

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

Dissertação de Mestrado

*Parametrização de HFCT para Medição de Descargas Parciais
em Para-raios de ZnO*

Luiz Augusto Medeiros Martins Nobrega

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Fevereiro de 2016

Luiz Augusto Medeiros Martins Nobrega

*Parametrização de HFCT para Medição de Descargas Parciais
em Para-raios de ZnO*

*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.*

Edson Guedes da Costa, D. Sc.
Orientador

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Fevereiro de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA PREPARADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG.

N754p Nobrega, Luiz Augusto Medeiros Martins.

Parametrização de HFCT para medição de descargas parciais em para-raios de ZnO / Luiz Augusto Medeiros Martins Nobrega. - Campina Grande, 2016.

95 f. : il., color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2016.

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

Referências.

1. Para-raios - Óxido de Zinco. 2; Descargas Parciais. 3. Diagnóstico.
4. Monitoramento. 5. Parametrização. I. Costa, Edson Guedes da. II. Título.

CDU 621.316.938 (043)

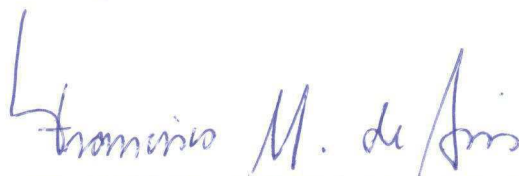
**"PARAMETRIZAÇÃO DE HFCT PARA MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM
PARA-RAIOS ZNO"**

LUIZ AUGUSTO MEDEIROS MARTINS NOBREGA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/02/2016



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



FRANCISCO MARCOS DE ASSIS, Dr., UFCG
Examinador(a)



GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)



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

CAMPINA GRANDE - PB

Ao único e sábio Deus seja dada Glória, por intermédio de Jesus Cristo, para todo o sempre.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido todos os meios necessários para a conclusão deste trabalho. Reconheço que dEle derivou toda a minha motivação para a vida; meu consolo e esperança na dificuldade; o propósito que faz minha vida mais bela e digna de ser vivida; e a ética para o trabalho, que me guia e me admoesta a corrigir os defeitos que ainda permanecem.

Agradeço a minha família, sobretudo a minha mãe. Ela sempre, e muito acima da necessidade, se dedicou com esmero na minha formação. Prometo que a honrarei como filho.

Agradeço a minha noiva, Gabriella Eloy, que tem estado ao meu lado. Ela tem sido uma verdadeira auxiliadora, estando sempre presente quando mais ninguém pode estar. Louvo a Deus por sua vida e oro para que ela cresça em piedade.

Agradeço aos meus amigos, que tornaram minha vida mais bela e alegre de se viver. A eles devo inúmeros conselhos, ensinamentos e orientações. Agradeço especialmente a Tarciso Oliveira, Jamile Nascimento, Helyângela Gonçalves, Raynara Karenina, Carlos Antônio, e muitos outros, por orarem por mim quando necessitei que Deus abrisse portas que viabilizassem minha vida profissional e acadêmica.

Agradeço a Gabriel Vidal, Valdemir Brito e Raphael Borges pela amizade, ao longo de tantos anos de vida acadêmica. Juntos temos caminhado e construído um futuro acadêmico de sucesso.

Agradeço a Margareth Mee, Patrese Veras e Alfredo Neto, por me ajudarem com as medições deste mestrado. Sem eles eu não poderia ter concluído minhas pesquisas em tempo hábil.

Por fim, mas não por serem menos importantes, agradeço aos professores do departamento de engenharia elétrica da UFCG. Destaco os professores George Rossany, Tarso Vilela e Edson Guedes, que nunca me negaram transmitir conhecimento. A eles deixo as minhas palavras de que me esforçarei para que o conhecimento adquirido seja útil no progresso da engenharia em nosso país.

Luiz Augusto Medeiros Martins Nobrega.

Não há um único centímetro quadrado, em todos os domínios de nossa existência, sobre os quais Cristo, que é soberano sobre tudo, não clame: É meu!

(Abraham Kuyper)

Resumo

Neste trabalho é realizada uma parametrização de Transformadores de Corrente de Alta Frequência (HFCT) para medição de descargas parciais em para-raios de ZnO. Para tanto, foram realizadas medições de descargas parciais em para-raios ZnO, com o arranjo proposto pela IEC 60270 (2000), simultaneamente com dois HFCT. A avaliação da medição foi feita verificando padrões representados em função da fase da tensão aplicada, método conhecido por PRPD. A aquisição dos dados foi realizada com um osciloscópio digital de quatro canais e o processamento dos dados no Matlab©. A partir das medições realizadas, procedeu-se um estudo da Densidade Espectral de Potência dos sinais e a filtragem dos dados utilizando a estratégia de Limiarização de Coeficientes Wavelets. Por fim, foram propostas curvas de correlação entre os resultados das saídas dos HFCT (em milivolts) para níveis de carga aparente (em pC). A partir dos dados fornecidos nesta dissertação, a medição em milivolts pode ser correlacionada com valores definidos em norma para correto diagnóstico do estado de isolamento do equipamento.

Palavras-chaves: Descargas Parciais; Diagnóstico; Monitoramento; Para-raios de Óxido de Zinco; Parametrização.

Abstract

In this research, a parameterization of a High Frequency Current Transformer (HFCT) for measuring partial discharges in Metal Oxide Surge Arrester (MOSA) was performed. In order to achieve this, measurements of partial discharges in MOSA were made, with the arrangement proposed by the IEC 60270 (2000) simultaneously with two HFCT devices. The measurement evaluation was performed using the Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) method. The data acquisition was performed with a digital oscilloscope with four channels, being further processed using Matlab©. From the measurements, a study of the power spectral density of the signals was conducted, followed by a filtering of the data using the Wavelet Shrinkage technique. Finally, correlation curves were proposed to transform the HFCT outputs (in millivolts) to the apparent charge levels (in pC). From the results achieved by the present study, measurements in millivolt can be correlated with values defined in Electrical Engineering standards for correct diagnosis of isolation state in the equipment.

Keywords: Partial Discharges; Diagnosis; Monitoring; Metal Oxide Surge Arrester; Parameter Identification.

Lista de Figuras

2.1	Fenômenos associados à ocorrência de descargas parciais.	7
2.2	Arranjo de medição apresentado na IEC 60270 (2000).	8
2.3	Influência do capacitor de acoplamento C_a sobre a relação q_m/q	9
2.4	Arranjo de medição utilizando HFCT.	11
2.5	Exemplo de medição de descargas parciais utilizando o método PRPD. A forma de onda senoidal é a representação da tensão aplicada. Os pontos representam os pulsos de descargas parciais identificados.	12
3.1	Estrutura de uma decomposição wavelet.	21
3.2	Estrutura de uma decomposição wavelet em 3 estágios.	21
3.3	Funções de limiarização para $\lambda = 0,25$	22
4.1	Descargas parciais entre a coluna de varistores e a porcelana.	32
4.2	Colar isolante de varistores degradados devido à ação de descargas parciais. . .	32
5.1	Fluxograma geral da metodologia proposta.	38
5.2	Fotografia dos para-raios utilizados. Da esquerda para a direita: PR_A , PR_B e PR_C . .	40
5.3	Fotografias de varistor antes e depois de tratamento.	41
5.4	Fotografias do PR_C poluído com as soluções salinas.	42
5.5	Fotografias do PR_C umedecido.	43
5.6	Impedor de medição LDM-5 utilizada.	44
5.7	Fotografia dos HFCT utilizados.	45
5.8	Arranjo de medição utilizado.	45
5.9	Fotografia do arranjo de medição utilizado.	46
6.1	Medição de descargas parciais no PR_A limpo. Os sinais em azul correspondem as medições com o impedor de medição; os sinais em vermelho correspondem as medições com o HFCT 140-100HC; e os sinais em verde correspondem as medições com o HFCT 200/150.	51

6.2	Medição de descargas parciais no PR_B limpo. Os sinais em azul correspondem as medições com o impedor de medição; os sinais em vermelho correspondem as medições com o HFCT 140-100HC; e os sinais em verde correspondem as medições com o HFCT 200/150.	52
6.3	Medição de descargas parciais no PR_C limpo. Os sinais em azul correspondem as medições com o impedor de medição; os sinais em vermelho correspondem as medições com o HFCT 140-100HC; e os sinais em verde correspondem as medições com o HFCT 200/150.	52
6.4	Medição de descargas parciais no PR_C poluído com caulin. Os sinais em azul correspondem as medições com o impedor de medição; os sinais em vermelho correspondem as medições com o HFCT 140-100HC; e os sinais em verde correspondem as medições com o HFCT 200/150.	53
6.5	Medição de descargas parciais no PR_C poluído com bentonita. Os sinais em azul correspondem as medições com o impedor de medição; os sinais em vermelho correspondem as medições com o HFCT 140-100HC; e os sinais em verde correspondem as medições com o HFCT 200/150.	53
6.6	Densidade espectral de potência do impedor de medição do arranjo convencional.	54
6.7	Densidade espectral de potência do HFCT 140-100HC.	55
6.8	Densidade espectral de potência do HFCT 200/150.	55
6.9	Densidade espectral de energia para o impedor de medição do arranjo convencional.	57
6.10	Densidade espectral de energia do HFCT 140-100HC.	57
6.11	Densidade espectral de energia do HFCT 200/150.	58
6.12	Coefficientes wavelets e limiares de ruído calculados para o impedor de medição do arranjo convencional.	61
6.13	Coefficientes wavelets e limiares de ruído calculados para o HFCT 140-100HC.	62
6.14	Coefficientes wavelets e limiares de ruído calculados para o HFCT 200/150. . .	63
6.15	Resultado do processo de filtragem para o impedor de medição do arranjo convencional.	64
6.16	Resultado do processo de filtragem para o HFCT 140-100HC.	65
6.17	Resultado do processo de filtragem para o HFCT 200/150.	65
6.18	Gráficos PRPD para a medição de descargas parciais realizada no PR_A . A forma de onda senoidal é a representação da tensão aplicada. Os pontos representam os pulsos de descargas parciais identificados.	67

6.18 Gráficos PRPD para a medição de descargas parciais realizada no PR_B . A forma de onda senoidal é a representação da tensão aplicada. Os pontos representam os pulsos de descargas parciais identificados.	69
6.18 Gráficos PRPD para a medição de descargas parciais realizada no PR_C limpo. A forma de onda senoidal é a representação da tensão aplicada. Os pontos representam os pulsos de descargas parciais identificados.	71
6.18 Gráficos PRPD para a medição de descargas parciais realizada no PR_C poluído com solução à base de caulim. A forma de onda senoidal é a representação da tensão aplicada. Os pontos representam os pulsos de descargas parciais identificados.	73
6.18 Gráficos PRPD para a medição de descargas parciais realizada no PR_C poluído com solução à base de bentonita. A forma de onda senoidal é a representação da tensão aplicada. Os pontos representam os pulsos de descargas parciais identificados.	75
6.18 Gráficos PRPD para a medição de descargas parciais realizada no PR_C com umidade interna. A forma de onda senoidal é a representação da tensão aplicada. Os pontos representam os pulsos de descargas parciais identificados.	77
6.18 Pares ordenados identificados para o HFCT 140-100HC.	79
6.19 Pares ordenados identificados para o HFCT 200/150.	79
6.20 Região sem descargas parciais para o HFCT 140-100HC.	81
6.21 Região sem descargas parciais para o HFCT 200/150.	81
6.22 Parametrização final do HFCT 140-100HC.	83
6.23 Parametrização final do HFCT 200/150.	84

Lista de Tabelas

4.1	Comparativo das contribuições de diversos autores.	36
5.1	Dados técnicos do para-raios utilizados.	39
5.2	Banco de filtros utilizados para a seleção da melhor wavelet mãe.	48
6.1	Medições realizadas em cada para-raios.	50
6.2	Taxas de amostragem mínimas para medição de descargas parciais, utilizando os HFCT e o impedor de medição.	56
6.3	Frequências f_{min} e níveis de decomposição J_{min} calculados para cada sensor. . .	58
6.4	Wavelet mãe selecionada e níveis de decomposição calculados.	59
6.5	Valores obtidos na parametrização dos HFCT.	84
6.6	Coefficientes de determinação obtidos na parametrização dos HFCT.	84

Lista de Abreviaturas

CBWS	Correlation Based Wavelet Selection (<i>Seleção da Wavelet Baseada na Correlação</i>)
DEE	Densidade Espectral de Energia
DEP	Densidade Espectral de Potência
DNN	Algoritmo para a Determinação do Número de Níveis
EBWS	Energy Based Wavelet Selection (<i>Seleção da Wavelet Baseada na Energia</i>)
ESDD	Densidade Equivalente de Depósito de Sal (<i>Equivalent salt deposit density</i>)
FWT	Fast Wavelet Transform (<i>Transformada Wavelet Rápida</i>)
HFCT	High Frequency Current Transformer (<i>Transformador de Corrente de Alta Frequência</i>)
HVPD	High Voltage Partial Discharge
LAT	Laboratório de Alta Tensão
LCW	Limiarização de Coeficientes Wavelets
NewEBWS	New Energy Based Wavelet Selection (<i>Novo Método de Seleção da Wavelet Baseada na Energia</i>)
ONS	Operador Nacional do Sistema
PRPD	Phase Resolved Partial Discharge (<i>Descargas Parciais Discriminadas por Fase</i>)
SNRBWS	Signal to Noise Rate Based Wavelet Selection (<i>Seleção da Wavelet Baseada na Relação Sinal Ruído</i>)
SWT	Steady Wavelet Transform (<i>Transformada Wavelet Estacionária</i>)
SWTBWS	Stationary Wavelet Transform Based Wavelet Selection (<i>Seleção da Wavelet Baseada na Transformada Wavelet Estacionária</i>)
TW	Transformada Wavelet

