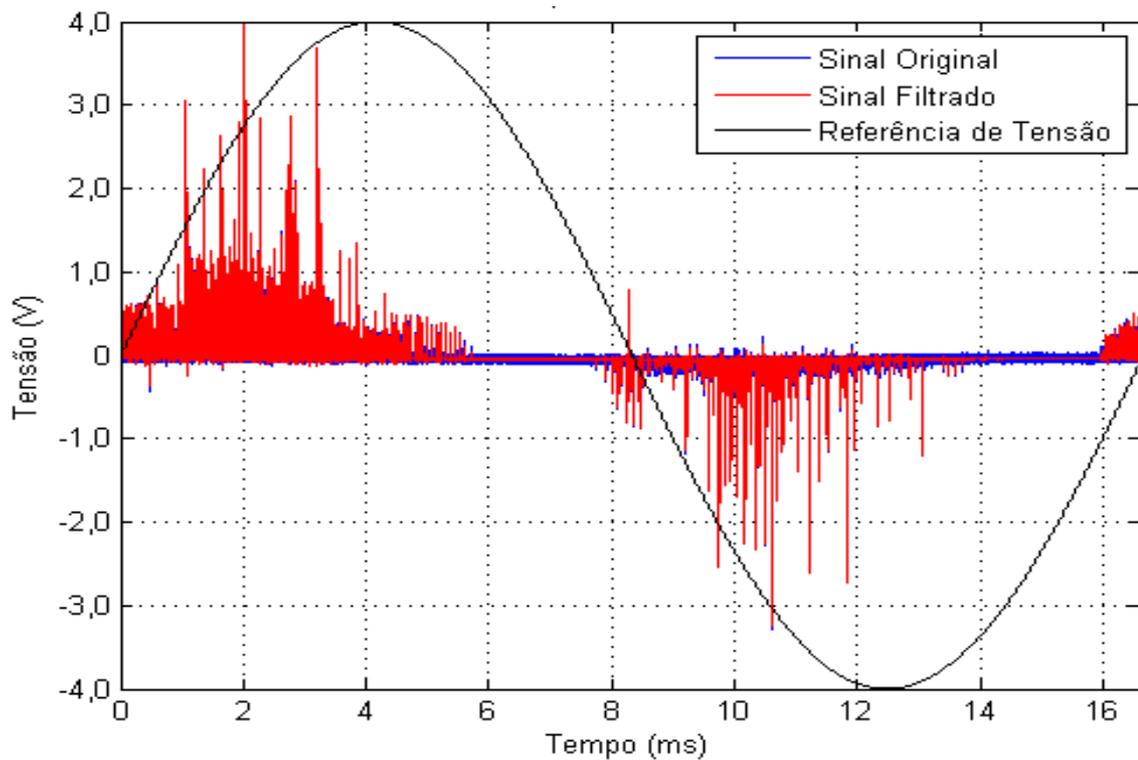
Figura 5.1 – Sinal obtido com o acoplador de 40 cm sem a filtragem analógica.



Conforme pode ser observado na Figura 5.2, a instalação do filtro possibilitou a atenuação da componente fundamental da tensão de alimentação induzida no acoplador, bem como, as harmônicas de ordem imediatamente superiores.

O que permitiu apenas a passagem das ondas eletromagnéticas na frequência de interesse, acima de alguns MHz, ordem de frequência característica das descargas parciais geradas pelo isolamento.

Figura 5.2 – Sinal obtido com o acoplador de 40 cm após a filtragem analógica.



Nas Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 são apresentados os pulsos de descargas parciais obtidas com os quatro acopladores direcionais *microstrip* confeccionados. A forma de onda senoidal que aparece nas figuras é a representação de uma amostra da tensão aplicada nos ensaios.

Nas figuras também são mostrados os sinais de descargas parciais antes e depois da filtragem *wavelet*. Os sinais são referentes a apenas um dos sessenta ciclos de tensão senoidal que foram adquiridos. Como mencionado na seção 4. 2.5, os sinais dos quatro acopladores *microstrip* foram captados simultaneamente em cada canal do osciloscópio.