TWC	Transformada Wavelet Contínua
TWD	Transformada Wavelet Discreta
TWI	Transformada Wavelet Inversa
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização do Trabalho	3
2	Descargas Parciais	5
2.1	O Fenômeno e Efeito das Descargas Parciais	5
2.2	Métodos de Medição de Descargas Parciais	6
2.2.1	Método Elétrico Definido na IEC 60270	8
2.2.2	Método Elétrico Utilizando HFCT	11
2.3	Sistema de Aquisição de Descargas Parciais	11
2.3.1	Método de Aquisição PRPD	12
2.3.2	Instrumento para a Aquisição dos Dados	13
2.3.3	Filtragem de Sinais de Descargas Parciais	14
2.3.4	Algoritmo de Detecção do Pulsos	16
3	Redução de Ruído no Domínio da Transformada Wavelet	18
3.1	Transformada Wavelet	18
3.1.1	Transformada Wavelet Contínua	19
3.1.2	Transformada Wavelet Discreta	19
3.2	Análise Multirresolução	20
3.3	Limiarização e Filtragem de Sinais	22
3.4	Variáveis no Processo de Limiarização	23
3.4.1	Escolha da Função Wavelet Mãe	23
3.4.2	Determinação do Número de Níveis de Decomposição	26

3.4.3	Determinação dos Limiares de Ruído	27
4	Revisão Bibliográfica	30
4.1	Efeito e Medição das Descargas Parciais em Para-raios de ZnO	30
4.2	Resumo das Contribuições dos Trabalhos Pesquisados	36
5	Metodologia	38
5.1	Visão Geral	38
5.2	Para-raios de ZnO Avaliados	39
5.3	Medição de Descargas Parciais	43
5.3.1	Método Clássico Baseado na IEC 60270	43
5.3.2	HFCT Utilizados	44
5.3.3	Arranjo Experimental	45
5.3.4	Instrumento de Medição	46
5.4	Avaliação da Taxa de Amostragem para Aquisição de Descargas Parciais	46
5.5	Procedimento de Filtragem dos Sinais de Descargas Parciais	47
5.6	Detecção dos Pulsos de Descarga Parcial	48
5.7	Parametrização dos HFCT	48
6	Resultados e Análises	50
6.1	Medição dos Sinais de Descargas Parciais	50
6.2	Densidade Espectral de Potência e Taxa de Amostragem do Sinal	54
6.3	Filtragem dos Sinais	56
6.3.1	Número de Níveis de Decomposição	56
6.3.2	Escolha da Wavelet Mãe	59
6.3.3	Limiarização dos Coeficientes Wavelet	59
6.3.4	Resultado da Filtragem	64
6.4	Gráficos PRPD	66
6.4.1	Medição no PR_A	66
6.4.2	Medição no PR_B	68
6.4.3	Medição no PR_C Limpo	70
6.4.4	Medição no PR_C com Poluição à Base de Caulin	72

6.4.5	Medição no PR_C com Poluição à Base de Bentonita	74
6.4.6	Medição no PR_C com Umidade Interna	76
6.5	Parametrização dos HFCT	78
7	Conclusões	87
	Referências Bibliográficas	91

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Os para-raios de óxido de zinco (ZnO) são dispositivos essenciais na proteção de equipamentos do sistema elétricos de potência, principalmente contra sobretensões atmosféricas e de manobra. A função do para-raios é limitar as sobretensões citadas, de tal modo que possam ser suportados pelos isolamentos elétricos dos equipamentos que ele está a proteger. Os para-raios de óxido zinco são constituídos basicamente por um conjunto de pastilhas a base de ZnO (varistores). As suas principais características são a não-linearidade em relação à curva tensão-corrente (V-I), uma alta capacidade de absorção de energia e uma forte dependência com a temperatura (COSTA, 1999).

Eventuais falhas nos para-raios podem conduzir a desligamentos não programados, danos a outros equipamentos de uma subestação e risco de morte aos profissionais que estejam trabalhando na subestação no momento da ocorrência da falha. Os estudos de para-raios se dão, principalmente, em três aspectos diferentes:

- Desenvolvimento de modelos para estudo, garantindo um melhor resultado de simulações computacionais e um correto dimensionamento do equipamento;
- Desenvolvimento de varistores mais eficientes, buscando desenvolver pastilhas de óxido de zinco com estrutura interna mais uniforme, maior capacidade de dissipação de energia, melhor característica não-linear e maior durabilidade;
- Técnicas de monitoramento para equipamentos em uso, permitindo avaliar o desempenho dos equipamentos em campo.

Esta pesquisa dá-se no contexto de monitoramento do equipamento em campo. Dentre as técnicas mais usadas de monitoramento de para-raios, pode-se citar: desconectores, contadores de descargas, medição de temperatura, medição de corrente de fuga e medição de descargas parciais (IEC 60099-4, 2014). O trabalho dedica-se à medição de descargas parciais, considerada uma solução consolidada para o diagnóstico e detecção prévia de possíveis defeitos nos isolamentos, que são partes constituintes de equipamentos de alta tensão (MONTANARI; CAVALLINI, 2013).

As normas internacionais específicas sobre descargas parciais, tais como a IEC 60270 (2000), permitem o estabelecimento de procedimentos experimentais bem definidos, com explicações de como devem ser realizadas medições de descargas parciais em equipamentos de alta tensão. Por outro lado, o método padrão da IEC 60270 (2000) necessita da utilização de capacitores de acoplamento ligados em paralelo com o equipamento a ser medido, o que torna mais complexa a utilização do método em campo. A limitação deve-se aos altos níveis de tensão do sistema elétricos de potência e limitações físicas (tais como peso, tamanho, espaço disponível e dificuldades de instalação). Por isso, uma alternativa para medição de descargas parciais em para-raios em operação, de modo não invasivo, é a utilização de Transformadores de Corrente de Alta Frequência - do inglês *High Frequency Current Transformer* (HFCT).

O HFCT retorna na saída de seus terminais valores em milivolts e não em carga aparente (em pC), conforme definido pela IEC 60270 (2000). Portanto, ainda é necessário pesquisas que visem parametrizar a saída de tensão de HFCT. Assim, será possível, a partir do sinal obtido, avaliar o estado do isolamento de equipamentos elétricos com base em parâmetros definidos por norma. A parametrização deve ser feita para diferentes tipos de objetos de teste, uma vez que a relação entre a tensão medida e a carga aparente depende fortemente da capacitância do equipamento medido (IEC 60270, 2000). Por isso parametrizações realizadas para outros equipamentos não se aplicam a para-raios de ZnO. Como será mostrado no Capítulo 4, algumas pesquisas destinam-se à medição de descargas parciais em para-raios em campo, mas, até onde se pôde pesquisar, todas em valores de tensão. Portanto, o estado da arte ainda carece de trabalhos que se destinam a parametrizar a saída HFCT para para-raios de ZnO.

Pelo exposto, torna-se evidente a necessidade de se desenvolver métodos de monitoramento e diagnóstico de para-raios baseados em medições de descargas parciais com HFCT.

Tais métodos devem ser aplicados com maior facilidade e apresentar resultados confiáveis e precisos, os quais realmente auxiliem as equipes de manutenção das concessionárias de energia em suas atividades de manutenção preditiva e preventiva.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é realizar uma parametrização de Transformadores de Corrente de Alta Frequência (HFCT), para a medição de descargas parciais em para-raios de ZnO, em campo. A partir do resultado obtido, pretende-se utilizar HFCT para avaliar o estado do isolamento de para-raios, com base em parâmetros definidos por normas de descargas parciais. Assim, a utilização de HFCT poderá complementar outras técnicas de diagnóstico. São objetivos específicos desta dissertação:

- Desenvolver um sistema de medição de descargas parciais aplicando o método de padrões representados em função da tensão aplicada, também conhecido por PRPD (*Phase Resolved Partial Discharge*), utilizando um osciloscópio digital como equipamento de aquisição de dados;
- Avaliar a utilização da Transformada Wavelet como ferramenta de filtragem digital de sinais de descargas parciais em sistemas de medição em banda larga;
- Avaliar a taxa de amostragem necessária em sistema de aquisição de dados (tais como osciloscópios) para medição de descargas parciais em banda larga;
- Demonstrar a viabilidade de se realizar o monitoramento de para-raios de ZnO, por meio da medição de descargas parciais utilizando HFCT.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos. Ele inicia com uma fundamentação teórica sobre descargas parciais e os métodos de medição elétrica utilizados ([Capítulo 2](#)). Em seguida, apresenta-se a Transformada Wavelet e o seu uso na filtragem de sinais de descargas parciais ([Capítulo 3](#)). No capítulo seguinte, é apresentada uma revisão bibliográfica acerca da medição de descargas parciais em para-raios de ZnO ([Capítulo 4](#)). Posteriormente, é apresentada a

metodologia utilizada para o cumprimento dos objetivos desta pesquisa ([Capítulo 5](#)). Por fim, são apresentados e discutidos os resultados ([Capítulo 6](#)), as conclusões e propostas de trabalhos ([Capítulo 7](#)).

Capítulo 2

Descargas Parciais

Com o intuito de melhor compreender o fenômeno, a medição e o efeito das descargas parciais em equipamentos elétricos, este capítulo apresenta uma fundamentação teórica com os conceitos necessários à compreensão do tema. Inicialmente são apresentados os conceitos fundamentais sobre o fenômeno e efeito das descargas parciais. Posteriormente são apresentados os métodos de medição, com destaque aos elétricos mais utilizados. Por fim, são apresentados conceitos fundamentais em sistemas de aquisição de dados para medição de descargas parciais. Destaca-se o método de medição PRPD, o instrumento de aquisição de dados, a filtragem dos sinais e o algoritmo para detecção dos pulsos.

2.1 O Fenômeno e Efeito das Descargas Parciais

As descargas parciais, conforme definido pela [IEC 60270 \(2000\)](#), são descargas elétricas localizadas que curto-circuitam parcialmente a isolação entre eletrodos. Um pulso de descarga parcial, por conseguinte, é definido como um pulso de tensão ou corrente resultante de uma descarga parcial que ocorreu em um determinado isolamento sob estresse elétrico.

A ocorrência de descargas parciais dá-se quando, pelo menos, duas condições são satisfeitas: (1) a presença de um campo elétrico intenso entre dielétricos, sendo um deles gasoso e (2) a disponibilidade mínima de elétrons para iniciação do processo de descarga por efeito avalanche. A primeira condição apresenta a descarga parcial como um efeito dependente da aplicação de tensão no equipamento. A segunda condição indica que os sinais de descargas parciais são estocásticos por natureza, pois a disponibilidade de elétrons é um evento probabilístico que apresenta variação temporal. Neste sentido, a medição deve ser realizada considerando a

variação com a tensão aplicada (ou o campo elétrico) e com o tempo. Outros efeitos também são influentes, tais como a temperatura e a umidade do ambiente.

Apesar de as descargas parciais não curto-circuitarem completamente o meio isolante e possuírem magnitudes pequenas, elas causam deterioração progressiva do isolamento, podendo provocar uma falha total. Por essa razão, como meio preventivo de falhas, é essencial o monitoramento de descargas parciais em equipamentos. Para tanto, faz-se necessário três estágios de avaliação: detecção, classificação e localização das descargas parciais (KREUGER *et al.*, 1993). A detecção pode ser realizada com diferentes tipos de sensores e mostra a presença e magnitude da descarga parcial sob observação. A classificação pretende reconhecer o defeito causador da descarga parcial, tais como: (1) descargas internas, (2) descargas na superfície e (3) efeito corona. Por fim, a localização pretende localizar onde a descarga parcial ocorre no equipamento. Em um caso ideal, a localização revela o tipo de material ou a interface entre materiais onde ocorre a descarga. Todas as informações citadas são vitais para a avaliação dos riscos envolvidos, podendo ser úteis no processo de tomada de decisão para retirada de equipamentos de operação.

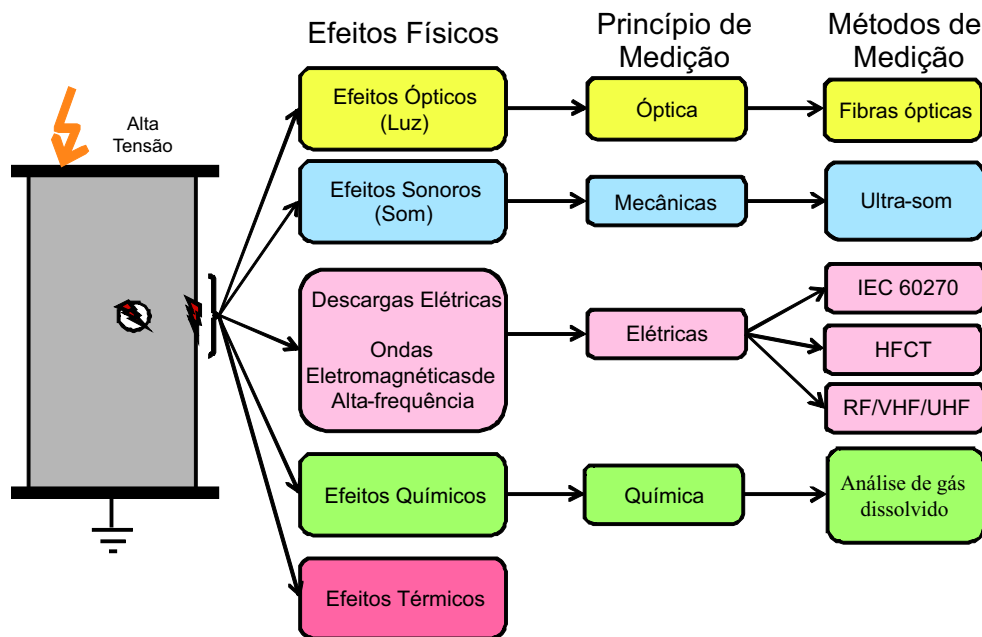
2.2 Métodos de Medição de Descargas Parciais

As descargas parciais em dielétricos provocam efeitos físicos, químicos e elétricos. Portanto, em princípio, os efeitos podem ser utilizados para revelar a presença de descargas. Destes, pode-se citar, por exemplo (STONE, 2005; METWALLY, 2004):

- Fenômenos elétricos;
- Radiação eletromagnética;
- Emissão de luz;
- Variações térmicas (calor);
- Transformações químicas;
- Ruído acústico.