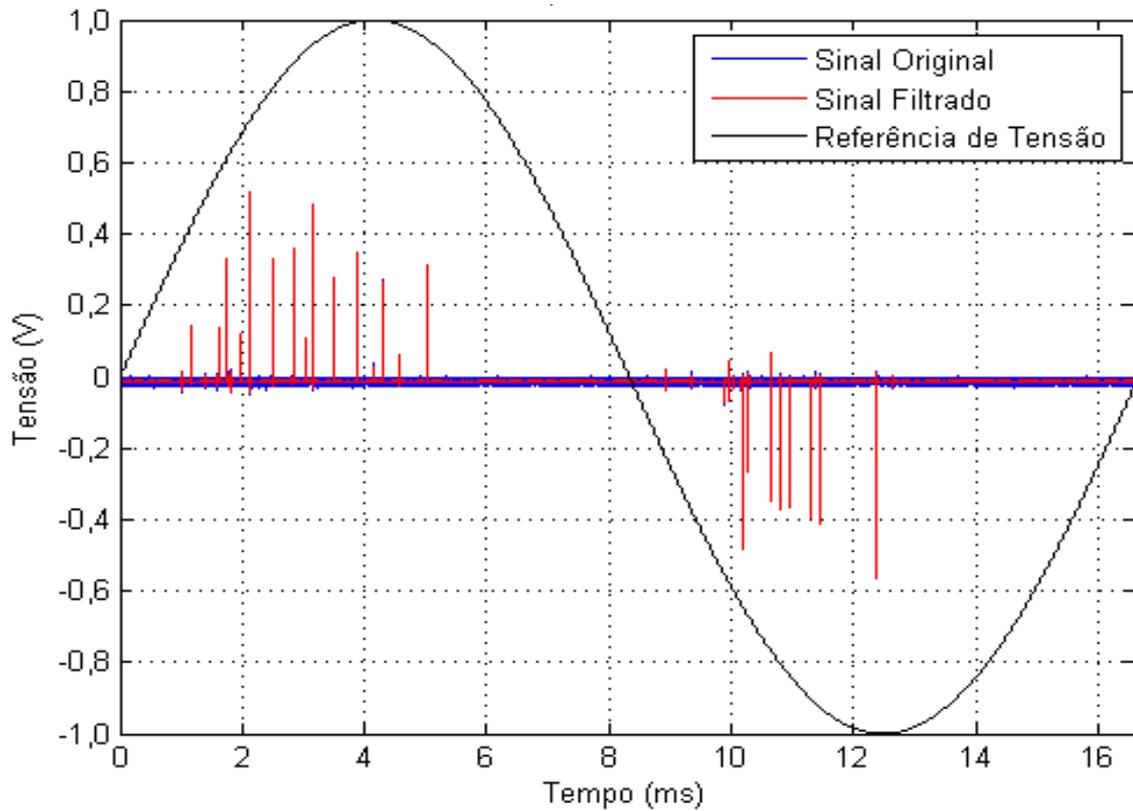
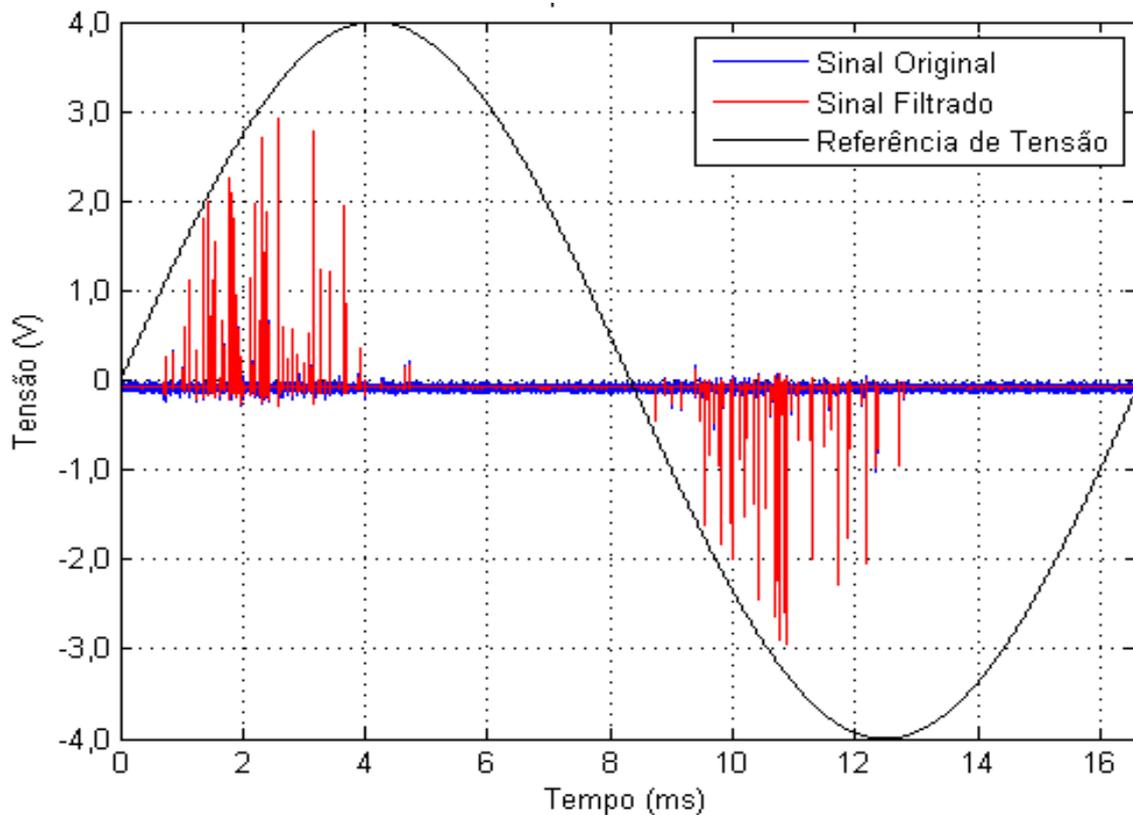
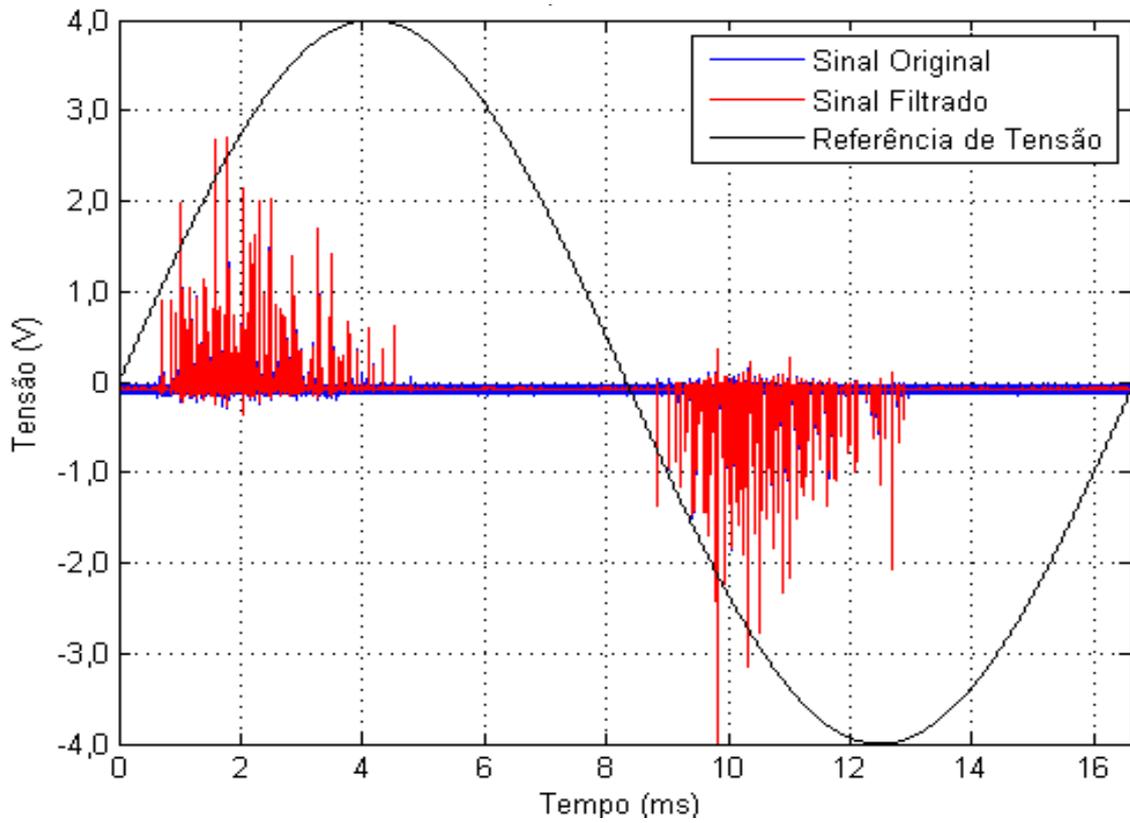
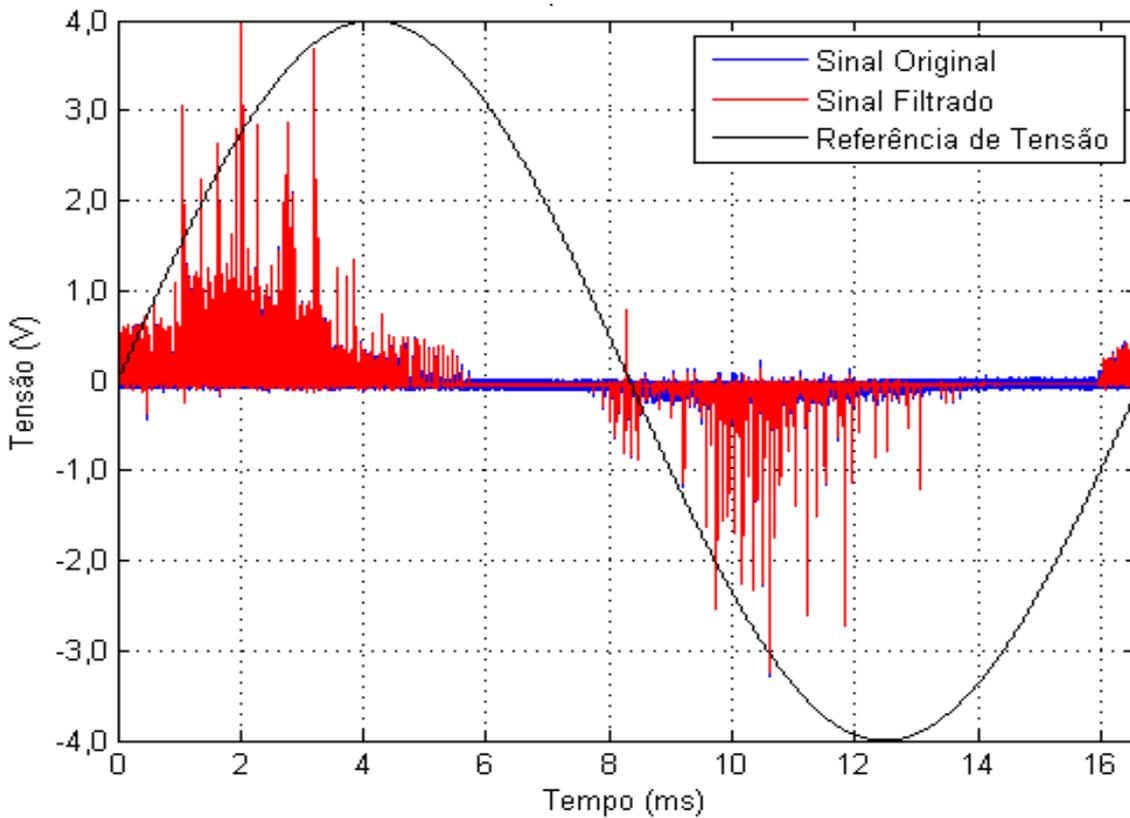
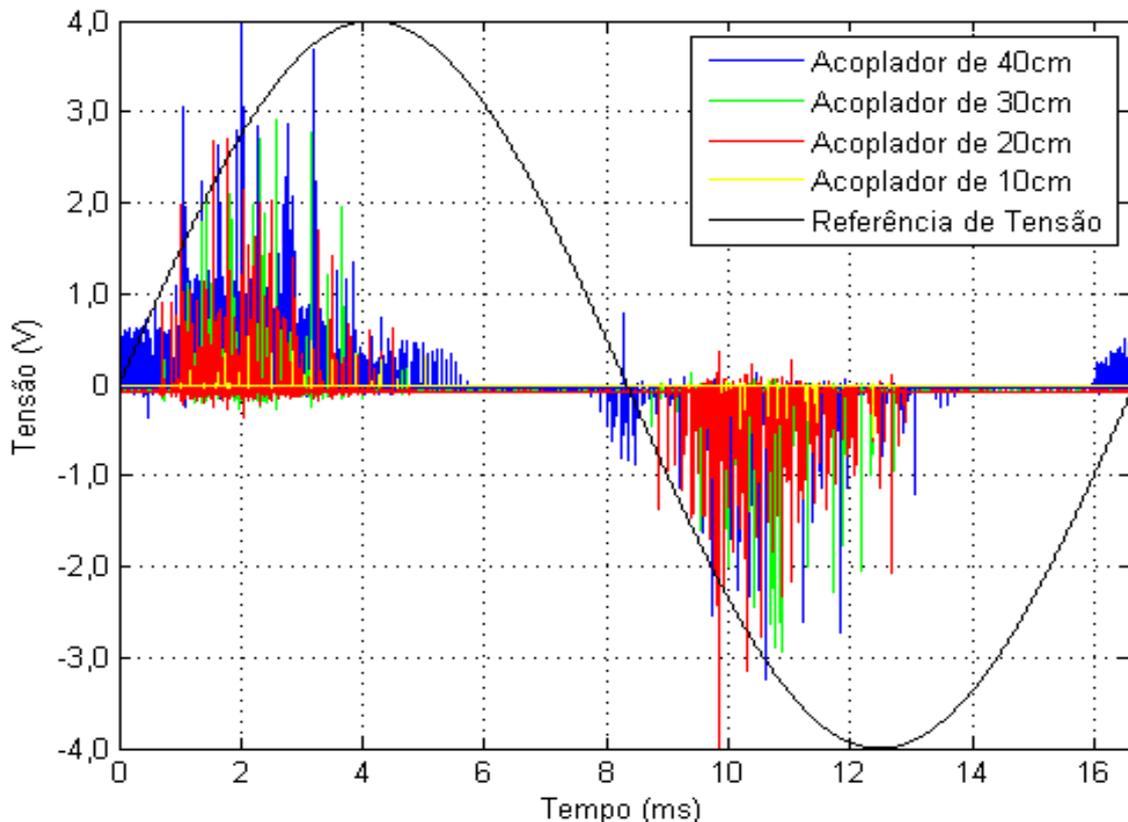
Figura 5.3 - Sinal original e filtrado do acoplador direcional *microstrip* de 10 cm.**Figura 5.4** - Sinal original e filtrado do acoplador direcional *microstrip* de 20 cm.

Figura 5.5 - Sinal original e filtrado do acoplador direcional *microstrip* de 30 cm.**Figura 5.6** - Sinal original e filtrado do acoplador direcional *microstrip* de 40 cm.

Na Figura 5.7 estão reunidos os pulsos de descargas parciais obtidas com os quatro acopladores direcionais *microstrip*. Os sinais são referentes a apenas um dos 60 ciclos senoidais adquiridos e após ter sido realizada a filtragem *wavelet*. Visualmente, observa-se que o acoplador direcional *microstrip* de 40 cm detectou a maior quantidade de pulsos e com as maiores intensidades. Seguido do acoplador direcional *microstrip* de 30 cm, 20 cm e 10 cm, respectivamente.

Figura 5.7 – Sinais dos quatro acopladores direcionais *microstrip* após a filtragem.



Como, nem sempre é possível identifica de forma visual, o sensor que apresente a maior quantidade de pulsos captados, na Tabela 5.1 são apresentados os resultados dos cálculos da relação sinal-ruído (RSR) e, o número de pulsos detectados pelos quatro acopladores *microstrip* nos 60 ciclos senoidais.

Constatou-se agora, que o acoplador *microstrip* de 40 cm foi o que obteve a melhor sensibilidade à captação dos pulsos de descargas parciais, pois apresentou a melhor relação sinal-ruído (8,07 dB) e o maior número de pulsos de descargas parciais detectados (22.167 pulsos). O acoplador direcional *microstrip* de 30 cm, com relação sinal-ruído de 3,57 dB e 11.603 pulsos de descargas parciais detectados, por sua vez,

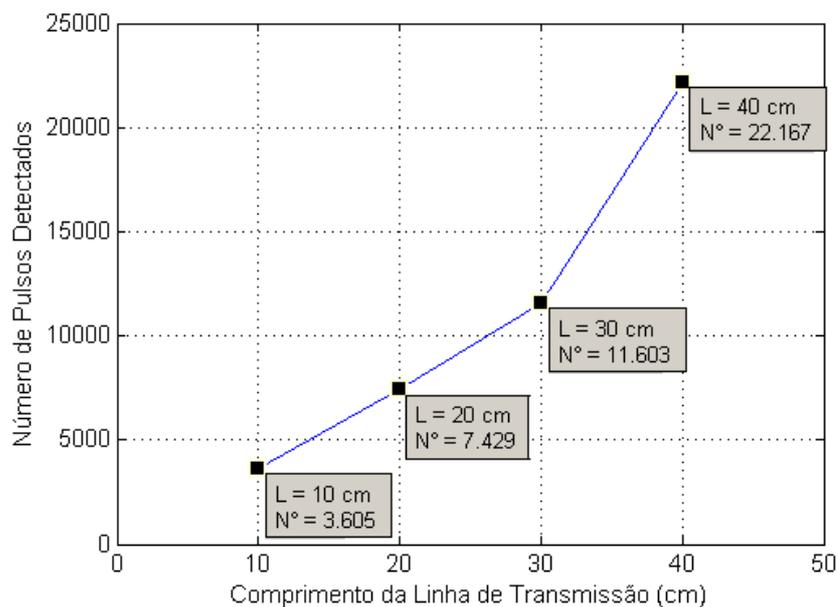
obteve a segunda melhor sensibilidade. O acoplador direcional *microstrip* de 20 cm, com relação sinal-ruído de 3,57 dB e 7.429 pulsos de descargas parciais detectados, consistiu na terceira melhor sensibilidade. E finalmente, o acoplador direcional *microstrip* de 10 cm, com relação sinal-ruído de -3,51 dB e apenas 3.605 pulsos de descargas parciais detectados, foi o acoplador com a pior sensibilidade dentre os quatro testados. O RSR negativo pode ser justificado devido o baixo acoplamento da estrutura de 10 cm com o isolamento, que resultou na captação de mais ruídos e uma menor detecção de pulsos.

Tabela 5.1 – Análise de sensibilidade dos acopladores direcionais *microstrip*.