Na [Figura 2.1](#) é apresentada uma representação gráfica dos fenômenos físicos e métodos de detecção mais utilizados, associados à ocorrência de descargas parciais. Um pulso de descarga parcial propaga ondas eletromagnéticas, luz, som e calor. Além disso, as descargas parciais provocam reações químicas, em dielétricos líquidos e sólidos. Portanto, a identificação da descarga parcial pode ser realizada utilizando sensores elétricos, sensores de fibras óticas, sensores de ultra-som, sensores térmicos ou pela análise do gás dissolvido.

Figura 2.1 – Fenômenos associados à ocorrência de descargas parciais.



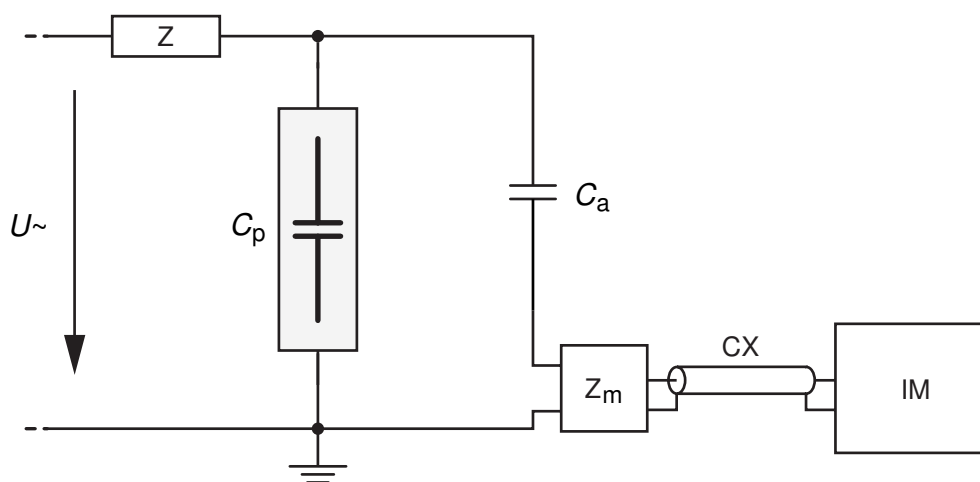
Fonte: [Macêdo \(2014\)](#).

A [IEC 60270 \(2000\)](#) estabelece procedimentos experimentais bem definidos, com explicações do procedimento de medição dos parâmetros das descargas parciais em equipamentos de alta tensão. No entanto, o método padrão utilizado necessita de capacitores de acoplamento ligados em paralelo com o equipamento a ser medido. Assim, a utilização do método em campo torna-se complexo, devido aos altos níveis de tensão do SEP e de limitações físicas (tais como peso, tamanho, espaço disponível e dificuldades de instalação). Uma alternativa para a medição de descargas parciais em para-raios em operação, e de modo não invasivo, é a utilização de Transformadores de Corrente de Alta Frequência (HFCT). A seguir são apresentados o método elétrico convencional e o método elétrico utilizando HFCT.

2.2.1 Método Elétrico Definido na IEC 60270

O método convencional para medição de descargas parciais, definido pela IEC 60270 (2000), utiliza um capacitor de acoplamento e uma impedância externa para a medição. Um indutor para bloqueio de interferências oriundas da fonte de tensão também pode ser empregado. Diversas configurações podem ser utilizadas para a medição de descargas parciais, conforme o método convencional. Dentre elas, o arranjo mais frequentemente utilizado é apresentado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Arranjo de medição apresentado na IEC 60270 (2000).



Fonte: adaptada de IEC 60270 (2000).

O arranjo é composto de uma fonte de tensão alternada U ; uma impedância Z para filtragem de ruídos oriundos da fonte de tensão; o objeto de teste, representado por uma capacitância C_p ; um capacitor de acoplamento C_a ; uma impedância Z_m para medição do sinal de descargas parciais; um cabo coaxial CX ; e um instrumento de medição IM , geralmente um detector comercial de descargas parciais ou um osciloscópio com alta taxa de aquisição.

A impedância externa Z_m normalmente é um circuito ressonante, cuja função é prolongar os impulsos de corrente de descarga no domínio do tempo, facilitando a sua detecção (METWALLY, 2004). A medição com o circuito apresentado normalmente é realizada em valores de carga aparente (q), com valores da ordem de picocoulombs (pC).

A carga aparente transferida para o objeto de teste, no momento de uma descarga parcial, é dada por:

$$q = C_p \Delta U, \quad (2.1)$$

sendo ΔU a queda de tensão provocada pela ocorrência da descarga parcial, cujo valor é da ordem de milivolts (mV).

Considerando o capacitor de acoplamento em paralelo, conforme [Figura 2.2](#), a carga é redistribuída entre C_p e C_a . Portanto,

$$q = (C_p + C_a)\Delta U. \quad (2.2)$$

Além disso, a carga liberada pelo capacitor de acoplamento (q_m), efetivamente medida na impedância Z_m , é dada por:

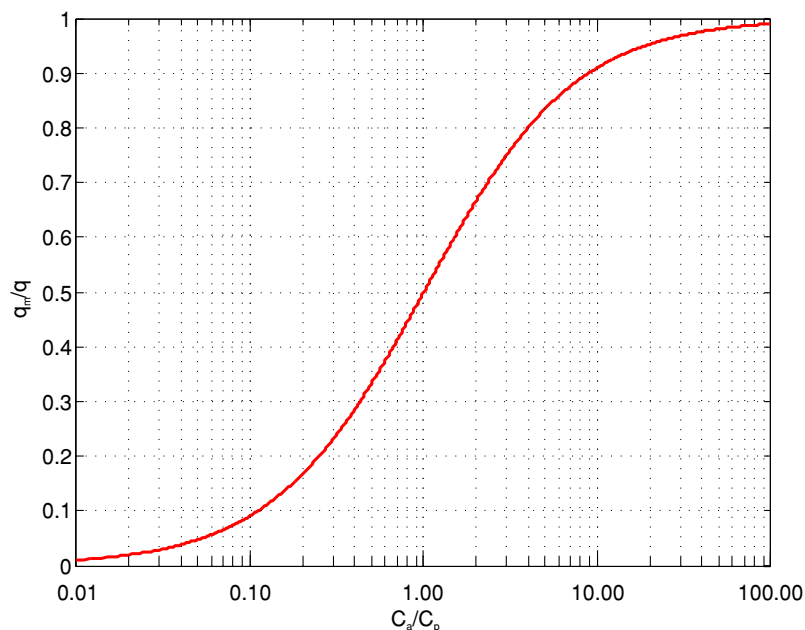
$$q_m = C_a\Delta U. \quad (2.3)$$

Portanto, com (2.2) e (2.3), pode-se obter a relação entre a carga medida q_m e a carga gerada q pela descarga parcial:

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_a}{C_p + C_a}. \quad (2.4)$$

A partir de (2.4), verifica-se que a relação entre a carga medida (q_m) e a carga real (q) depende da relação entre C_a e C_p . Na [Figura 2.3](#) é apresentada a influência do capacitor de acoplamento C_a sobre a relação q_m/q . Pode-se observar que a medição será tanto mais exata, quanto maior for a capacitância C_a do capacitor de acoplamento.

Figura 2.3 – Influência do capacitor de acoplamento C_a sobre a relação q_m/q .



Fonte: adaptada de [Costa e Neves \(1996\)](#).

Como a medição realizada sobre a impedância Z_m é em volts, previamente deve-se realizar a calibração do sistema para determinação da relação entre a tensão medida e a carga efetivamente injetada no sistema. Para tanto, a [IEC 60270 \(2000\)](#) estabelece que um pulso de carga conhecida (q_c) seja aplicado paralelamente ao objeto de teste. Fazendo-se isto, pode-se comparar a tensão medida em milivolts (mV) e a carga aplicada em picocoulombs (pC). O processo consiste em determinar a relação entre o valor de pico da tensão adquirida, pelo sistema de medição, e a carga transferida pelo calibrador. Assume-se, em seguida, uma relação linear entre a tensão medida e a carga para efeito de medições futuras. A calibração do sistema deve ser feita todas as vezes que se altere o equipamento cujos níveis de descargas parciais serão medidos, pois cada equipamento elétrico possui uma capacitância característica. Ou seja, a cada ensaio, a capacitância total do arranjo de medição é alterada, resultando em modificações na sensibilidade do sistema de medição ([IEC 60270, 2000](#)).

A partir da explicação prévia realizada, algumas vantagens e desvantagens do arranjo descrito podem ser observadas. As vantagens são as seguintes:

1. Um pulso pode ser injetado no circuito ressonante de modo a calibrar o sistema;
2. Uma sensibilidade ótima pode ser obtida maximizando a razão entre a capacitância de acoplamento e a capacitância do objeto de teste.

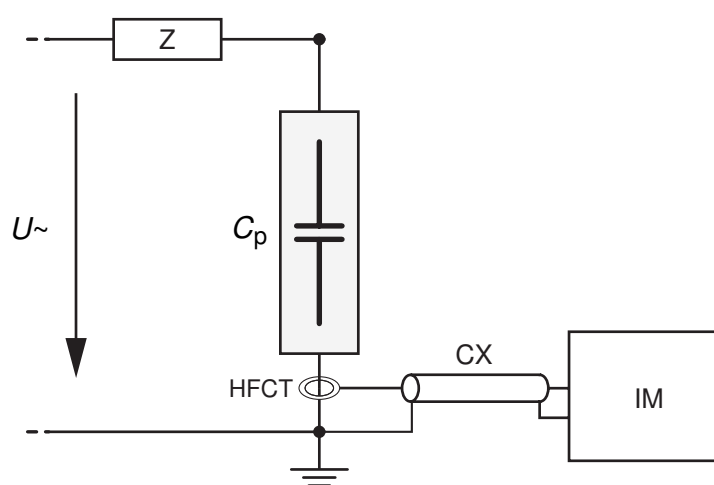
Por outro lado, algumas desvantagens são observadas no arranjo descrito, a saber:

1. O método é de difícil aplicação em equipamentos de alta tensão em serviço, pois necessita de um capacitor de acoplamento ligado em paralelo com o objeto de teste;
2. A calibração do sistema de medição é de difícil realização em campo;
3. A capacitância de acoplamento deve ser tanto maior quanto maior for a capacitância do objeto de teste;
4. O arranjo é muito sensível a interferências eletromagnéticas, uma vez que o capacitor de acoplamento funciona como uma antena receptora de interferências.

2.2.2 Método Elétrico Utilizando HFCT

Devido às desvantagens apresentadas para o método convencional, uma alternativa para a medição de descargas parciais, em campo, é a utilização de HFCT. No arranjo de medição, o instrumento é conectado, de forma não invasiva, ao cabo de conexão ao terra do equipamento sob teste, conforme [Figura 2.4](#). Assim, o nível de segurança da equipe responsável pela medição é maximizado. Caso haja a falha do equipamento sob teste, o sensor de corrente irá saturar e o não sujeitará os instrumentos de medição a altas tensões.

Figura 2.4 – Arranjo de medição utilizando HFCT.



Fonte: adaptada de [Macêdo \(2014\)](#).

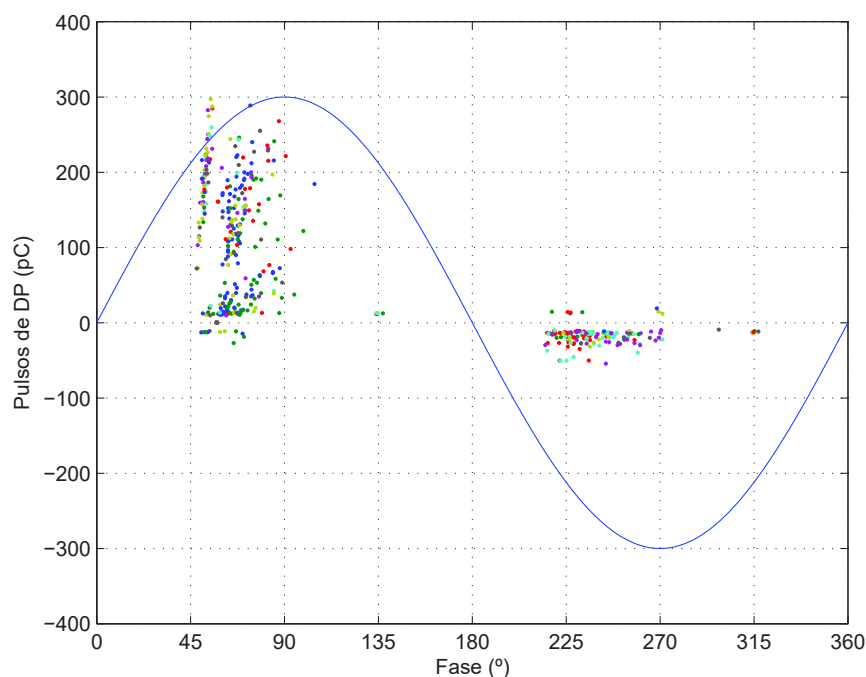
2.3 Sistema de Aquisição de Descargas Parciais

Segundo a [IEC 60270 \(2000\)](#), o sistema de aquisição de descargas parciais deve ser capaz de quantizar e armazenar, com adequada acurácia, a carga da descarga parcial e a referência de tempo t_i ou ângulo φ_i de ocorrência. Para tanto, a medição de descargas parciais deve ser realizada utilizando um sistema adequado de aquisição de dados. A seguir são apresentados alguns aspectos relevantes para a aquisição correta dos dados. Será descrito o método de aquisição PRPD; as características necessárias de um instrumento de aquisição de dados; o processo de filtragem dos ruídos espúrios; e um algoritmo de detecção de pulsos para a identificação da descarga parcial.

2.3.1 Método de Aquisição PRPD

De acordo com a IEC 60270 (2000), é necessário realizar a medição de descargas parciais com o objeto de teste energizado por uma tensão senoidal, a fim de fazer uma avaliação em relação à fase da tensão. Como o fenômeno de descargas parciais é estocástico por natureza, também é necessário avaliá-lo em um espaço de tempo significativo, a fim de capturar o comportamento médio das descargas parciais. Por essa razão, para uma avaliação em função da fase da tensão, deve-se realizar medições em vários ciclos da tensão e unir as informações em um único gráfico. Na Figura 2.5 é apresentado um exemplo de medição utilizando esse método, conhecido como PRPD.

Figura 2.5 – Exemplo de medição de descargas parciais utilizando o método PRPD. A forma de onda senoidal é a representação da tensão aplicada. Os pontos representam os pulsos de descargas parciais identificados.



Fonte: produzida pelo autor.

A forma de onda senoidal nas figuras é a representação de uma amostra da tensão aplicada ao objeto sob estresse elétrico. É possível observar que os sinais de descargas parciais possuem localização, magnitude e número de pulsos bem definidos em relação ao ângulo de fase (φ) da tensão aplicada (ou também em relação ao tempo, se desejável). O método PRPD permite a análise de padrões, principalmente a assimetria do número de pulsos em cada semiciclo e a

polaridade dominante das descargas parciais. Também é possível obter em uma mesma medição diferentes níveis de descargas parciais, obtendo-se uma base de dados ampla no sistema de aquisição.

2.3.2 Instrumento para a Aquisição dos Dados

Ao se especificar (ou projetar) um instrumento para a aquisição dos dados, é necessário escolher adequadamente a largura de banda, a taxa de amostragem, a memória e a capacidade de representação numérica do instrumento. Caso contrário, os pulsos de descargas parciais não serão identificados e medidos corretamente.

A largura de banda do instrumento de medição indica a faixa de frequência do sinal que ele é habilitado a medir acuradamente. Sem uma largura de banda suficiente, o instrumento não vai medir adequadamente o sinal de descargas parciais. Nesse caso, a medição pode apresentar erros de amplitude ou perda de detalhes do sinal, tais como os detalhes das bordas de subida dos pulsos de descargas parciais.

A taxa de amostragem é o número de amostras que o instrumento é capaz de adquirir por segundo. De acordo com o teorema da amostragem, a taxa de amostragem necessária (f_s) para aquisição de um sinal, amostrado com espaçamento fixo no tempo, é dada por:

$$f_s \geq 2 \cdot f_{MAX}, \quad (2.5)$$

sendo f_{MAX} a máxima frequência do sinal. Em tese, a taxa de amostragem mínima necessária para aquisição de sinais de descargas parciais é duas vezes a largura de banda (f_B) da saída do HFCT ou da impedância de medição (para o método convencional). No entanto, as bordas do sinal podem conter componentes de frequência significativamente maiores que f_B . Por essa razão, para evitar distorções no sinal devido ao efeito de *aliasing*, uma taxa de amostragem entre quatro e cinco vezes f_B é sugerida por [Keysight Technologies \(2014\)](#).

A memória do instrumento refere-se à quantidade de amostras ou pontos que podem ser armazenados. O instrumento utilizado deve ter capacidade de armazenamento de dados suficiente para realizar a aquisição com a taxa de amostragem e janela de tempo escolhida. Quando a memória é insuficiente, os instrumentos digitais de aquisição de dados costumam diminuir a taxa de amostragem efetiva a fim de realizar a medição na janela de tempo desejável.

Outro aspecto importante na medição é o número de bits utilizados na representação numérica da aquisição. A partir das amostras obtidas no processo de amostragem, pode-se quantificar as amplitudes em um conjunto finito de valores possíveis, chamados níveis de quantização. Tem-se uma representação numérica em b bits é capaz de representar 2^b níveis de sinal, correspondente a subdividir a janela de amplitude em 2^b níveis de tensão. A diferença entre o valor original da amostra e o valor digitalizado é denominada erro de quantização. Caso a quantidade de níveis de quantização seja muito baixa, será verificado uma baixa representação dos detalhes do sinal e a perda da informação de amplitude dos pulsos de menor magnitude (aqueles menores que o primeiro nível de quantização). Em se tratando de medições de descargas parciais, onde se obtêm pulsos de descargas parciais de diferentes magnitudes, a quantidade de bits utilizados na representação numérica é um aspecto importante no instrumento de medição, a fim de evitar erros de amplitude na identificação dos pulsos.

2.3.3 Filtragem de Sinais de Descargas Parciais

Um dos problemas inerentes as medições de descargas parciais é a presença de ruídos existentes no ambiente de medição. Os ruídos podem possuir níveis superiores as descargas parciais aceitáveis no objeto de teste avaliado, dificultando a análise ou gerando falsos positivos no processo de identificação. Por essas razões, é necessário realizar a filtragem da medição a fim de identificar os pulsos de descargas parciais corretamente. A filtragem pode ser realizada de modo analógico, mediante hardware no sistema de medição; ou de modo digital, mediante algoritmos de filtragem. Para facilitar a medição em campo, a filtragem digital apresenta a vantagem de exigir um sistema de medição com menos elementos.

A filtragem digital do ruído de interferência é uma etapa importante em sistemas de processamento de sinais. Ela depende fortemente da habilidade de caracterizar e modelar o ruído, usando suas características para diferenciá-lo do sinal de interesse. Diversos autores estudaram a influência do ruído nas medições de descargas parciais, dentre eles [Ma et al. \(2002a\)](#), [Satish e Nazneen \(2003\)](#), [Hao et al. \(2008\)](#), [Amorim Júnior et al. \(2012\)](#) e [Macêdo \(2014\)](#). Eles afirmam que os principais tipos de ruídos mais comprometedores à medição dos sinais de descargas parciais são:

1. Ruído eletromagnético de espectro discreto (DSI, *Discrete Spectral Interference*);

2. Ruído impulsivo periódico; e
3. Ruído branco.

O ruído DSI é classificado como de banda estreita, enquanto os outros dois são classificados como de banda larga. Segundo [Vaseghi \(2009\)](#), os ruídos mencionados são descritos conforme a seguir:

- Ruído de espectro discreto (DSI): presente em todas as frequências, e em particular nas frequências de rádio. Todos os dispositivos eletrônicos geram ruído eletromagnético do tipo DSI. Em ordem do decréscimo do comprimento de onda e aumento da frequência, vários tipos de ruídos de espectro discreto podem incluir: motores elétricos (kHz), ondas de rádios (kHz ou Ghz), microondas (10^{11} Hz), radiação infravermelha (10^{13} Hz), luz visível (10^{14} Hz), radiação ultravioleta (10^{15} Hz), raios X (10^{20} Hz) e radiações γ (10^{23} Hz). Para efeito de medição de descargas parciais em faixa larga, os DSI de interesse são situados na faixa de Mhz e Ghz.
- Ruído impulsivo periódico: consiste em pulsos de curta duração, com duração e amplitude aleatórias. Os pulsos do ruído apresentam características de frequência e amplitude bastante similares aos das descargas parciais. Por isso, a interferência do tipo impulsiva apresenta uma maior dificuldade de ser removida.
- Ruído branco: possui um espectro de potência teoricamente plano. O ruído branco idealmente possui componentes de igual intensidade em todo o espectro de frequência.

Existem diversas técnicas que podem ser utilizadas para a supressão digital de ruídos. Dentre as principais, pode-se citar o uso da Transformada de Fourier, filtros digitais, filtros adaptativos e a Transformada Wavelet. Em 2005, [Sriram et al. \(2005\)](#) fizeram um comparativo de dez técnicas diversas de filtragem de ruído, aplicáveis a medições de descargas parciais. Os autores utilizaram, ao todo, trinta e dois modos de implementação. Eles verificaram que a filtragem utilizando a Transformada Wavelet apresentou os melhores resultados na extração dos pulsos de descargas parciais. Nos últimos 15 anos diversos outros pesquisadores avaliaram a Transformada Wavelet como ferramenta de filtragem, como será apresentado no [Capítulo 3](#).

2.3.4 Algoritmo de Detecção do Pulsos

Para a construção do gráfico PRPD, é necessário empreender a identificação dos pulsos de descargas parciais após o processo de filtragem. A forma mais simples de identificar os pulsos é mediante a detecção de cruzamento de nível. Na prática, a medição de descargas parciais necessita estabelecer um limiar, acima do qual os pulsos serão registrados como descargas parciais. O limiar é necessário a fim de evitar que resquícios do ruído, após o processo de filtragem, interfiram na identificação dos pulsos. Além disso, a [IEC 60270 \(2000\)](#) define um tempo de resolução, como sendo o mínimo intervalo entre pulsos consecutivos, tal que o sistema de medição consiga distinguir a ambos com um erro mínimo de superposição. A definição do tempo de resolução sugere a identificação do pulso de descarga parcial, dentro de uma determinada janela de tempo de duração do fenômeno. O valor da carga aparente pode ser obtido a partir da medição do primeiro pico, ou da medição do pico máximo ocorrido dentro da janela de tempo do pulso registrado. Em qualquer dos casos, o método utilizado pelo sistema de medição deve ser claramente explicitado em suas especificações técnicas ([IEC 60270, 2000](#)).

Para a identificação dos pulsos de descargas parciais, [Carvalho \(2014\)](#) propôs o seguinte algoritmo, utilizando a estratégia de cruzamento de nível: (1) estabelece-se um limiar de ruído de fundo LR, acima do qual o sinal será identificado como uma descarga parcial; (2) estabelece-se uma janela de tempo JT de acordo com duração esperada para os pulsos de descargas parciais; (3) caso o sinal medido cruze o nível +LR com derivada positiva, registra-se o evento de ocorrência de um pulso positivo de descarga parcial; (4) caso o sinal medido cruze o nível -LR com derivada negativa, registra-se o evento de ocorrência de um pulso negativo de descarga parcial; (5) no caso de um pulso positivo (ou negativo), registrar sua amplitude como o máximo (ou mínimo) valor registrado dentro da janela JT. Outros algoritmos de identificação dos pulsos de descargas parciais podem ser desenvolvidos, desde que atendam aos critérios da [IEC 60270 \(2000\)](#).

Este capítulo apresentou conceitos fundamentais para compreender o fenômeno e o efeito das descargas parciais em equipamentos elétricos. Também foi apresentado métodos de medição, com destaque aos elétricos mais utilizados. Por fim, foram apresentados conceitos fundamentais em sistemas de aquisição de dados para medição de descargas parciais. A partir

do que foi discutido, é possível verificar que a medição de descargas parciais é viável, tanto em laboratório, quanto em campo. No entanto, um dos problemas inerentes são a presença de ruídos existentes no ambiente. Por essa razão, o próximo capítulo apresenta a Transformada Wavelet e o seu uso na supressão de ruídos espúrios na medição de descargas parciais.

Capítulo 3

Redução de Ruído no Domínio da Transformada Wavelet

Este capítulo descreve a Transformada Wavelet (TW) aplicada como ferramenta na supressão de ruídos de banda larga em medições de sinais de descargas parciais. Inicialmente é apresentada a TW e o seu uso na análise multirresolução de sinais. Em seguida, é apresentado o processo de Limiarização de Coeficientes Wavelets (LCW) utilizado na filtragem de sinais. Por fim, é apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre métodos de determinação das variáveis do processo de LCW.

3.1 Transformada Wavelet

A Transformada Wavelet é uma ferramenta capaz de transformar sinais no domínio do tempo em um domínio tempo *versus* frequência. Portanto, é capaz de fazer uma transformação de domínio sem perder a informação no tempo, como ocorre com a Transformada de Fourier. Além disso, a TW introduziu a análise multirresolução de sinais, que permite representar cada componente do sinal com uma resolução correspondente ao seu conteúdo. Componentes pobres em detalhes são representadas com baixa resolução e componentes ricas em detalhes são representadas em maiores resoluções. Isso permite concentrar a energia do sinal, no domínio da transformada, em poucos componentes. Assim, o processo de filtragem ou compressão pode ser realizado por meio de limiarização de coeficientes, conceito que será explicado posteriormente. Além disso, a TW é vastamente utilizada em sinais de características não-estacionárias. Na aplicação da TW, pode-se utilizá-la em sinais contínuos ou discretos, conforme apresentado a seguir.