Acoplador <i>Microstrip</i>	RSR (dB)	Número de pulsos detectados
Acoplador de 10 cm	-3,51	3605
Acoplador de 20 cm	2,59	7429
Acoplador de 30 cm	3,57	11603
Acoplador de 40 cm	8,07	22167

Na Figura 5.8 tem-se a curva de relação entre o número de pulsos detectados e o comprimento da linha de transmissão de cada acoplador direcional *microstrip*. Observa-se que, dentre os modelos projetados neste trabalho, o comprimento da linha de transmissão *microstrip* está diretamente relacionado com a sua sensibilidade, ou seja, quanto maior é o seu comprimento maior é a quantidade de pulsos de descargas parciais que a acoplador direcional *microstrip* consegue detectar.

Figura 5.8 – Relação entre o número de pulsos detectados e o comprimento da linha.

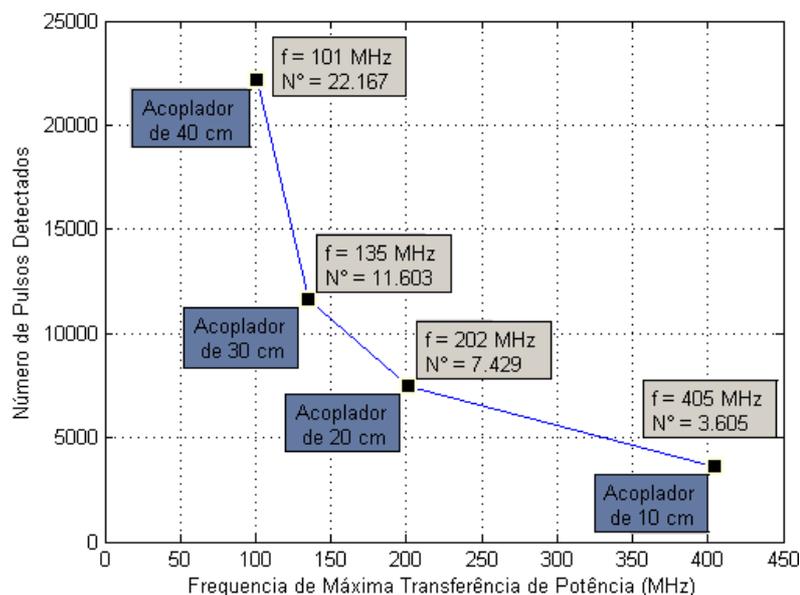


Assim, o comportamento da curva obtida demonstra que um acoplador *microstrip* com comprimento superior a 40 cm (de 50 ou 60 cm, por exemplo) ainda conseguiria captar mais pulsos que os quatro acopladores *microstrip* confeccionados. Porém, deve-se considerar que quanto maior for o comprimento do acoplador, maior será a dificuldade de sua instalação na extremidade do enrolamento de hidrogerador, chegando a um comprimento que simplesmente impossibilitaria a sua instalação no corpo da bobina. Além disso, provavelmente, haverá um tamanho em que a relação se estabilizará, e a indutância poderá vir a ser um problema.

Conforme as normas IEEE 1434 (2000) e IEC 60034-27-2 (2012), os sinais característicos de descargas parciais em enrolamentos de hidrogeradores, situam-se, predominantemente, em uma faixa inferior a 150 MHz. No gráfico da Figura 5.9, observa-se o comportamento do nível de frequência para a máxima transferência de potência de cada acoplador com suas respectivas quantidades de pulsos detectados.

Ao analisar o nível de frequência para a máxima transferência de potência de cada acoplador (descrita na Tabela 4.2) tem-se que o acoplador direcional *microstrip* de 40 cm é o que possui a menor frequência (101 MHz) e que mais se aproxima da faixa de frequência característica dos sinais de descargas parciais. Deste modo, é justificada a razão pelo qual o acoplador direcional *microstrip* de 40 cm obteve a maior sensibilidade, detectando a maior quantidade de pulsos dentre os quatro acopladores testados.

Figura 5.9 – Relação entre o número de pulsos detectados e a frequência para a máxima transferência de potência.



Nas Figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 são apresentados os gráficos *PRPD* obtidos pelos quatro acopladores *microstrip*. Os pontos no gráfico *PRPD* representam os pulsos de descargas parciais (valores de pico), que foram identificados nos sessenta ciclos senoidais adquiridos. Um ciclo senoidal possui a duração de 16,67 ms, com sessenta ciclos tem-se aproximadamente 1 (um) segundo de tempo total de aquisição. Um período de tempo suficiente para se formar um padrão estatístico de pulsos de descargas parciais captados, possibilitando a análise de sua distribuição ao longo do ângulo de fase.

Na Figura 5.10 estão plotados os 3.605 pulsos de descargas parciais captados pelo acoplador direcional *microstrip* de 10 cm. Os pulsos captados localizam-se entre os ângulos de 0° a 110° do semiciclo positivo e 180° a 290° do semiciclo negativo. Concentram-se predominantemente na região em torno do ângulo de 60° e 250°, onde atingem intensidades de até 1,6 V e - 1,6V.

Na Figura 5.11 estão plotados os 7.429 pulsos de descargas parciais captados pelo acoplador direcional *microstrip* de 20 cm. Os pulsos captados concentram-se na região entre os ângulos de 0° e 110° e 190° e 290°, onde atingem intensidades de até 6 V e - 6 V.

Na Figura 5.12 estão plotados os 11.603 pulsos de descargas parciais captados pelo acoplador direcional *microstrip* de 30 cm. Os pulsos captados concentram-se na região entre os ângulos de 0° a 120° e 180° a 290°, onde alcançam até 7 V e -6 V.

Na Figura 5.13 estão plotados os 22.607 pulsos de descargas parciais captados pelo acoplador direcional *microstrip* de 40 cm. Os pulsos captados concentram-se na região entre os ângulos de 0° a 130°, 190° a 300° e 340° a 360°, com intensidades de até 8 V e - 8 V.