3.1.1 Transformada Wavelet Contínua

A Transformada Wavelet Contínua (TWC) de uma função $f(x)$ é definida como:

$$W_{\psi}(s, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{s, \tau}(x) dx, \quad (3.1)$$

em que

$$\psi_{s, \tau}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi \left(\frac{x - \tau}{s} \right), \quad (3.2)$$

sendo o termo s denominado de escala e o termo τ de deslocamento. A função $\psi(x)$ representa uma função wavelet, e as funções $\psi_{s, \tau}(x)$ representam diversas wavelet mãe obtidas a partir de diferentes deslocamentos e escalas de $\psi(x)$.

A partir da TWC, é possível reconstruir o sinal $f(x)$ com a Transformada Wavelet Inversa (TWI), fazendo:

$$f(x) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_{\psi}(s, \tau) \frac{\psi_{s, \tau}(x)}{s^2} d\tau ds, \quad (3.3)$$

onde

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\mu)|^2}{|\mu|} d\mu, \quad (3.4)$$

em que $\Psi(\mu)$ é a Transformada de Fourier de $\psi(x)$. Portanto, verifica-se que, por definição, é possível recuperar perfeitamente o sinal original mediante a TWI.

3.1.2 Transformada Wavelet Discreta

Uma extensão natural da TWC é a Transformada Wavelet Discreta (TWD), que pode ser obtida pela amostragem da wavelet contínua no tempo. Tem-se que um sinal $f(n)$, para $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, pode ser representado no domínio wavelet do seguinte modo:

$$W_{\psi}(j, k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_n f(n) \tilde{\psi}_{j, k}(n). \quad (3.5)$$

onde $\tilde{\psi}_{j, k}(n)$ é a função wavelet biortogonal a $\psi_{j, k}(x)$.

De modo análogo, a Transformada Wavelet Inversa (TWI), para um sinal discreto, é dada por:

$$f(n) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_{\psi}(j, k) \tilde{\psi}_{j, k}(n), \quad (3.6)$$

sendo

$$X_{\psi}(j, k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n) \psi_{j,k}^*(n). \quad (3.7)$$

Em aplicações práticas, como é pouco comum se trabalhar com expressões analíticas de sinais, utiliza-se a versão discreta da Transformada Wavelet. Um dos motivos da popularidade da TWD é a existência de um algoritmo que permite calcular os coeficientes com baixo esforço computacional. Esse algoritmo é chamado de Transformada Wavelet Rápida (FWT, do inglês *Fast Wavelet Transform*). Mais informações sobre a Transformada Wavelet por ser encontrada em [Daubechies \(1992\)](#), [Walker \(2008\)](#) e [Weeks \(2010\)](#).

3.2 Análise Multirresolução

O que torna a TW especial com relação a outras transformadas, é a escolha das wavelet mãe. Elas são escolhidos de acordo com uma função básica, cujas mais comuns são as Haar, Daubechies, Biortogonal, Coiflets, Symlets, Morlet e Meyer ([MATHWORKS, 2009](#)). A escolha da wavelet mãe a ser usada no processo de transformação depende do tipo de problema que se está abordando. Como regra geral, para a utilização da TW como ferramenta de filtragem, a wavelet mãe mais adequada é a que oferece a melhor correlação com sinal sob investigação. Ou seja, a que mais se assemelha ao fenômeno sob análise.

Associada a uma função wavelet $\psi(n)$ existe uma função escala $\varphi(n)$, que pode ser utilizada para representar um sinal $f(n)$ em uma série wavelet. Utilizando a TWD, tem-se que:

$$f(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_k c(k) \varphi_k(n) + \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{j=0}^{\infty} \sum_k d_j(k) \psi_{j,k}(n). \quad (3.8)$$

em que os coeficientes $c(k)$ e $d_j(k)$ são denominados de coeficientes de aproximação e detalhes, respectivamente. Eles são obtidos fazendo-se:

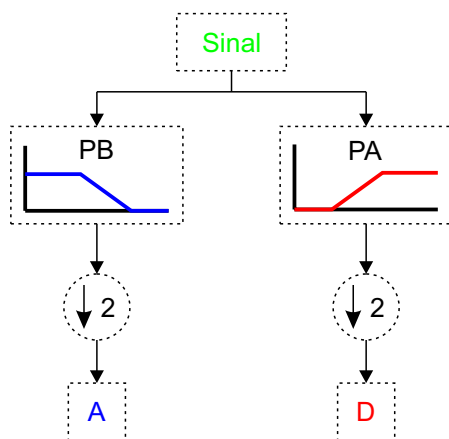
$$c(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_n f(n) \varphi_k(n), \quad (3.9)$$

$$d_j(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_n f(n) \psi_{j,k}(n). \quad (3.10)$$

A decomposição de $f(n)$ em uma série wavelet permite a análise multirresolução do sinal, onde a função escala $\varphi_k(n)$ é equivalente a um filtro passa-baixa (PB) e a função wavelet mãe $\psi_{j,k}(n)$ é equivalente a um filtro passa-alta (PA). Na [Figura 3.1](#) é apresentado um diagrama

ilustrativo da decomposição do sinal em coeficientes de detalhes e aproximação. O termo $(\downarrow 2)$ representa um sub-amostrador de fator 2, que tem a função de reduzir o número de coeficientes pela metade.

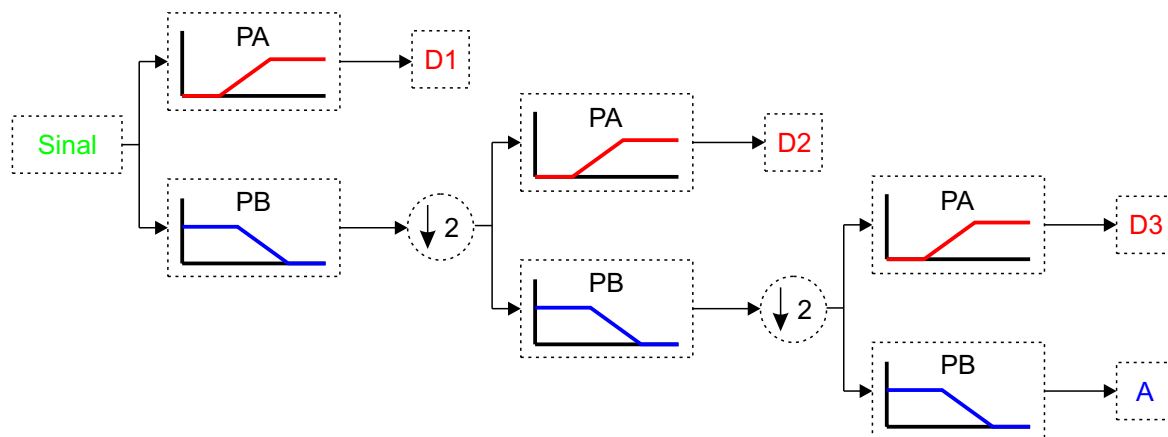
Figura 3.1 – Estrutura de uma decomposição wavelet.



Fonte: adaptada de Weeks (2010).

Uma vez obtidos os coeficientes de aproximação, pode-se construir uma representação do sinal em diferentes níveis de resolução. Para tanto, filtra-se recursivamente os sinais resultantes dos filtros passa-baixa, em um processo denominado análise multiresolução. Como exemplo, na Figura 3.2 é mostrado graficamente um sinal decomposto em três níveis de decomposição, em que os sinais de aproximação nas saídas dos filtros passa-baixa, em cada nível, são utilizados na entrada do nível seguinte.

Figura 3.2 – Estrutura de uma decomposição wavelet em 3 estágios.



Fonte: adaptada de Weeks (2010).

3.3 Limiarização e Filtragem de Sinais

A filtragem de sinais consiste em eliminar os coeficientes, na análise multiresolução, que representam os ruídos e as interferências, mantendo os coeficientes que representam o sinal de interesse. Posteriormente, realiza-se a reconstrução do sinal a partir da Transformada Wavelet Inversa (TWI). O processo de eliminação de coeficientes é feito submetendo cada coeficiente a um limiar (*threshold*) e é chamado de Limiarização de Coeficientes Wavelets (LCW). Existem duas funções clássicas de eliminação dos coeficientes wavelet: a limiarização abrupta (*hard thresholding*) e a limiarização suave (*soft thresholding*) (DONOHO; JOHNSTONE, 1994). A função de limiarização abrupta $\Lambda_H(t, \lambda)$ consiste em zerar todos os coeficientes de detalhes d que estejam abaixo de um limiar λ especificado, em que:

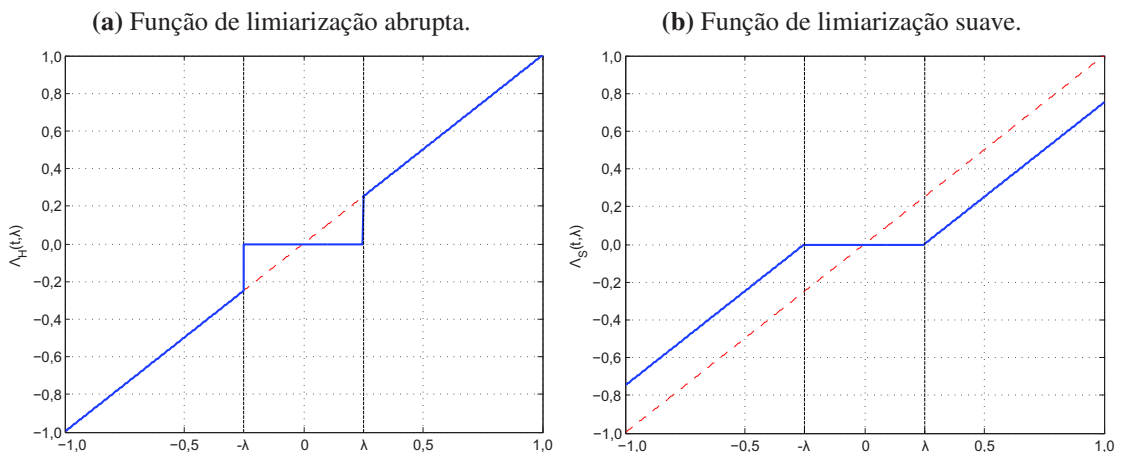
$$\Lambda_H(t, \lambda) = \begin{cases} d, & \text{se } |d| \geq \lambda, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.11)$$

A função de limiarização suave $\Lambda_S(t, \lambda)$, para um dado limiar λ , consiste em multiplicar todos os coeficientes de detalhes d por um fator de redução, e é dada por:

$$\Lambda_S(t, \lambda) = \begin{cases} d - \lambda, & \text{se } d \geq \lambda, \\ 0, & \text{se } -\lambda \leq d \leq \lambda, \\ d + \lambda, & \text{se } d \leq -\lambda. \end{cases} \quad (3.12)$$

Na Figura 3.3 são apresentadas graficamente as funções de limiarização abrupta e suave.

Figura 3.3 – Funções de limiarização para $\lambda = 0,25$.



Fonte: adaptada de Walker (2008).

Conforme pode-se observar, a limiarização abrupta não reduz os coeficientes originalmente acima do limiar. Por essa razão, as amplitudes dos coeficientes obtidos por limiarização abrupta serão maiores do que os obtidos por limiarização suave. Portanto, na medição de descargas parciais, onde o valor da amplitude é um fator importante na análise, a limiarização abrupta apresenta-se como a melhor alternativa de limiarização. Essa conclusão foi relatada e avaliada por alguns autores, tais como [Shim *et al.* \(2001\)](#) e [Xiaorong *et al.* \(2000\)](#).

3.4 Variáveis no Processo de Limiarização

Para que a remoção do ruído por LCW seja bem sucedida, é necessário que a limiarização anule os coeficientes correspondentes ao ruído e preserve ao máximo os coeficientes correspondentes aos pulsos de descargas parciais. Segundo [Carvalho \(2014\)](#), os fatores que podem afetar o resultado são:

1. A topologia da árvore de decomposição no domínio wavelet, que por sua vez engloba:
 - (a) a função wavelet mãe adotada, e
 - (b) o número de níveis de decomposição;
2. A estimativa do limiar para discriminação dos coeficientes correspondentes ao ruído;
3. A função de limiarização utilizada.

3.4.1 Escolha da Função Wavelet Mãe

Por definição, independentemente da forma de decomposição, a TW permite recuperar perfeitamente o sinal original mediante a TWI. Entretanto, no processo de LCW, os coeficientes serão limiarizados. Assim, o sinal reconstruído será distorcido na medida que certos coeficientes correspondentes ao sinal original sejam igualados a zero, juntamente com os coeficientes do ruído. Dentre as diferentes decomposições possíveis, serão mais adequadas as que produzirem coeficientes do sinal com maiores valores absolutos. Por conseguinte, ao eliminar os coeficientes do ruído, os coeficientes associados ao sinal serão maximamente preservados na etapa de limiarização ([CARVALHO, 2014](#)).

Algumas pesquisas foram desenvolvidos no sentido de descobrir qual wavelet mãe é mais adequada para filtragem de sinais de descargas parciais (SHIM *et al.*, 2001; MA *et al.*, 2002a; EVAGOROU *et al.*, 2010; LI *et al.*, 2010; MACÊDO *et al.*, 2012; ARAUJO, 2012; CUNHA *et al.*, 2015; CARVALHO *et al.*, 2015). No entanto, não há consenso entre qual família wavelet é mais adequada para filtragem de descargas parciais. Além disso, a medição do pulso de descarga parcial varia de formato dependendo da largura de banda do sistema de medição. Assim, a escolha da wavelet mãe pode ser diferente para diferentes contextos de medições.

Para solucionar o problema da seleção da wavelet mãe, alguns autores propuseram métodos de seleção prévia baseados na forma de onda dos pulsos (MA *et al.*, 2002a; LI *et al.*, 2010; CUNHA *et al.*, 2015; CARVALHO *et al.*, 2015). Esses métodos propõem critérios de seleção da melhor wavelet mãe de uma biblioteca de funções candidatas, no processamento de sinais de descargas parciais.

O método CBWS (*Correlation Based Wavelet Selection*), proposto por Ma *et al.* (2002a), seleciona a wavelet mãe pelo coeficiente de correlação estatística entre o sinal e a função wavelet, selecionando a wavelet que maximizar a correlação estatística com a forma de onda dos pulsos de descargas parciais. A metodologia se destaca porque, em tese, quanto maior for a correlação entre a wavelet mãe e o pulso de descarga parcial, maiores serão os coeficientes de detalhes do sinal. Assim, mais facilmente será realizada a filtragem.

O coeficiente de correlação ($s_{(x,y)}$) é usado para detectar uma relação particular entre duas variáveis. Quanto mais próximo da unidade for $s_{(x,y)}$, maior será a aproximação da forma de onda das variáveis. Para as variáveis $x[k]$ e $y[k]$, ambas com N amostras, o coeficiente de correlação entre os sinais é dado por:

$$s_{(x,y)} = \frac{\sum_{k=1}^N (x[k] - \overline{x[k]})(y[k] - \overline{y[k]})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (x[k] - \overline{x[k]})^2 \sum_{k=1}^N (y[k] - \overline{y[k]})^2}}, \quad (3.13)$$

sendo $\overline{x[k]} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x[k]$ e $\overline{y[k]} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y[k]$.

O procedimento proposto por Ma *et al.* (2002a) consiste em selecionar várias wavelet mãe e calcular suas correlações com um pulso de descarga parcial. Escolhe-se aquela que apresentar o maior coeficiente de correlação com o pulso. Segundo os autores, durante o processamento da TW, ao se re-escalar a wavelet mãe em duração e em amplitude, eventualmente será produzido coeficientes com maiores valores absolutos. Assim, o método CBWS propõe que a

correlação seja calculada com a função wavelet em todos os deslocamentos possíveis e em todas as escalas. No entanto, o procedimento descrito acarreta um elevado custo computacional.

Como alternativa ao CBWS, [Li et al. \(2010\)](#) propuseram o método EBWS (*Energy Based Wavelet Selection*). Os autores verificaram que, na análise da Transformada Wavelet Rápida (FWT), os subespaços dos detalhes tendem a concentrar a energia do ruído, e os subespaços da aproximação tendem a concentrar as informações úteis do sinal. Assim, o método consiste em uma seleção multinível dos filtros de decomposição baseada na distribuição de energia na decomposição do sinal. Pelo método, a cada nível, realiza-se uma decomposição do sinal utilizando todas as wavelet mãe candidatas. Então, seleciona-se a wavelet mãe que apresentar a maior concentração de energia nos coeficientes de aproximação. O método pode indicar uma wavelet mãe diferente para cada nível de decomposição.

Segundo os autores, comparado ao CBWS, o método da energia apresenta menores erros de máxima amplitude e de erro médio quadrático nos sinais de descargas parciais filtrados. Além disso, é significativamente mais rápido ([LI et al., 2010](#)). No entanto, as mesmas conclusões não foram verificadas em testes realizados por [Carvalho \(2014\)](#).

Em 2015, [Cunha et al. \(2015\)](#) propuseram o método SNRBWS (*Signal to Noise Rate Based Wavelet Selection*). O método proposto parte da suposição de que, a cada nível de decomposição, a banda de aproximação ou de detalhes que apresentar o maior valor absoluto contém informação predominante do pulso de descarga parcial (denominada banda do sinal). Por outro lado, a banda complementar contém essencialmente informação do ruído (denominada banda do ruído). Então, seleciona-se, a cada nível de decomposição, a wavelet mãe que maximizar a relação sinal ruído entre a banda do sinal e a banda do ruído. Assim, concentra-se a energia do sinal em um menor número de coeficientes de amplitudes. Do mesmo modo que o método da energia, o método SNRBWS pode indicar uma wavelet mãe diferente para cada nível de decomposição.

Também em 2015, [Carvalho et al. \(2015\)](#) propuseram dois métodos para a seleção da base wavelet. O primeiro, denominado NewEBWS (*New Energy Based Wavelet Selection*), é uma adaptação do método EBWS. Enquanto o método EBWS seleciona, a cada nível, funções wavelet de modo a maximizar a energia na banda de aproximação; o método NewEBWS seleciona, a cada nível, funções wavelet de modo a maximizar a diferença de energia entre a banda

de aproximação e a banda de detalhamento.

O segundo método proposto por [Carvalho et al. \(2015\)](#), denominado SWTBWS (*Stationary Wavelet Transform Based Wavelet Selection*), propõe a utilização de uma única wavelet mãe em todos os níveis de decomposição. Seleciona-se aquela que maximizar o módulo dos coeficientes da Transformada Wavelet Estacionária (*Steady Wavelet Transform*, SWT) do sinal. A SWT corresponde a uma FWT não sub-amostrada, e possui os mesmos filtros de decomposição que a FWT. O método SWTBWS é uma tentativa de melhorar o CBWS, pois a SWT calcula, a cada nível de decomposição, o produto interno discreto entre o sinal e o filtro equivalente de cada ramo da sua árvore de decomposição. O produto interno coincidirá com o coeficiente de correlação para sinais com média nula e variância unitária.

A fim de verificar quais métodos apresentam melhores resultados, [Carvalho et al. \(2015\)](#) realizaram um estudo comparativo, utilizando pulsos de descargas parciais obtidos em medições com barras de hidrogeradores. Segundo os autores, os métodos de seleção de uma única função wavelet para todos os níveis, em geral, apresentam melhores resultados do que os métodos de seleção multinível. Além disso, os autores verificaram que o método SWTBWS apresentou melhores resultados na maioria dos casos testados.

3.4.2 Determinação do Número de Níveis de Decomposição

A determinação do número de níveis de decomposição, na análise multirresolução, não é consenso na literatura, para filtragem de descargas parciais. Em sua grande maioria, os trabalhos propostos sugerem números de níveis de modo empíricos ([SHIM et al., 2001](#); [MA et al., 2002a](#); [MA et al., 2002b](#); [SATISH; NAZNEEN, 2003](#); [LI et al., 2010](#); [EVAGOROU et al., 2010](#); [HAO et al., 2011](#); [MACÊDO et al., 2012](#); [ARAUJO, 2012](#)). De modo geral, pode-se dizer que a escolha do número de níveis de decomposição estabelece um compromisso entre o resultado da filtragem e o custo computacional. Mais níveis de decomposição, em tese, proporciona um melhor resultado. Segundo [Xiaorong et al. \(2000\)](#), caso o número de níveis de decomposição na filtragem por LCW seja muito pequeno, o resultado da filtragem será pobre. Entretanto, se o número de níveis de resolução for muito grande, não necessariamente o ganho de eficiência será significativo.

Em 2015, [Carvalho et al. \(2015\)](#) propuseram um algoritmo para a Determinação do

Número de Níveis (DNN) de decomposição (J) a ser utilizado no processo de LCW. O algoritmo proposto determina o número de níveis de decomposição para o qual pelo menos $u\%$ da energia do sinal original é decomposta em subespaços de detalhamento. Assim, é evitado o custo computacional da decomposição do sinal em bandas que não contenham informações relevantes. O cálculo de J é realizado conforme a seguir:

$$J = \text{fix} \left[\frac{\log_2 \left(\frac{f_s}{2\gamma f_{min}} \right)}{\log_2 \left(\frac{1}{\gamma} \right)} \right], \quad (3.14)$$

em que a função $\text{fix}(\cdot)$ retorna o menor inteiro maior que seu argumento, f_s é a taxa de amostragem do sinal, f_{min} é a menor frequência acima do qual $u\%$ densidade espectral de energia do sinal é conservada, e γ é uma constante que indica a proporção entre a largura da banda de altas frequências e a largura de banda de baixas frequências do filtro de decomposição utilizado. Para um banco de filtros ortogonal, γ sempre terá valor igual a 0,5. Para filtros biortogonais, o espectro será dividido assimetricamente a cada nível de decomposição e γ assume valores $0 < \gamma < 1$.

Para um banco de filtros ortogonal (em que $\gamma = 0,5$), o cálculo de J em (3.14) é reduzido a forma:

$$J = \text{fix} \left[\log_2 \left(\frac{f_s}{f_{min}} \right) \right]. \quad (3.15)$$

Uma limitação do método consiste na utilização de diferentes wavelets mãe em uma mesma árvore de decomposição na FWT. No caso de todos os filtros serem ortogonais, em nada se alteraria o resultado. Entretanto, no caso de filtros com diferentes valores de γ , já não se pode garantir a decomposição dos sinais em subespaços de detalhamento que conservem pelo menos $u\%$ da energia do sinal original. Além disso, para filtros biortogonais, o método apresentará diferentes valores de J para os diferentes filtros avaliados. Portanto, a fim de garantir a escolha de J independente do banco de filtro a ser avaliado, sugere-se a escolha de um banco de filtros ortogonais (CARVALHO *et al.*, 2015).

3.4.3 Determinação dos Limiares de Ruído

Para a determinação dos limiares de ruído, os métodos mais convencionalmente utilizados são as técnicas decorrentes da proposta de Donoho (1995). O autor propôs os algoritmos de seleção

de limiares descritos a seguir:

- Limiar Universal, fixo para todos os níveis, dado por:

$$\lambda_j = \gamma \cdot \sigma \sqrt{2 \log(N)}, \quad (3.16)$$

em que N é o número de amostras do sinal, σ uma estimacão do nível de ruído (tipicamente calculado como o desvio absoluto da mediana dos coeficientes) e γ é um fator de escala que pode ou não ser aplicado. O fator σ pode ser calculado a cada nível de decomposiçã ou apenas para o primeiro nível de coeficientes de detalhe (MISITI *et al.*, 2015).

- Limiar SURE: uma regra de seleçã adaptativa do limiar baseada no método SURE (*Stein's Unbiased Risk Estimate*). Por esse método, obtém-se o limiar minimizando o risco correspondente à função de perda quadrática;
- Limiar Heurístico: uma modificacão heurística dos métodos anteriores, que passa do Limiar SURE ao Limiar Universal quando a relaçã sinal ruído torna-se muito pequena;
- Limiar MINIMAX: considerando o sinal filtrado como uma estimativa estatística de uma função de regressã desconhecida, esse método busca minimizar o máximo erro médio quadrático da estimativa (variando o *threshold*), em uma série de possíveis funções ou sinais.

De acordo com Donoho (1995), a grande maioria dos modelos de estimacão de limiar são apropriados para a supressã de ruído branco. Segundo Carvalho (2014), na média o limiar SURE é o mais conservativo e o limiar Universal o mais seletivo. Em termos práticos, a utilizacão de um limiar mais seletivo pode eliminar os sinais de descargas parciais cujos coeficientes estã muito perto do limiar de ruído. Ou seja, sinais de descargas parciais com menores amplitudes. Em contrapartida, limiares mais conservativos não eliminarã completamente o ruído de fundo, gerando falsos positivos no resultado do processamento de LCW.

Uma outra metodologia para determinacão dos limiares de ruído foi proposta por Ma *et al.* (2002a), sendo o cálculo do limiar realizado para cada nível de decomposiçã j da topologia

wavelet. O limiar é calculado conforme a seguir:

$$\lambda_j = \frac{\sigma_j}{0,6745} \sqrt{2 \log(n_j)}, \quad (3.17)$$

em que n_j é o número de coeficientes no nível e σ_j é o desvio absoluto da mediana dos coeficientes do nível considerado. O desvio absoluto da mediana é calculado conforme a seguir:

$$\sigma = MED(|X_i - MED(X_i)|), \quad (3.18)$$

sendo MED a mediana dos valores considerados e X_i os coeficientes do nível desejado.

Analisando (3.17), verifica-se a existência de dois termos: o da direita, $\sqrt{2 \log(n_j)}$, usado para calcular o limiar básico para ruídos do tipo branco; e o termo da esquerda, $\sigma_j/0,6745$, que é um fator de escala (MA *et al.*, 2002a).

Comparando (3.16) e (3.17), constata-se que o limiar calculado a partir da proposta de Ma *et al.* (2002a) é ainda maior que o Limiar Universal. Portanto, os autores propuseram um método mais seletivo.

Este capítulo apresentou a Transformada Wavelet aplicada como ferramenta na supressão de ruídos em medições de sinais de descargas parciais. Foi apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre métodos de determinação das variáveis do processo de filtragem. Destaca-se o método SWTBWS utilizado para a determinação da melhor wavelet mãe e o método de determinação do número de níveis de decomposição, ambos propostos por Carvalho *et al.* (2015). No próximo capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica sobre a medição e os efeitos das descargas parciais em para-raios de ZnO.

Capítulo 4

Revisão Bibliográfica

Esse capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre medição de descargas parciais em para-raios de ZnO e os seus efeitos. Como será mostrado a seguir, descargas parciais em para-raios podem ser iniciadas devido à presença de umidade interna no equipamento, poluição não-uniforme no invólucro ou estresses elétricos severos. A presença de umidade interna pode ocorrer devido à perda de estanqueidade do equipamento, normalmente em para-raios com muitos anos de operação. A poluição no invólucro, por sua vez, pode provocar descargas parciais internas devido a distribuição não uniforme de tensão ao longo de seu comprimento. Diversas técnicas podem ser utilizadas para medir descargas parciais em para-raios de ZnO. Dentre elas, pode-se citar o uso de Transformadores de Corrente de Alta Frequência. No entanto, estudos mais aprofundados necessitam ser realizados com o objetivo de construir regras mais claras para identificação de defeitos.