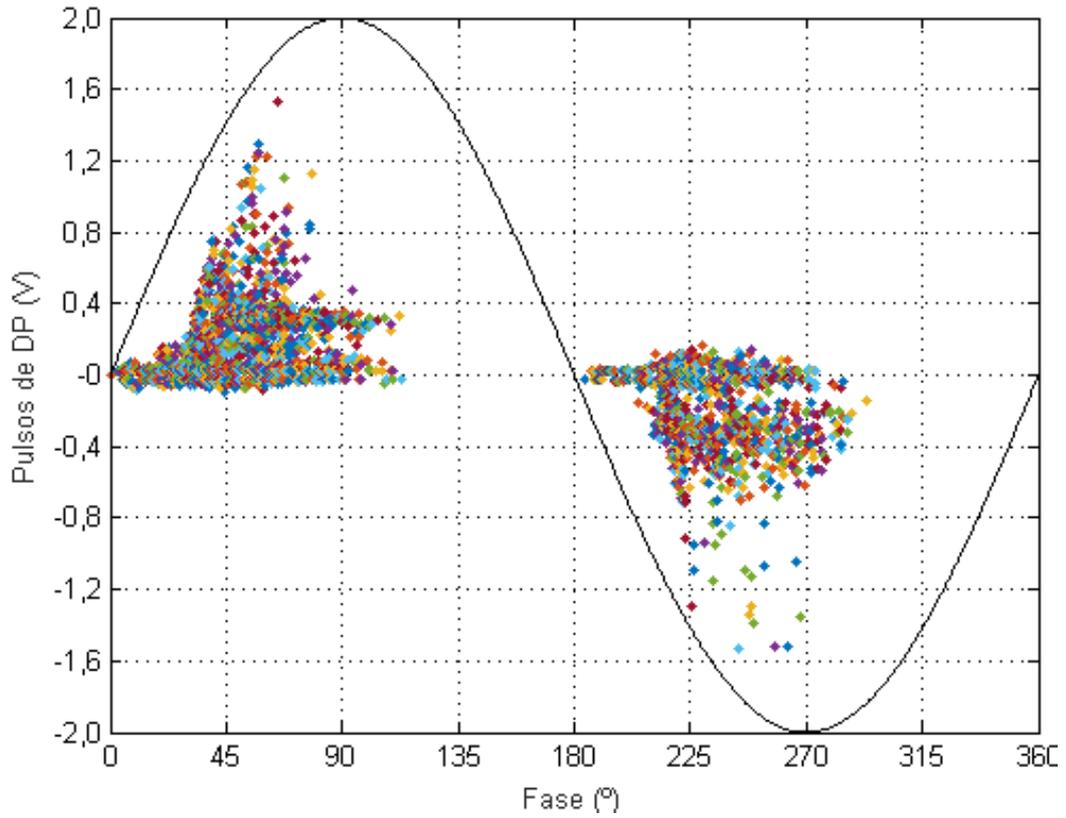
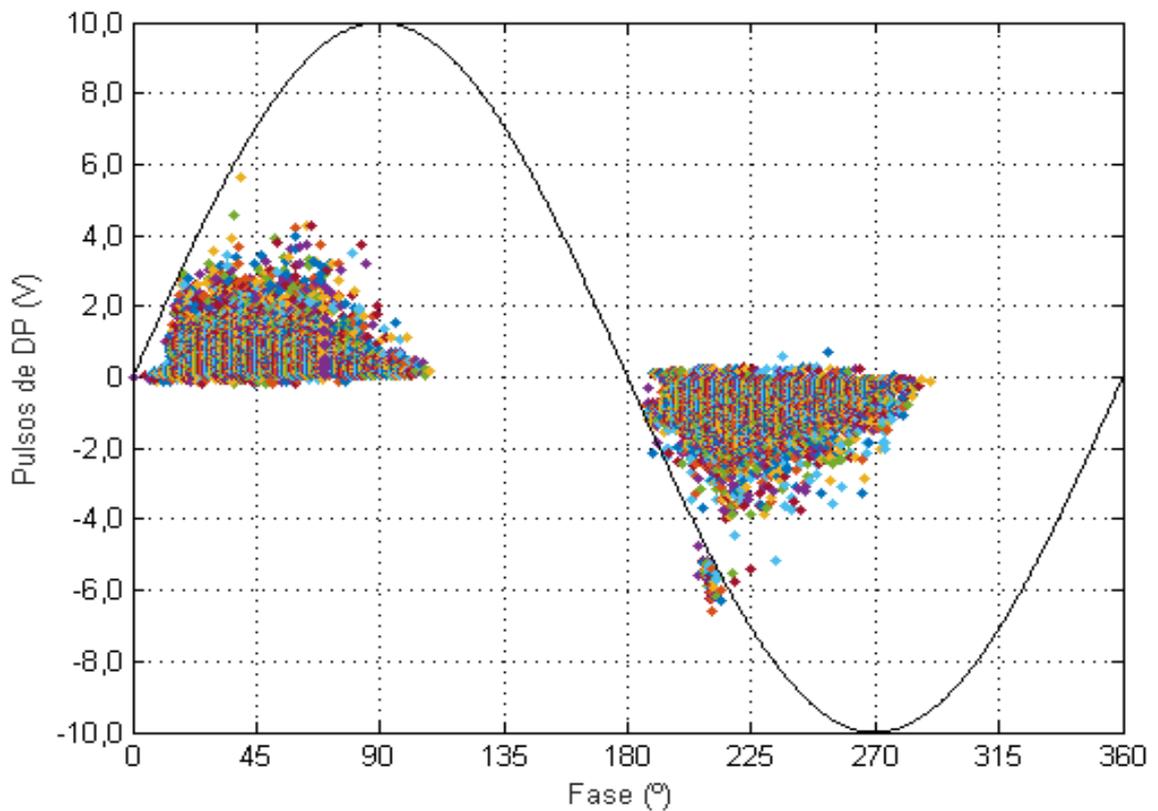
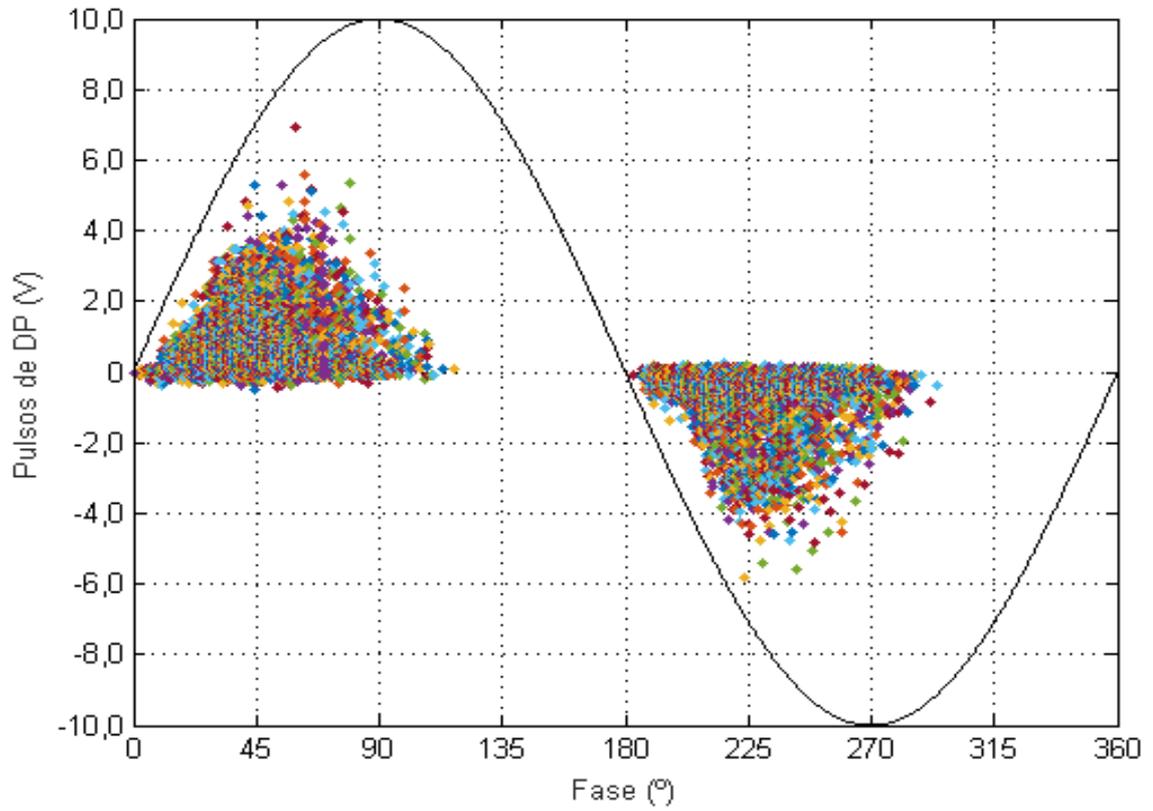
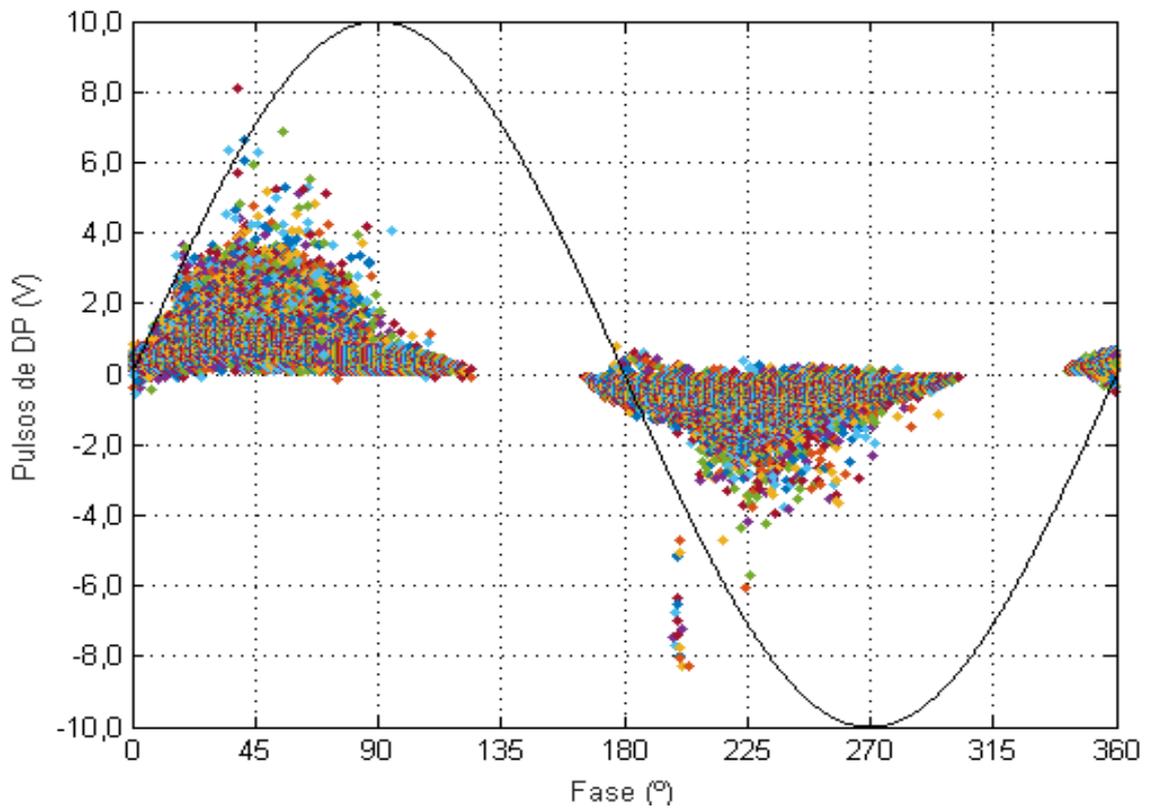
Figura 5.10 – Gráfico *PRPD* do acoplador direcional *microstrip* de 10 cm.**Figura 5.11** – Gráfico *PRPD* do acoplador direcional *microstrip* de 20 cm.

Figura 5.12 – Gráfico *PRPD* do acoplador direcional *microstrip* de 30 cm.**Figura 5.13** – Gráfico *PRPD* do acoplador direcional *microstrip* de 40 cm.

5.2 Resultados Obtidos com o Acoplador Direcional *Microstrip* de 40 cm, *HFCT* e Capacitor de Acoplamento

Para avaliar a sensibilidade do acoplador direcional *microstrip* com relação ao *HFCT* e o capacitor de acoplamento de 1000 pF, escolheu-se apenas o acoplador *microstrip* que obteve a melhor sensibilidade (40 cm). Procedeu-se assim, para que fosse possível captar os sinais de descargas parciais simultaneamente em cada canal do osciloscópio, assim como foi feito com o teste dos quatro acopladores *microstrip*.

Nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 são apresentados os pulsos de descargas parciais obtidas com o acoplador direcional *microstrip* de 40 cm, o capacitor de acoplamento e o *HFCT*. Os pulsos são referentes a apenas um dos sessenta ciclos de tensão senoidal que foram adquiridos. Os sinais dos três diferentes tipos de sensores foram captados simultaneamente em cada canal do osciloscópio. A forma de onda senoidal que aparece nas figuras é a representação de uma amostra da tensão aplicada.

Figura 5.14 – Sinal original e filtrado do acoplador direcional *microstrip* de 40 cm.