4.1 Efeito e Medição das Descargas Parciais em Para-raios de ZnO

As primeiras medições de descargas parciais em para-raios de ZnO deram início na década de 1980. [Moraes \(1987\)](#) estudou a viabilidade da medição de descargas parciais em varistores de ZnO, como método de verificação da degradação dos varistores. Ele comparou os resultados obtidos com medições de corrente de fuga total, tangente de perdas, capacitância e elevação de temperatura. Os métodos eram os mais utilizados na época para a constatação de degradação em para-raios. Como conclusão, verificou-se que a medição de descargas parciais pode ser utilizada na avaliação do estado de degradação de varistores de ZnO.

Em 1991, [Feser et al. \(1991\)](#) estudou o efeito da poluição superficial na produção de descargas parciais em para-raios. Os autores verificaram que a distribuição irregular de poluição no invólucro de porcelana do para-raios pode conduzir a uma distribuição irregular de tensão na porcelana. Como entre o invólucro e a coluna de varistores existe um acoplamento capacitivo, a diferença de distribuição de tensão entre a parte interna e externa do para-raios pode intensificar campos elétricos e provocar descargas parciais. Essas descargas parciais podem danificar os elementos varistores e conduzir à destruição do para-raios.

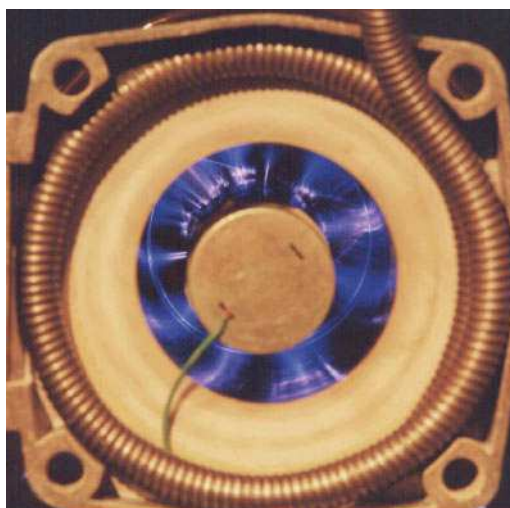
Para comprovação do efeito da poluição superficial em para-raios, os autores utilizaram um para-raios de ZnO com máxima tensão de operação contínua - do inglês *Maximum Continuous Operating Voltage* (MCOV) - de 68 kV. Então, testes de poluição à base de bentonita (40 g/L de água), sal (5 g/L de água) e água foram realizados. Os testes comprovaram que a presença de bandas secas na poluição do invólucro conduzem a descargas parciais internas. Os resultados indicam níveis de descargas parciais maiores quando as bandas secas estão localizadas próximo à base do para-raios.

No mesmo ano, [Knobloch et al. \(1991\)](#) comentaram não só o efeito da poluição, mas também o efeito da umidade. Os autores afirmaram que a poluição industrial, névoa salina e umidade interna no para-raios influenciam no aquecimento dos blocos de ZnO e na geração de descargas parciais no interior do equipamento. Os autores também explicaram que uma mudança no potencial elétrico devido à poluição externa e, conseqüentemente, uma alteração na distribuição de tensão ao longo do para-raios, pode resultar em descargas parciais internas. Acrescentaram ainda que as descargas podem provocar uma diminuição na concentração de oxigênio no interior do para-raios e a formação simultânea de gases nocivos. Os gases observados foram o CO_2 (dióxido de carbono), CO (monóxido de carbono), NO_2 (dióxido de nitrogênio) e NH_3 (amônia). Além disso, a presença de umidade pode provocar ácido nítrico (HNO_3). Em caso de para-raios isolados a gás SF_6 , radicais SF_x também podem ser formados. Na presença de umidade, é produzido ácidos nocivos, tais como o ácido fluorídrico (HF), o dióxido de enxofre (SO_2) e de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Danos aos elementos internos do para-raios e ao colar isolante dos varistores podem ocorrer devido à ação dos gases corrosivos produzidos internamente.

[Chrzan \(2004\)](#) investigou o efeito da umidade interna e das descargas parciais na de-

gradação de varistores de para-raios de ZnO. Ele verificou que ambos os efeitos aumentam a corrente de fuga dos varistores sob condições de operação contínua e também podem conduzir à degradação permanente dos varistores. Em algumas medições foram obtidas correntes da ordem de 3 mA. Também foi constatado que as descargas mais severas que ocorrem nos para-raios são aquelas entre a coluna de varistores e o invólucro, conforme mostrado na [Figura 4.1](#). As descargas, que podem ser da ordem de nanocoulomb (nC), tendem a destruir o colar isolante dos varistores e conduzir a falhas na coluna de varistores. Na [Figura 4.2](#) são apresentadas fotografias de varistores com degradação no colar isolante devido aos efeitos das descargas parciais.

Figura 4.1 – Descargas parciais entre a coluna de varistores e a porcelana.



Fonte: [Chrzan \(2004\)](#).

Figura 4.2 – Colar isolante de varistores degradados devido à ação de descargas parciais.



Fonte: [Chrzan \(2004\)](#).

Além dos efeitos diretos das descargas parciais, o autor comentou sobre a formação de gases nocivos que agredem internamente o para-raios. Para para-raios isolados a ar, os gases

formados são o ozônio (O_3) e gases designados como NO_x . Para para-raios isolados a gás SF_6 , são formados gases designados como SF_x : SF_4 , S_2F_{10} . E para para-raios isolados a óleo, são formados os gases H_2 , CH_2 , C_2H_2 , C_3 e H_6 . O número de componentes químicos aumentam consideravelmente na presença de umidade, oxigênio e materiais poliméricos que podem ser degradados. Ácido nítrico é formado no ar a partir do óxido nítrico e da umidade interna. O ácido fluorídrico (HF) também pode ser formado pela decomposição do SF_6 na presença de descargas parciais. Além disso, é possível que o hidrogênio liberado pela ação das descargas parciais reaja com o oxigênio e produza água.

A água interna no para-raios, devido às reações químicas e à condensação da umidade, pode provocar descargas superficiais nos varistores. Além disso, a presença de umidade pode deteriorar a vedação do para-raios, sobretudo na base do equipamento. Portanto, o autor verificou que os efeitos indiretos das descargas parciais são severos e conduzem à degradação não somente dos varistores expostos diretamente às descargas parciais.

Wong (2006) realizou a medição de descargas parciais em para-raios de ZnO com revestimento polimérico. O objetivo foi detectar defeitos físicos, tais como rachamento no revestimento polimérico do para-raios. Para tanto, foram escolhidos quatro para-raios de 22 kV, sendo um em perfeito estado de conservação e os outros três removidos de serviço. Os para-raios retirados possuíam indícios de defeitos no revestimento, mas estavam operando satisfatoriamente. Todos os para-raios foram submetidos a medições de descargas parciais em condições sob névoa e à seco. Também foi introduzida poluição superficial, preparada de acordo com a IEC 507 (1991). A medição dos efeitos das descargas parciais foi realizada utilizando uma antena bicônica de banda larga, a fim de gravar os pulsos eletromagnéticos produzidos pela descarga parcial. A antena utilizada captura frequências de 30 a 300 MHz. Os resultados detectaram descargas parciais nos para-raios com defeitos físicos e não detectaram descargas parciais nos para-raios sem defeitos físicos, conforme esperado. Portanto, os resultados mostraram que os pulsos eletromagnéticos das descargas parciais foram capturados pela antena. No entanto, o autor não apresentou correlação entre os defeitos dos para-raios e os níveis de descargas parciais medidos. Também não foram feitas considerações se os para-raios possuíam níveis de descargas parciais que indiquem a necessidade de retirada do equipamento de operação.

Larsen e Lien (2007) realizaram uma série de medições em campo onde foi possível

detectar vários para-raios com problemas. Eles destacam que a não retirada em tempo hábil de para-raios degradados pode resultar em: explosão porcelana do para-raios ou a queima do invólucro polimérico. Em caso de falhas no equipamento, existe a possibilidade de causar danos a outros equipamentos ou ao pessoal de campo; disrupções internas na porcelana, causando curto-circuitos no sistema; e danos aos equipamentos protegidos pelos para-raios, devido à degradação de suas características de proteção. Para os autores, os principais mecanismos que conduzem à degradação dos para-raios são a perda da estanqueidade, a qual permite a entrada de umidade; descargas devido a poluição superficial; sobrecarga devido a sobretensões temporárias ou transitórias; envelhecimento de longa duração na tensão de operação, em razão de uma má especificação do para-raios; e descargas parciais internas.

Os autores relataram um caso de uma experiência de explosão de um para-raios de 300 kV, após aproximadamente 9 anos de serviço. Devido ao ocorrido, um dos para-raios restantes em operação foi imediatamente retirado de serviço para evitar uma segunda falha no sistema. Esse para-raios foi analisado em laboratório e constatou-se uma corrente de fuga resistiva aproximadamente 5 vezes maior do que o nível recomendado para operação do para-raios. Após uma análise das falhas internas, os autores detectaram principalmente a presença de umidade interna e a ação de descargas parciais na carbonização do colar isolante dos varistores.

Oliveira Filho *et al.* (2008) realizaram a avaliação de para-raios com 20 anos de operação, em uma subestação de 800 kV. Eles foram retirados de operação e avaliados mediante medições de descargas parciais, corrente de fuga e tensão residual sob impulso padrão 8/20 μ s. Em dois dos para-raios avaliados, foi possível constatar, no ensaio de tensão residual, que eles apresentavam curto-circuitos internos. No entanto, o mesmo comportamento não foi observado no ensaio de medição de corrente de fuga, metodologia típica para avaliação de para-raios em campo. Por outro lado, foi possível constatar níveis de descargas parciais da ordem de 25 e 100 pC, em cada um dos para-raios. O resultado mostra que a medição de descargas parciais em campo pode ser uma alternativa a complementar a medição de corrente de fuga como critério de monitoramento de para-raios.

Bacega *et al.* (2009) realizaram medições de descargas parciais em treze para-raios de ZnO de 345 kV, em operação. A medição foi realizada utilizando um HFCT. Em seguida, um dos para-raios foi retirado de operação e avaliado em laboratório. Então, foi realizada uma

comparação entre a medição com o HFCT e com o método convencional da [IEC 60270 \(2000\)](#). Em ambos os métodos, houve concordância na confirmação da presença de descargas parciais. No entanto, os autores não realizaram correlação do nível de tensão da descarga parcial no HFCT com a carga aparente em pC. Portanto, a avaliação em campo, para essa metodologia, fica condicionada à experiência do operador do instrumento de medição em supor a carga aparente da descarga parcial a partir do sinal observado.

[Amorim Júnior et al. \(2012\)](#) também utilizaram um HFCT para monitoramento de para-raios. Os autores realizaram medições em para-raios em campo, com classe de tensão de 138, 345 e 550 kV. Dos para-raios monitorados, um deles foi retirado do campo e avaliado em laboratório com cinco tipos diferentes de HFCT e com o método da [IEC 60270 \(2000\)](#). Para a análise das descargas parciais, a partir das medições, foi utilizado um software comercial desenvolvido pelo Cepel. Os resultados obtidos mostraram-se promissores para a avaliação de para-raios em campo. No entanto, nenhuma consideração foi realizada sobre a correlação entre a medição com os HFCT e o arranjo da [IEC 60270 \(2000\)](#).

Segundo [Silva et al. \(2015\)](#), embora seja mais comum a ocorrência de descargas parciais em para-raios com invólucro de porcelana, descargas parciais podem ocorrer em qualquer espaço vazio dentro de para-raios, inclusive em para-raios poliméricos. Por essa razão, os autores avaliaram se para-raios de ZnO com revestimento polimérico apresentam descargas parciais em caso de umidade interna. Para tanto, oito para-raios poliméricos de distribuição, de quatro fabricantes diferentes, foram submetidos a testes. Durante 19 dias, os para-raios foram submetidos a um teste de imersão em água deionizada à 80°C, com uma concentração de cloreto de sódio de $1\text{kg}/\text{m}^3$. Medições de descargas parciais e corrente de fuga foram realizadas diariamente, a fim de identificar a presença de umidade nas amostras. Parâmetros como a magnitude e a taxa de repetição das descargas parciais, em função do tempo, foram comparados com a perda de potência calculada a partir da corrente de fuga.

Em alguns dos para-raios foi notado umidade interna. No entanto, a medição de descargas parciais não foi tão sensível quanto a avaliação da perda de potência. Para essas amostras, a atividade de descargas parciais mostrou um comportamento em que observou-se uma baixa amplitude, mas uma alta taxa de repetição. Segundo os autores, a taxa de repetição elevada sugere a formação de uma camada de umidade no para-raios.

4.2 Resumo das Contribuições dos Trabalhos Pesquisados

Como forma de destacar as publicações sobre descargas parciais em para-raios e a inserção desta pesquisa no estado da arte, na [Tabela 4.1](#) apresenta-se resumidamente a revisão bibliográfica.

Tabela 4.1 – Comparativo das contribuições de diversos autores.