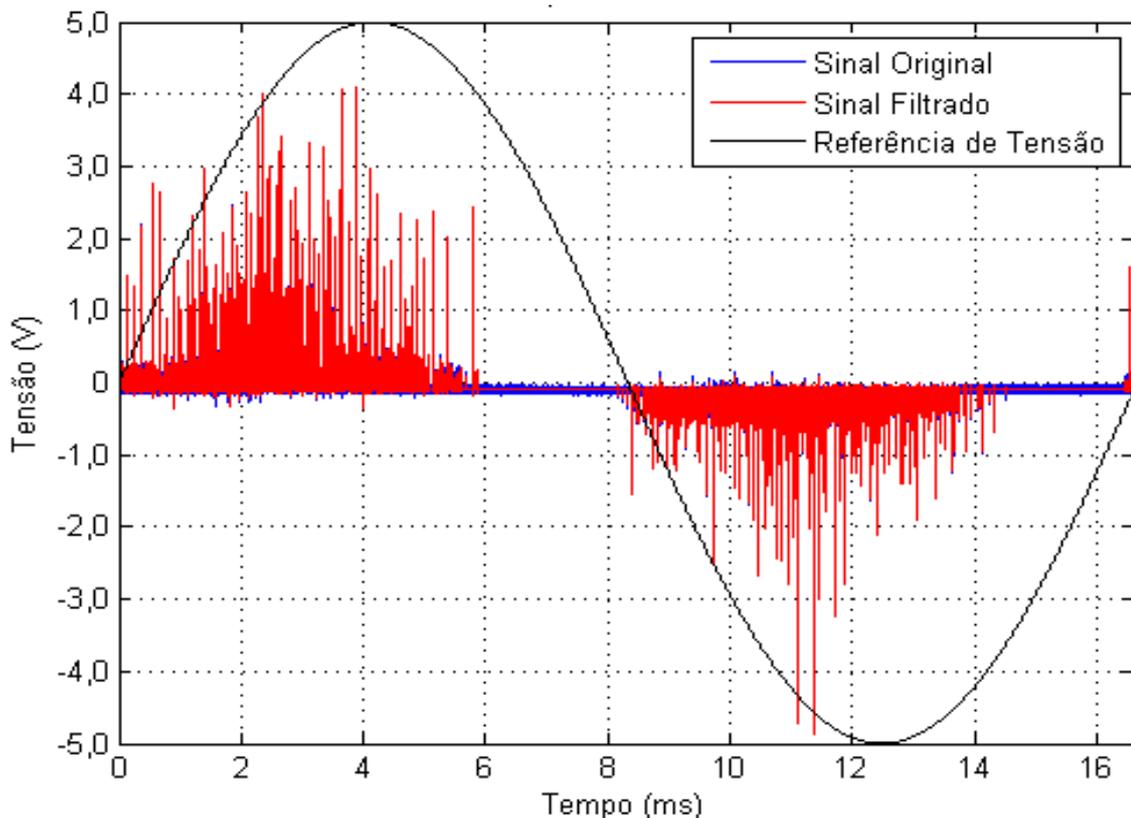
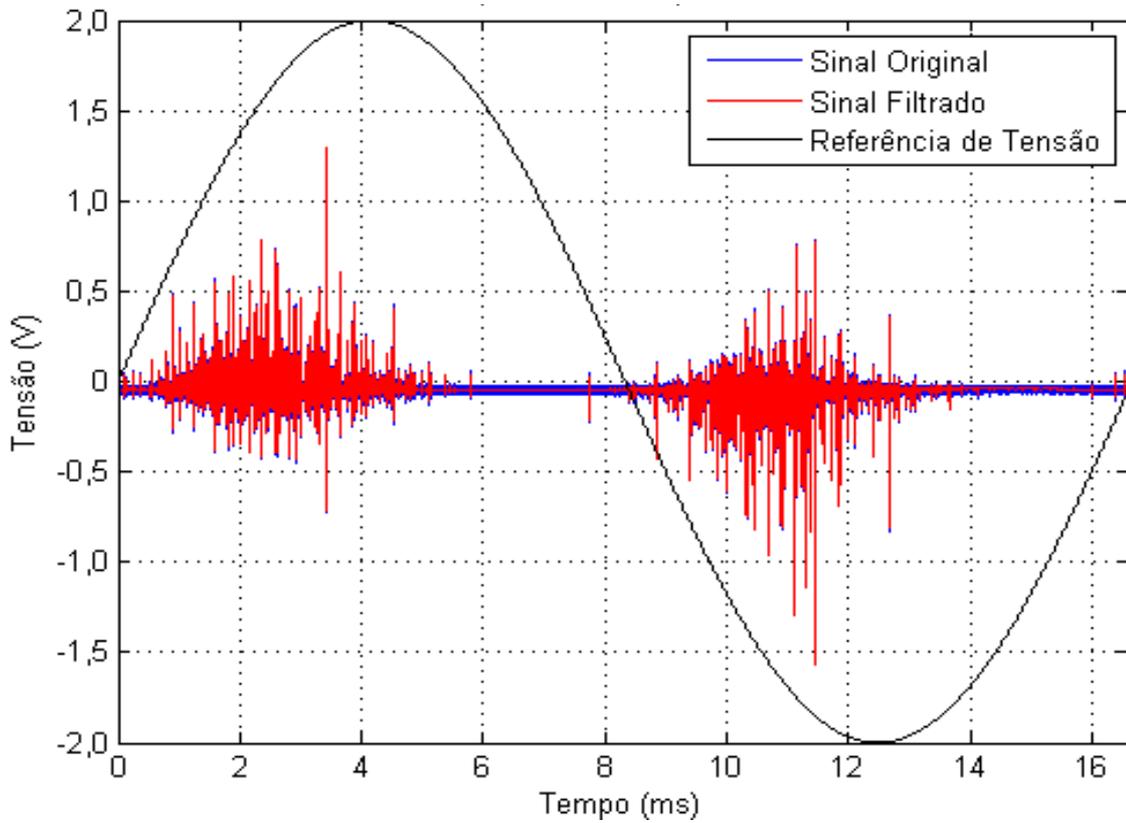
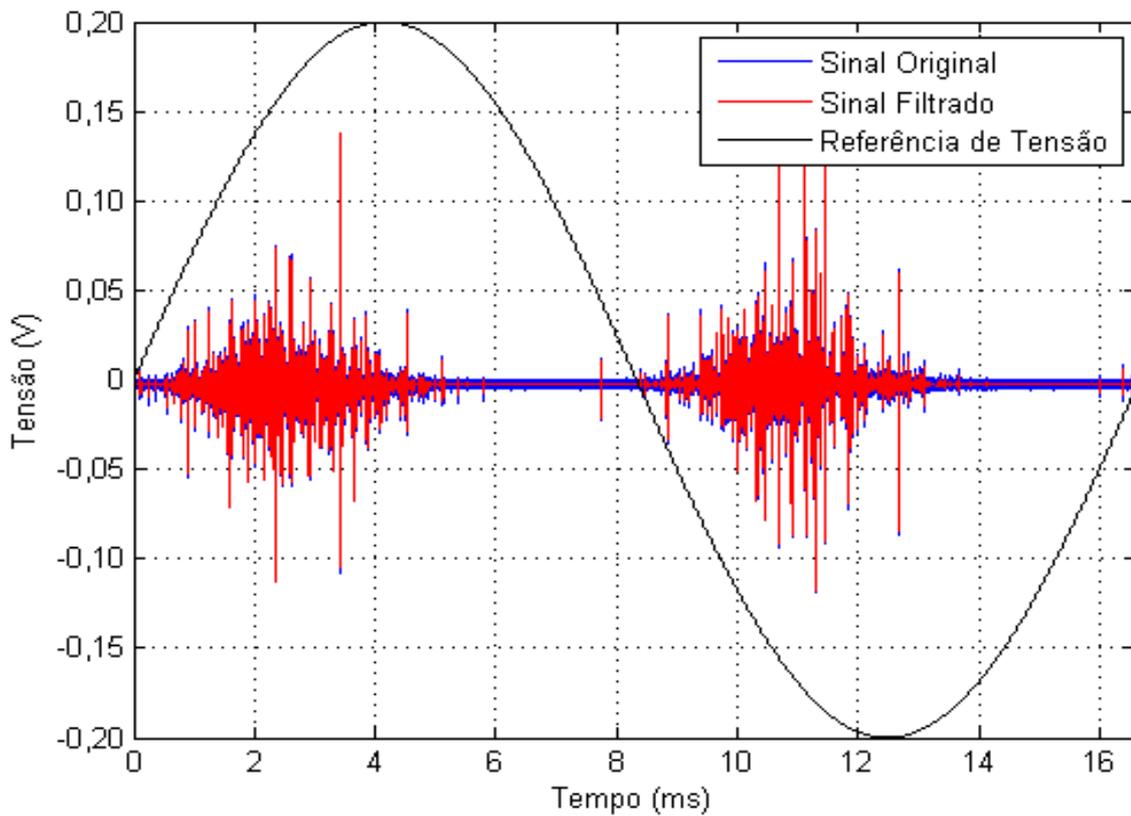


Figura 5.15 - Sinal original e filtrado do capacitor de acoplamento.**Figura 5.16** - Sinal original e filtrado do HFCT.

A aplicação da filtragem wavelet possibilitou a atenuação do ruído a níveis compatíveis com a aplicação. Os ruídos foram atenuados nos sinais captados pelos três sensores, restando apenas os pulsos de descargas parciais com uma mínima atenuação. Nos três casos os pulsos de descargas parciais se encontram na mesma região de fase da senoide de referência, diferenciando apenas pelo comportamento da resposta do *HFCT* e do capacitor de acoplamento na detecção dos pulsos de descargas parciais captados, que subamortecem os pulsos em maior intensidade, quando comparados aos pulsos adquiridos com o acoplador direcional *microstrip* de 40 cm.

Uma outra análise pode ser feita quando se compara os resultados mostrados nas Figuras 5.17, 5.18 e 5.19. As figuras apresentam as formas de onda de um determinado pulso de descarga parcial, obtido, simultaneamente, por cada um dos três sensores durante o semiciclo positivo da tensão aplicada. Enquanto o capacitor de acoplamento e o *HFCT* possuem uma resposta sub amortecida, que oscila entre a polaridade positiva e negativa, o acoplador direcional *microstrip* tem uma resposta sub amortecida, mas que se mantém na mesma polaridade do semiciclo senoidal.

Figura 5.17 – Forma de onda de um pulso de descarga parcial obtido com o acoplador direcional *microstrip* de 40 cm.

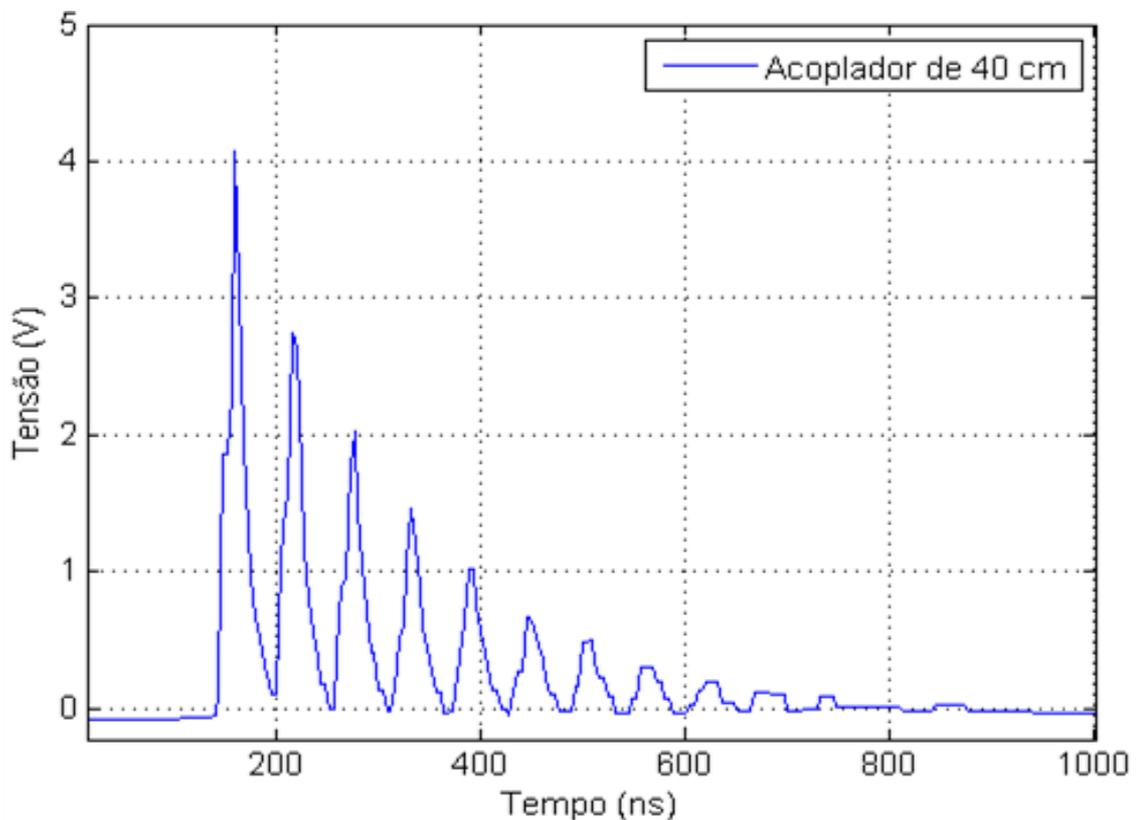
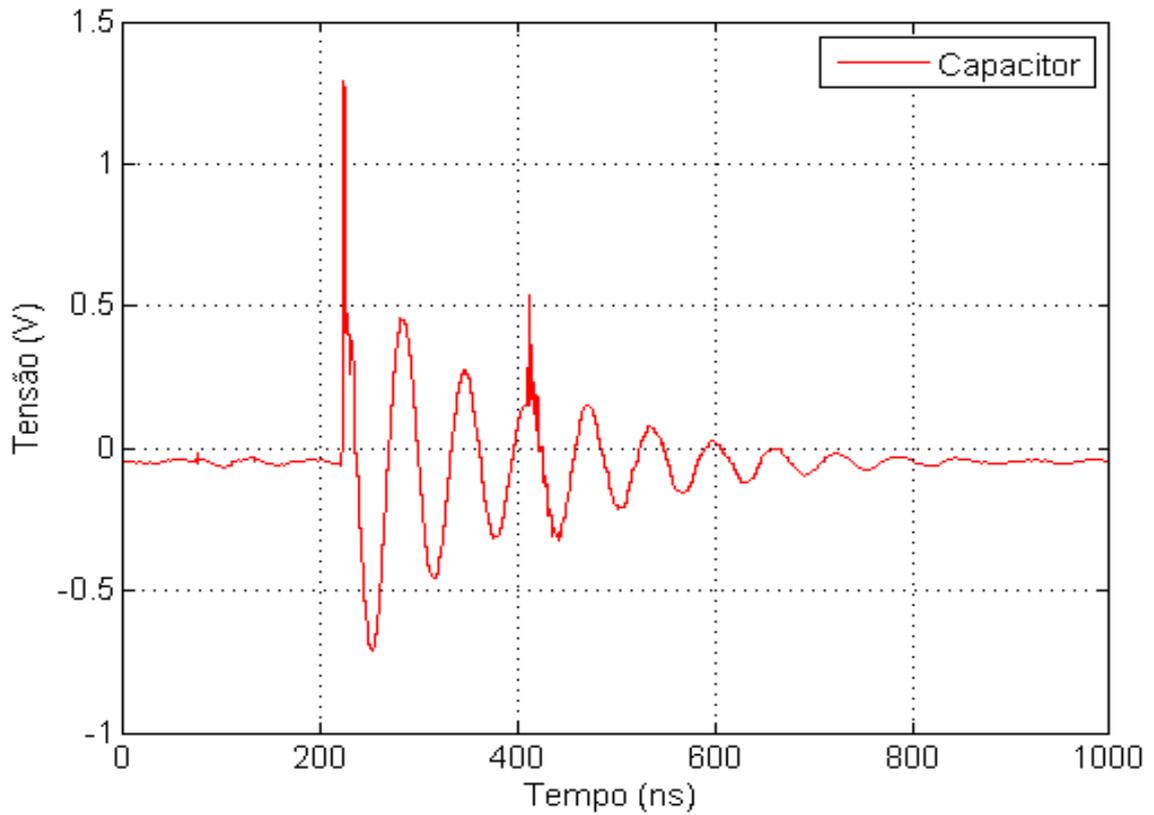
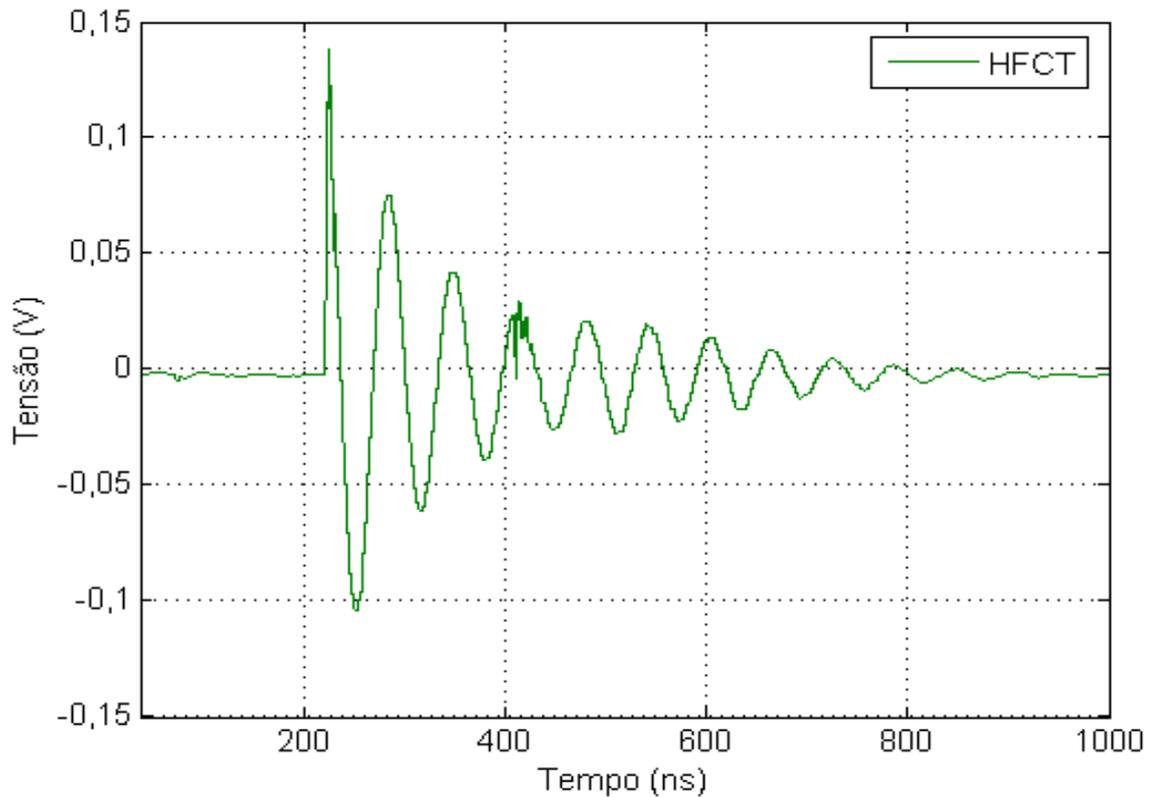
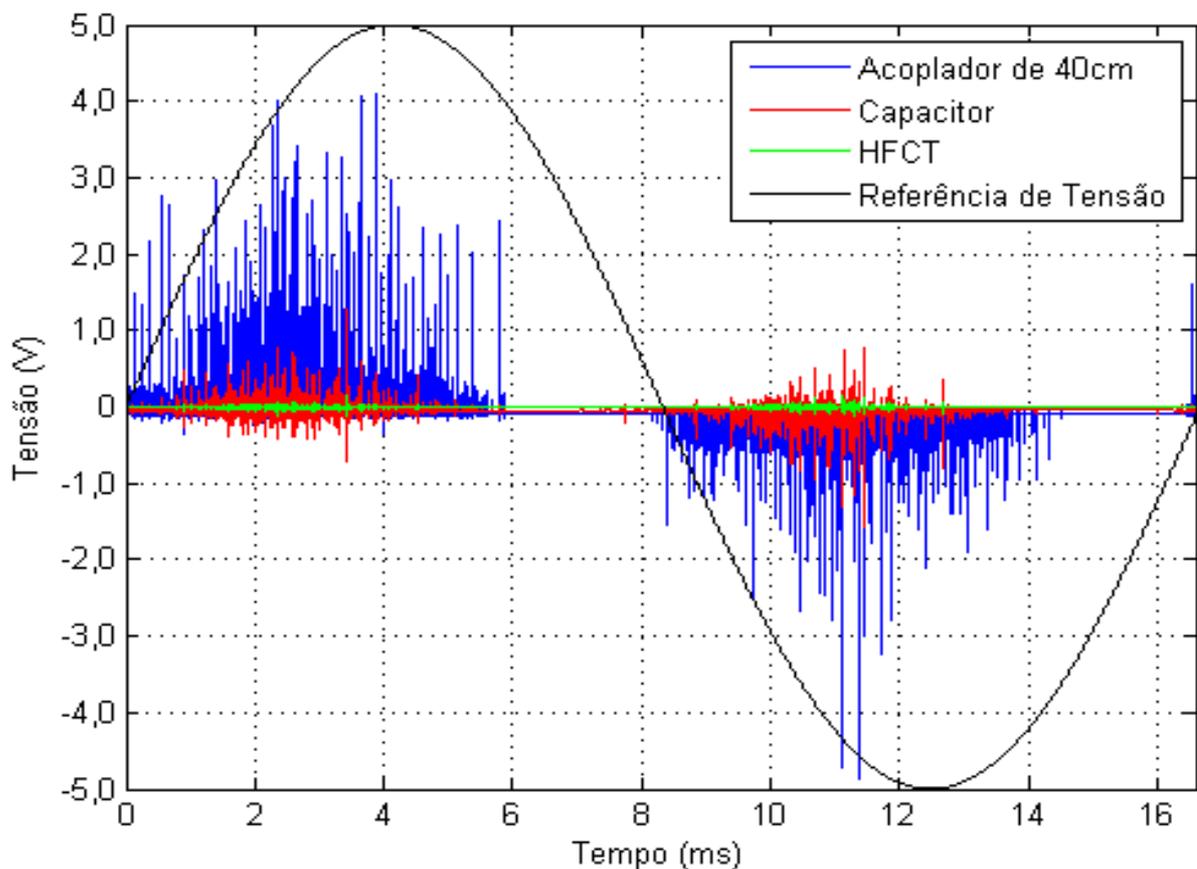


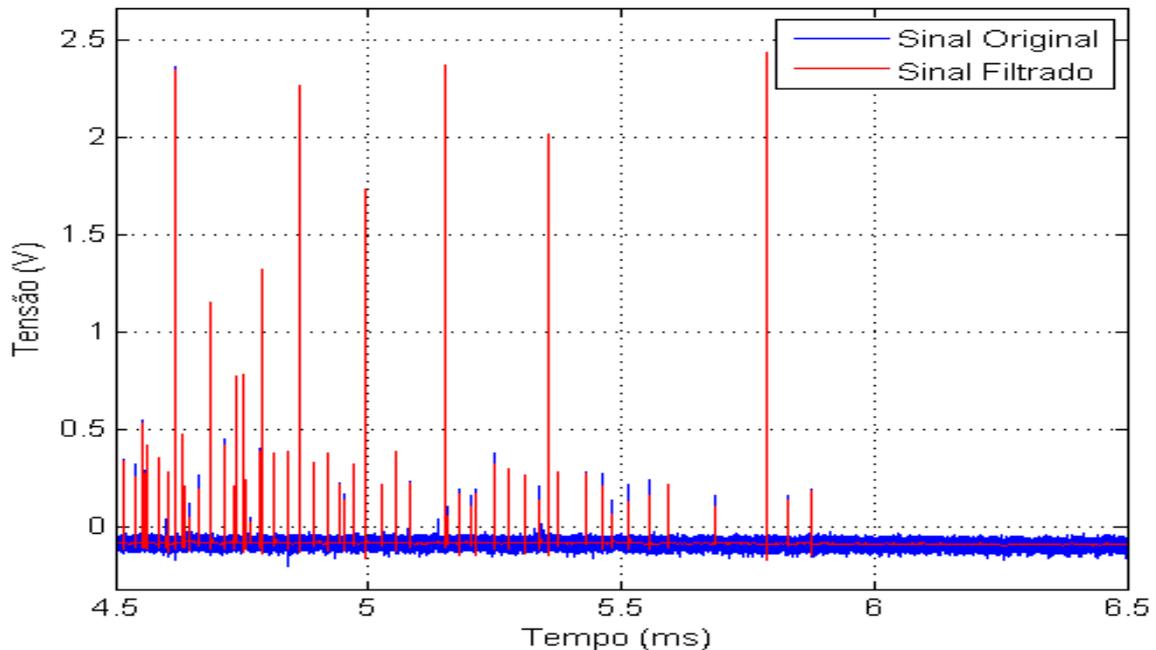
Figura 5.18 – Forma de onda de um pulso de descarga parcial obtido com o capacitor.**Figura 5.19** – Forma de onda de um pulso de descarga parcial obtido com o HFCT.

Na Figura 5.20 estão plotados os pulsos de descargas parciais obtidas com o acoplador direcional *microstrip* de 40 cm, capacitor de acoplamento e o HFCT, após ter sido realizada a filtragem *wavelet*. Os sinais foram captados simultaneamente em cada canal do osciloscópio. Visualmente, pode-se constatar a maior sensibilidade do acoplador direcional *microstrip* de 40 cm, com relação aos níveis de tensão dos pulsos de descargas parciais captados. Os níveis foram bem maiores que os captados pelo capacitor de acoplamento e o *HFCT*.

Figura 5.20 – Sinais de descargas parciais obtidos com os três sensores após a filtragem.



Nem sempre é possível identificar, de forma visual, o sensor que apresenta a maior quantidade de pulsos captados, conforme pode ser visto na ampliação da Figura 5.21, que contém os pulsos de descargas parciais contidos no intervalo de tempo entre 4,5 e 6,5 ms. Assim, na Tabela 5.2 são apresentados os resultados dos cálculos da relação sinal-ruído (RSR) e, o número de pulsos detectados pelos três sensores nos 60 ciclos senoidais adquiridos.

Figura 5.21 – Detalhamento dos pulsos obtidos com o acoplador *microstrip* de 40 cm.

O acoplador direcional *microstrip* de 40 cm obteve o segundo maior número de pulsos de descargas parciais detectados (24.903) e a menor relação sinal-ruído (8,88 dB), mas ainda assim é um valor satisfatório, cujo ruído branco foi facilmente eliminado por meio da filtragem *wavelet*. O *HFCT* obteve a maior relação sinal-ruído (17,01 dB) e o maior número de pulsos de descargas parciais detectados (27.635), mas com baixas intensidades. Enquanto que o capacitor foi o sensor com o menor número de pulsos captados (22.803) e com uma relação sinal-ruído (14,25 dB) próxima ao do *HFCT*. Justifica-se a menor sensibilidade do capacitor, devido à banda de frequência do impedor de medição utilizado, não se encontrar, especificamente, na faixa de frequências dos pulsos típicos das descargas parciais do enrolamento.

Tabela 5.2 – Análise de sensibilidade dos três sensores.

Sensor	RSN (dB)	Número de pulsos detectados
Capacitor de acoplamento	14,25	22803
<i>HFCT</i>	17,01	27635
Acoplador <i>microstrip</i> de 40 cm	8,88	24096

Nas Figuras 5.22, 5.23 e 5.24 são apresentados os gráficos *PRPD* obtidos pelos três tipos de sensores. Os pontos no gráfico *PRPD* são a indicação dos pulsos de descargas parciais (valores de pico) que foram identificados nos 60 ciclos senoidais adquiridos.

Na Figura 5.22 estão plotados os 24.906 pulsos de descargas parciais captados pelo acoplador *microstrip* de 40 cm. Os pulsos captados concentram-se na região entre os ângulos de 0° a 135°, 170° a 315° e 350° a 360°, com intensidades de até 9 V e - 7 V.

Na Figura 5.23 estão plotados os 22.803 pulsos de descargas parciais captados pelo acoplador *microstrip* de 30 cm. Os pulsos captados concentram-se na região entre os ângulos de 0° a 120° e 180° a 290°, com intensidades de até 3 V e -3 V.

Na Figura 5.24 estão plotados os 27.635 pulsos de descargas parciais captados pelo *HFCT*. Os pulsos captados concentram-se na região entre os ângulos de 0° a 130°, 190° a 300° e 340° a 360°, com intensidades de até 0,3 V e - 0,3 V.

Observa-se, nos gráficos *PRPD* dos três sensores, que os pulsos de descargas parciais concentram-se praticamente na mesma região de fase da senoide de referência. Sendo que os pulsos de maiores intensidade concentraram-se, predominantemente, em torno dos ângulos de 50° e 240°. Os pulsos de descargas parciais detectados pelo acoplador direcional *microstrip* de 40 cm possuem as maiores intensidades, confirmando-se assim, a sua maior sensibilidade.

Conforme a Tabela 2.3, que indica seis diferentes estados de degradação do isolamento de máquinas rotativas, constatou-se que a bobina utilizada nos ensaios encontra-se em avançado estado de degradação. Tendo em vista que os níveis de descargas parciais captados pelo capacitor de acoplamento foram superiores a 600 mV.

Figura 5.22 – Gráfico *PRPD* do acoplador direcional *microstrip* de 40 cm.

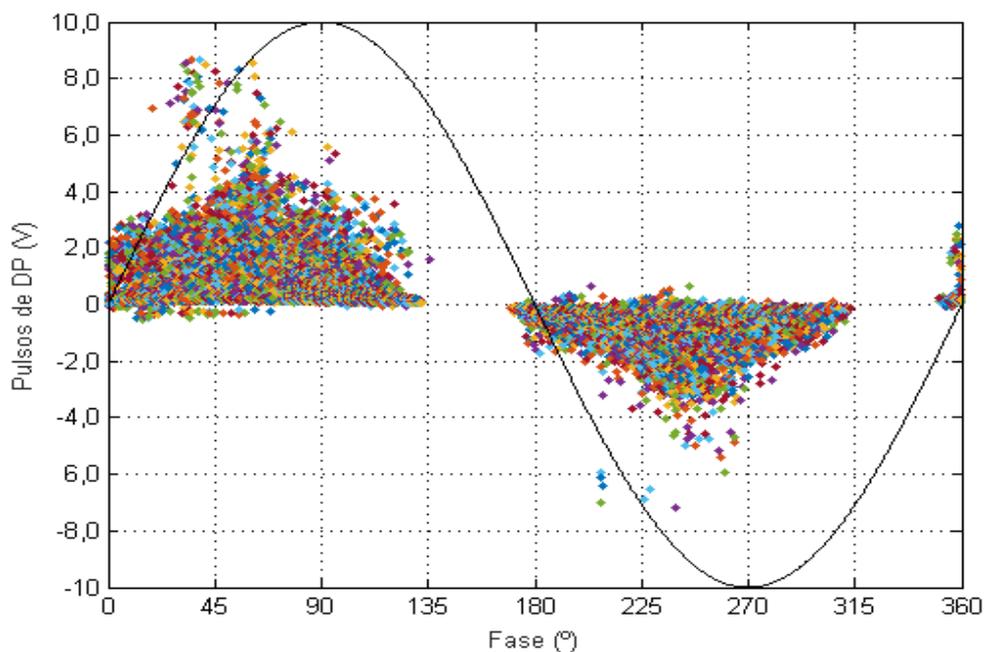
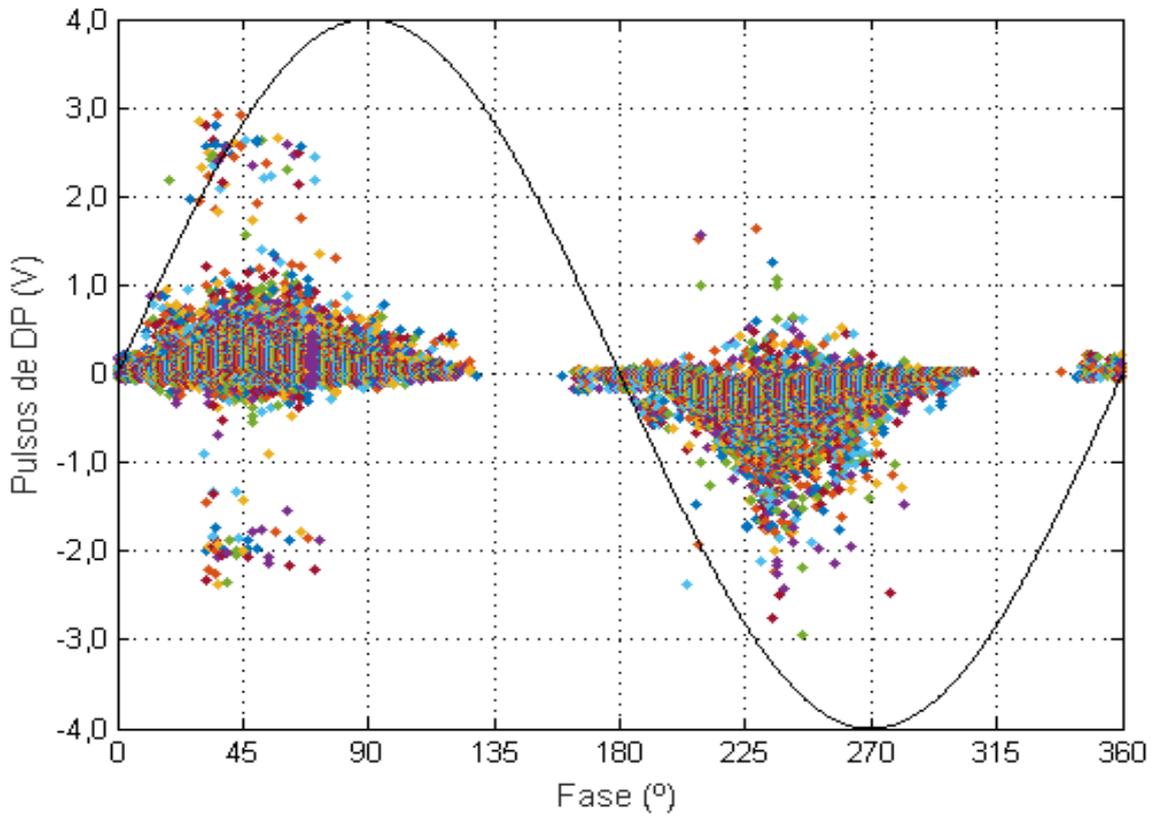
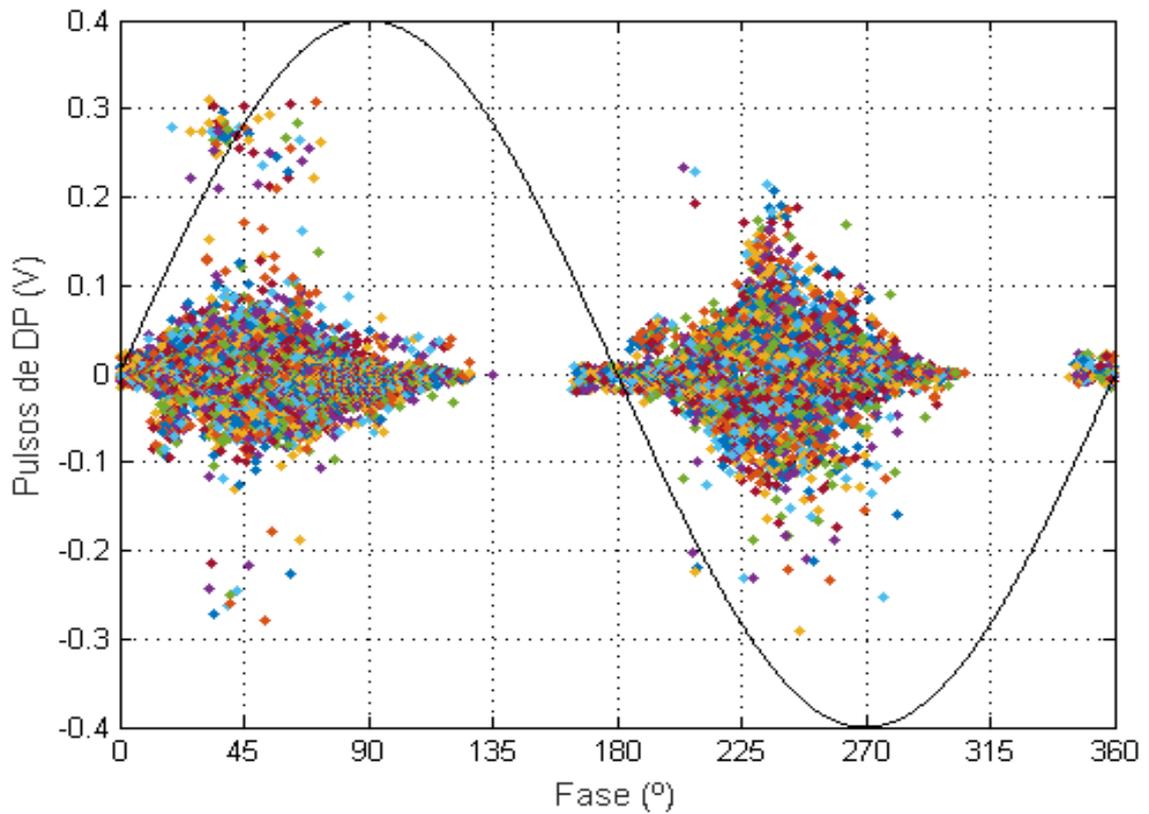


Figura 5.23 – Gráfico *PRPD* do capacitor de acoplamento de 1000 pF.**Figura 5.24** – Gráfico *PRPD* do HFCT.

Recorrendo a Tabela 2.2, na qual se apresentam alguns padrões de mapas estatísticos de descargas parciais em enrolamentos de hidrogeradores, pode-se observar que os três sensores avaliados obtiveram o mesmo padrão de descargas parciais, característicos de descargas de delaminação.

Pode-se observar nos gráficos *PRPD* do capacitor de acoplamento e, principalmente, do *HFCT*, que estes sensores captam alguns pulsos de descargas parciais com pico de tensão de polaridade positiva e outros de polaridade negativa. Isto ocorre tanto no semiciclo positivo como no semiciclo negativo.

Diferentemente, nos gráficos *PRPD* dos acopladores *microstrip*, somente pulsos com pico de tensão positiva são captados durante o semiciclo positivo e pulsos com pico de tensão negativo são captados durante o semiciclo negativo. Esse fato se deve a característica da resposta do sensor à detecção dos pulsos. Assim, possibilita-se a formação de padrões de mapa estatístico mais bem definidos para determinados tipos de falhas no isolamento. Visto que, para a elaboração dos mapas estatísticos, os *softwares* dos equipamentos de medição de descargas parciais utilizam apenas o valor do pico dos pulsos detectados.

Foram apresentados neste capítulo os resultados e análises das medições de descargas parciais, em uma bobina de hidrogerador, com três diferentes sensores. O próximo capítulo é dedicado às conclusões deste trabalho e às sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada a construção de quatro protótipos de acopladores direcionais *microstrip* e a avaliação de sua aplicabilidade, como sensor para medição de descargas parciais em uma bobina de hidrogerador. Constatou-se que o acoplador direcional *microstrip* de 40 cm foi o que apresentou a melhor sensibilidade entre os quatro acopladores *microstrip* testados.

Com isso, observou-se que o comprimento da linha de transmissão *microstrip* está diretamente relacionado com a sua sensibilidade, ou seja, quanto maior for o seu comprimento mais pulsos de descargas parciais conseguirá detectar, para os comprimentos dos acopladores *microstrip* utilizados. Porém, deve-se considerar que quanto maior for o comprimento do acoplador direcional *microstrip*, maior será a dificuldade de sua instalação na extremidade do enrolamento de hidrogerador.

Para validar as medições do acoplador direcional *microstrip* proposto, foram utilizados dois sensores de detecção de descargas parciais para comparação: um HFCT e um capacitor de acoplamento de 1000 pF. Verificou-se que o acoplador direcional *microstrip* proposto obteve uma relação sinal-ruído satisfatória, a segunda maior quantidade de pulsos detectados e a maior sensibilidade aos níveis de tensão dos pulsos de descargas parciais, dentre os três tipos de sensores utilizados. Esse fato decorreu da relação sinal-ruído calculada, da contagem dos números de pulsos de descargas parciais captados e da análise dos gráficos *PRPD*.

Conclui-se, portanto, que o acoplador direcional *microstrip* proposto, quando utilizado em uma amostra de bobina simples e em um ambiente controlado, consiste em uma solução viável, de baixo custo de fabricação e com uma ótima sensibilidade. No entanto, para validar a aplicação do sensor proposto, ainda é necessário um estudo mais aprofundado, considerando todas as implicações decorrentes de sua instalação em um hidrogerador real, bem como o ambiente em que estará inserido.

6.1 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Realizar estudos relativos à otimização geométrica dos acopladores *microstrip* (empregando teoria de antenas de telecomunicações), projetar um filtro analógico passa-altas mais robusto, aperfeiçoar o design geométrico dos sensores, removendo arestas de conectores e outro locais.
- Obter mais amostras de enrolamentos de hidrogeradores, com diversos graus de degradação, inclusive novas, e realizar novos ensaios. O que possibilitaria uma melhor validação da sensibilidade do acoplador direcional *microstrip* proposto. Visto que, nesta pesquisa, disponibilizou-se de apenas um único enrolamento para os ensaios.
- Realizar novos testes com os acopladores direcionais *microstrip*, quando o medidor de descargas parciais do Laboratório de Alta Tensão voltar a estar disponível, para avaliar a detecção dos níveis de descargas parciais com relação à carga aparente (pC), dentre outras informações que o *software* do equipamento fornece.
- Disponibilizar um maior número de enrolamentos de hidrogeradores, obter com o acoplador direcional *microstrip*, os mapas estatísticos dos mais variados tipos de falhas em enrolamentos de hidrogerador. Após o levantamento dos padrões, desenvolver um sistema inteligente que classifique os tipos de falhas através de padrões já conhecidos.
- Relacionar os valores obtidos com o capacitor de acoplamento em carga aparente (pC) e a tensão (V) captada com o acoplador *microstrip*.
- Avaliar a aplicabilidade do acoplador direcional *microstrip* em campo, mas para isso, é necessário realizar um estudo mais aprofundado, considerando todas as implicações decorrentes da instalação do sensor em um hidrogerador real, bem como o ambiente em que estará inserido.
- Analisar a aplicabilidade do acoplador direcional *microstrip* em outras áreas de pesquisas, que também envolvam a detecção de sinais de ondas eletromagnéticas de alta frequência.

REFERÊNCIAS

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 Cigrè, Comité de Estudos A1 – Máquinas Elétricas Rotativas, Puerto Iguazú, Argentina, 2009.

ANALOG DEVICE “**Tutorial Microstrip and Stripline Design**”, <http://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-094.pdf> , 2009.

BARTNIKAS, R.; McMAHON, E. J. “**Engineering Dielectrics: Corona Measurement and Interpretation**”, ASTM STP669, v. 1, Philadelphia, 1979.

BLOOD W. R. J. “**MECL System Design Handbook**”, (HB205/D, Rev. 1A May 1988), ON Semiconductor, August, 2000.

BOGATIN E., “**BTS015 PCB Impedance Design: Beyond the IPC Recommendations**”, 1999.

BRASIL F. S., VILHENA P. R. M., DMITRIEV V., “**Estudo de Técnicas de Medição de Descargas Parciais nos Enrolamentos Estatóricos de Hidrogeradores**”, Anais do V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu – PR, Brasil, 2014.

BURKHARDT A., GREGG C., STANIFORTH A., “**Calculation of PCB Track Impedance**” Technical Paper S-19-5, presented at the IPC Printed Circuits Expo '99 Conference, March 14–18, 1999.

BURRUS, C.S., GOPINATH, R.A. e GUO, H., “**Introduction to Wavelets and Wavelet transforms**”, Prentice Hall, Texas, United States, 1998.

CEPEL, “**Avaliação Dielétrica de Equipamentos de Alta Tensão com base nas Descargas Parciais - Medição em Máquinas Rotativas**”, setembro de 2012.

CIGRÈ - INTERNATIONAL COUNCIL ON LARGE ELECTRIC SYSTEMS, “**CIGRÈ 366 Guide for Partial Discharges Measurements in Compliance to IEC 60270**”, Working Group D1.33, 2008.

COSTA, E. G.; NEVES, W. L. A. **“Guia de Experimento: Descargas Parciais”**, Universidade Federal de Campina Grande, Dezembro, 1996.

CUENCA, W. M. H. **“Caracterização dos sinais de descargas parciais em equipamentos de alta tensão a partir de modelos experimentais”**, Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2005.

FOROUZAN, B. A. **“Comunicação de Dados e Redes de Computadores”**, 4ª edição, McGraw Hill Editora, 2009.

FRENZEL, L. E. J. **“Fundamentos de Comunicação Eletrônica: linha, micro-ondas e antenas”**, 3ª edição, McGraw Hill Editora Ltda., 2013.

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.

GUOMIN L., DAMING Z. **“Study on performance of HFCT and UHF sensors in partial discharge detection”**, International Power & Energy Conference (IPEC), p. 630 – 635, 27-29 Oct 2010.

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, pp. 201-205, 1996

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.

<http://www.hvpc.co.uk/testing-and-monitoring-tools/sensors/high-frequency-current-transformer-hfct/> Acesso em: 01/12/2014.

INTERNACIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION, **“IEC 60270 High Voltage Test Techniques – Partial Discharges Measurements”**, Switzerland, 2000.

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

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**”, Switzerland, 2012.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS, “**IEEE 1799 Recommended Practice for Quality Control Testing of External Discharges on Stator Coils, Bars and Windings**”, USA, 2012.

IRIS POWER ENGINEERING, “**Partial Discharge Seminar**”, – Volume 1, version 4.2, Toronto, Canada, 2004.

KAWAKATSU, W. M. “**Descargas parciais em barras estatóricas de hidrogeradores: modelagem por guia de onda e análise de um acoplador**”, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, PA, 2009.

KEISER. G. “**Optical Fiber Communications**”, 3ª edição, McGraw Hill Editora, 2000.

MA, X., CHENGKE Zhou, and KEMP I. J. “**Automated wavelet selection and thresholding for PD detection**”, IEEE Electrical Insulation Magazine, pp. 37-45, 2002.

MACEDO, E. C. T. “**Metodologia Para a Classificação de Descargas Parciais Utilizando Redes Neurais Artificiais**”, Tese de doutorado - Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

MORSHUIS, P. H. F. “**Partial Discharge Mechanism**”, PhD Thesis in Electrical Engineering, Delft University, Netherlands, 1993.

NATTRASS, David A. “**Partial Discharge Measurement and Interpretation**”. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 3, n. 4, p. 10-23, 1988.

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.

RAJA K., DEVAUX F., LELAIDIER S. “**Recognition of Discharges sources Using UHF PD Signatures**”, IEEE Elec. Insul. Magazine, vol. 18, No.5, pp. 8–14, Sep/Oct. 2002.

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,

SEDDING, H. G.; CAMPBELL S. R.; STONE, G. C.,; KLEMPNER, G.S., “**A New Sensor For Detecting Partial Discharges In Operating Turbine Generators**”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No.4, December 1991.

Standard IPC-2141A, “**Controlled Impedance Circuit Boards and High Speed Logic Design**” Institute for Interconnection and Packaging Electronic Circuits, Bannockburn, Scotland, 2004.

STONE, GREG C, SEDDING, HOWARD G. and COSTELLO, MICHAEL J. “**Application of Partial Discharge Testing to Motor and Generator Stator Winding Maintenance**”, IEEE, Vol. 32, N°. 2. March/April 1996, pp. 459-464.

STONE, G.C., SASIC, M., DUNN, D., CULBERT, I., “**Recent Problems Experienced With Motor and Generation Windings**”, IEEE, 2009.

TASWELL, C. e MCGILL, K.C., “**Algorithm 735: Wavelet Transform Algorithms for Finite-Duration Discrete-Time Signals**”, Transactions on Mathematical Software, Vol. 20, No. 3, pp. 398 – 412, 1994.

TAVNER, P.J., JACKSON, R.J., “**Coupling of Discharges Current Between Conductor of Electrical Machines**”, IEEE Electric Power Application, vol.135, No 6, 1988.

TAYLOR, N., “**Dielectric Response and Partial Discharge Measurements on Stator Insulation at Varied Low Frequency**”, PhD Thesis, School of Electrical Engineering, Sweden, 2010.

TRINTINALIA L. C., “**Medidas em Varredora de Frequência, Departamento de Telecomunicações e Controle**”, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2013

WOOD, J. W., SEDDING, H. D., HOGG, W. H., KEMP, I. J., ZHU, H., “**Partial Discharges in HV Machines: Initial Consideration for PD Specification**”, IEEE Proceeding a Science, Measurement and Technology, vol. 140, No 5, 1993, pp. 409-416.