Ano	Pesquisadores	Contribuição	CA ^α	HFCT ^β	Outro ^γ
1987	Moraes	Mostrou a viabilidade da medição de descargas parciais em para-raios de ZnO.	•		
1991	Feser <i>et al.</i>	Estudou o efeito da poluição superficial na produção de descargas parciais.	•		
1991	Knobloch <i>et al.</i>	Estudou o efeito da poluição superficial e umidade interna na produção de descargas parciais	•		
2004	Chrzan	Estudou o efeito umidade interna na produção de descargas parciais e gases nocivos aos elementos varistores.	•		
2006	Wong	Realizou a medição de descargas parciais em para-raios de ZnO poliméricos mediante uma antena bicônica.			•
2007	Larsen e Lien	Após uma análise de falhas internas em um para-raios retirado de operação. Os autores detectaram principalmente a presença de umidade interna e a ação de descargas parciais na carbonização do colar isolante dos varistores.		Não especificado	
2008	Oliveira Filho <i>et al.</i>	Comparou a medição de descargas parciais com as técnicas de medição de corrente de fuga e tensão residual sob impulso como critério de monitoramento de para-raios.	•		
2009	Bacega <i>et al.</i>	Realizaram a medição de descargas parciais em para-raios de 345 kV em campo (utilizando HFCT) e em laboratório (utilizando HFCT e CA).	•	•	
2012	Amorim Júnior <i>et al.</i>	Realizaram a medição de descargas parciais em para-raios de 138, 345 e 550 kV em campo (utilizando HFCT) e em laboratório (utilizando HFCT e CA).	•	•	
2015	Silva <i>et al.</i>	Realizou a medição de descargas parciais em para-raios poliméricos envoltos em umidade. Os autores verificaram que as descargas parciais apresentaram uma baixa amplitude, mas uma alta taxa de repetição.	•		

^α Realizaram a medição utilizando um capacitor de acoplamento (CA); ^β Realizaram a medição utilizando HFCT; ^γ Realizaram a medição empregando outra técnica de medição.

A medição de descargas parciais em para-raios com o objetivo de se avaliar o seu estado de degradação vem sendo empregada há anos, especialmente em laboratório (MORAES, 1987; FESER *et al.*, 1991; KNOBLOCH *et al.*, 1991; CHRZAN, 2004; LARSEN; LIEN, 2007; SILVA *et al.*, 2015). Contudo, só mais recentemente alguns pesquisadores vem desenvolvendo métodos on-line para medir descargas parciais em campo (WONG, 2006; OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2008; BACEGA *et al.*, 2009; AMORIM JÚNIOR *et al.*, 2012). No entanto, esses métodos não estão plenamente desenvolvidos devido, principalmente, às dificuldades de se realizar medições de descargas parciais em campo, pois são sinais de baixa intensidade e de alta frequência, facilmente sobrepostos pelo ruído ambiente. Em geral, os autores apresentaram somente alguns resultados preliminares indicando a possibilidade de identificar defeitos em para-raios, em campo. As principais vantagens das técnicas de medição são a realização do ensaio com o equipamento em operação; a não necessidade de intervenções nos equipamentos e no sistema; e a rápida avaliação dos para-raios em operação. No entanto, estudos mais aprofundados necessitam ser realizados com o objetivo de construir regras mais claras para identificação de defeitos.

Em todos os trabalhos apresentados, não foi realizada uma correlação entre a medição utilizando o capacitor de acoplamento, conforme definido pela IEC 60270 (2000), e Transformadores de Corrente de Alta Frequência. Conquanto tenha-se verificado a viabilidade do HFCT para a medição de descargas parciais, a literatura ainda carece de um trabalho mais completo que apresente uma parametrização e uma metodologia para viabilizar o diagnóstico acurado de para-raios em campo. Portanto, esta pesquisa traz contribuição técnica ao realizar a parametrização da saída dos HFCT para valores de carga aparente (em pC). Além disso, realiza um estudo da melhor wavelet mãe a ser adotada no processo de filtragem e apresenta uma metodologia de utilização dos HFCT para avaliação dos níveis de descargas parciais em para-raios de ZnO. A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, pretende-se utilizar HFCT em campo e saber quais são os níveis de descargas parciais nos para-raios avaliados.

Após a avaliação das pesquisas realizadas na área e a inserção desta dissertação no estado da arte, no próximo capítulo serão apresentados os procedimentos experimentais adotados neste trabalho.

Capítulo 5

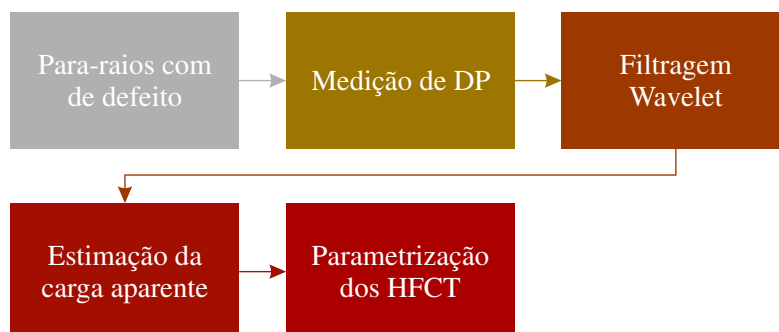
Metodologia

Este capítulo apresenta a metodologia desenvolvida para realizar a detecção de descargas parciais em para-raios e a parametrização de Transformadores de Corrente de Alta Frequência. Inicialmente são apresentados o material, o arranjo de medição e o sistema de aquisição utilizados. Em seguida é realizada a análise da densidade espectral de potência (DEP) dos sinais e avaliada a taxa de amostragem necessária para uma correta aquisição dos dados. Posteriormente é apresentado o procedimento de filtragem dos sinais. Por fim, é descrito o procedimento para a parametrização dos HFCT.

5.1 Visão Geral

Na [Figura 5.1](#) é apresentada uma visão geral, em forma de fluxograma, da metodologia proposta.

Figura 5.1 – Fluxograma geral da metodologia proposta.



Fonte: produzida pelo autor.

Inicialmente são utilizados para-raios com defeitos a fim de garantir a ocorrência de descargas parciais que possam ser medidas pelo arranjo de medição. Em seguida a medição é

realizada e os sinais obtidos são filtrados utilizando o método de Limiarização de Coeficientes Wavelet. Então, a carga aparente em picocoulomb (pC) é estimada para que possa ser realizada a parametrização do HFCT.

5.2 Para-raios de ZnO Avaliados

Para serem realizadas as medições de descargas parciais, foram utilizados 3 para-raios, sendo:

- 01 para-raios novo da TE Connectivity;
- 02 para-raios da Hitachi retirados de operação.

O para-raios fabricado pela TE Connectivity foi adquirido para ser utilizado como amostra em pesquisas. Ele ainda não foi utilizado em campo e, portanto, será usado como referência de para-raios sem defeito. Os para-raios da Hitachi foram retirados de operação há mais de 5 anos, por suspeita de falhas internas, e doados por concessionárias de energia elétrica ao Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Eles foram abertos e utilizados em pesquisas prévias e não se tem informações sobre suas condições de operação e de retirada.

Na [Tabela 5.1](#) são apresentadas as principais características elétricas dos para-raios e a denominação utilizada para referenciá-los. Na [Figura 5.2](#) é apresentada uma fotografia dos para-raios.

Tabela 5.1 – Dados técnicos do para-raios utilizados.

Denominação	Fabricante	Tensão Nominal	MCOV	Estado
PR_A	TE Connectivity	72 kV	52 kV	Novo
PR_B	Hitachi	72 kV	42 kV	Retirado de operação há mais de 5 anos
PR_C	Hitachi	72 kV	42 kV	Retirado de operação há mais de 5 anos

Figura 5.2 – Fotografia dos para-raios utilizados. Da esquerda para a direita: PR_A , PR_B e PR_C .



Fonte: produzida pelo autor.

Antes dos ensaios elétricos, os para-raios PR_B e PR_C foram inspecionados visualmente e desmontados a fim de verificar problemas aparentes. Em seguida, os seus blocos varistores foram inspecionados, constatando-se oxidação devido ao mau acondicionamento. Com o objetivo de recuperar as suas propriedades eletrotérmicas nominais, os varistores foram lixados, limpos e aquecidos em uma estufa com aproximadamente 60°C por 24 h. Na Figura 5.3a é apresentada uma fotografia de um varistor em condições semelhantes de degradação. Na Figura 5.3b mostra-se a fotografia do varistor após o processo de lixagem, limpeza e aquecimento. Conforme pode-se notar, o varistor ficou com aparência semelhante à de um em bom estado. Esse procedimento foi realizado para todos os varistores, tendo-se sempre o cuidado de manter o mais intacto possível o colar isolante e a superfície metálica de contato.

Figura 5.3 – Fotografias de varistor antes e depois de tratamento.

(a) Varistor oxidado.



(b) Varistor após tratamento.

Fonte: [Lira \(2012\)](#).

Com o objetivo de promover, preliminarmente, as condições adequadas para a geração de descargas parciais e viabilizar a parametrização dos HFCT, após o tratamento, ensaios de descargas parciais foram realizados. Verificou-se que o PR_C apresentava menos ocorrência de descargas parciais que o PR_B . Por essa razão, o PR_C foi escolhido para inserção de defeitos artificiais, a fim de obter um banco de medições de descargas parciais amplo, de diferentes magnitudes e diversificado. Já o PR_B foi utilizado para medição de descargas parciais sem a inserção artificial de defeitos.

Os defeitos inseridos no PR_C simulam situações reais que podem ocorrer durante a operação do para-raios em campo. A escolha dos defeitos baseou-se em alguns estudos reportados na literatura, que indicam a ocorrência de descargas parciais. Os defeitos simulados foram: (1) poluição superficial ([FESER et al., 1991](#); [KNOBLOCH et al., 1991](#)) e (2) presença de umidade interna ([KNOBLOCH et al., 1991](#); [CHRZAN, 2004](#)). A seguir é descrito o procedimento adotado para simulação dos defeitos no PR_C .

Poluição Superficial

Para a simulação, em laboratório, da poluição superficial em para-raios de ZnO, o PR_C foi lavado para retirada da poluição remanescente e, em seguida, pulverizados com soluções de diferentes graus de Densidade Equivalente de Depósito de Sal - do inglês *Equivalent Salt Deposit Density* (ESDD). A primeira solução foi uma mistura salina à base de caulim (40 g/L de

água), cloreto de sódio e água, seguindo as recomendações da [IEC 60507 \(2013\)](#). A quantidade de cloreto de sódio foi estipulada de tal modo a obter uma condutividade de aproximadamente 80 mS/cm, classificada como poluição muito pesada. A segunda solução foi uma mistura à base de bentonita (40 g/L de água), cloreto de sódio (5 g/L de água) e água. Obteve-se uma condutividade de aproximadamente 10 mS/cm, conforme indicado por [Feser *et al.* \(1991\)](#). A aplicação das soluções foi realizada utilizando um borrifador de água comercial. Foram aplicadas 144 borrifadas o mais uniformemente possível ao longo da coluna de porcelana do para-raios, para cada solução. Na [Figura 5.4](#) são mostradas fotografias do PR_C borrifado com as duas soluções preparadas.

Figura 5.4 – Fotografias do PR_C poluído com as soluções salinas.

(a) Poluição à base de Caulin.



(b) Poluição à base de Bentonita.



Fonte: produzida pelo autor.

Umidade Interna

Para simular a presença de umidade interna em para-raios de ZnO, o PR_C foi aberto e borrifado água limpa (com condutividade em torno de 0,8 mS/cm) sobre a coluna de varistores. Foram aplicadas 12 borrifadas o mais uniformemente possível ao longo da coluna de varistores do para-raios. Em seguida, realizou-se o fechamento do equipamento. Na [Figura 5.5a](#) é apresentado o para-raios sendo umedecido e na [Figura 5.5b](#) as gotículas de água na coluna de varistores.

Figura 5.5 – Fotografias do PR_C umedecido.**(a)** Aplicação de água nos varistores.**(b)** Gotículas de água nos varistores.

Fonte: produzida pelo autor.

Em todas as medições, os para-raios foram submetidos à tensão de 42 kV, que corresponde a uma tensão fase-terra de 1,05 p.u. no sistema de 69 kV. Essa tensão é a máxima permitida pelo ONS (Operador Nacional do Sistema), em condições operativas normais ou de emergência, nas redes de 69 kV (ONS, 2010). Além disso, as medições de descargas parciais só foram realizadas após 2 h de energização do para-raios. O procedimento visa realizar as medições após a estabilidade térmica e elétrica do equipamento. A escolha de 2 h de tempo de condicionamento foi feita baseada em estudos de Feser *et al.* (1991), que concluiu ser suficiente para o equipamento atingir estabilidade eletrotérmica.

5.3 Medição de Descargas Parciais

Para realizar a medição das descargas parciais, foi utilizado o método elétrico convencional e dois HFCT. A seguir são apresentados alguns detalhes sobre o sistema de medição empregado.

5.3.1 Método Clássico Baseado na IEC 60270

Para realização da medição utilizando o método clássico, foi utilizado um capacitor padrão de 1000 pF; um indutor de 15 mH; e um impedor de medição LDM-5, produzida pela Doble

Lemke. O impedor possui largura de banda de 100 kHz a 20 MHz, tempo de subida menor que 20 ns e corrente máxima permitida de 5 A. Internamente o impedor é um circuito ressonante, cuja função é prolongar os impulsos de corrente no domínio do tempo a fim de facilitar a sua detecção (METWALLY, 2004). Na Figura 5.6 é apresentada uma fotografia do instrumento utilizado.

Figura 5.6 – Impedor de medição LDM-5 utilizada.



Fonte: Doble Lemke.

Para a calibração do sistema conforme a IEC 60270 (2000), foi utilizado um calibrador LDC-5, também desenvolvido pela Double Lemke. O instrumento possui valores de calibração de 5, 20, 100 e 500 pC; tempo de subida menor que 60 ns; e trem de pulsos com frequência de 650 Hz. O erro no valor da amplitude é menor que ± 1 pC, segundo o manual do instrumento.

5.3.2 HFCT Utilizados

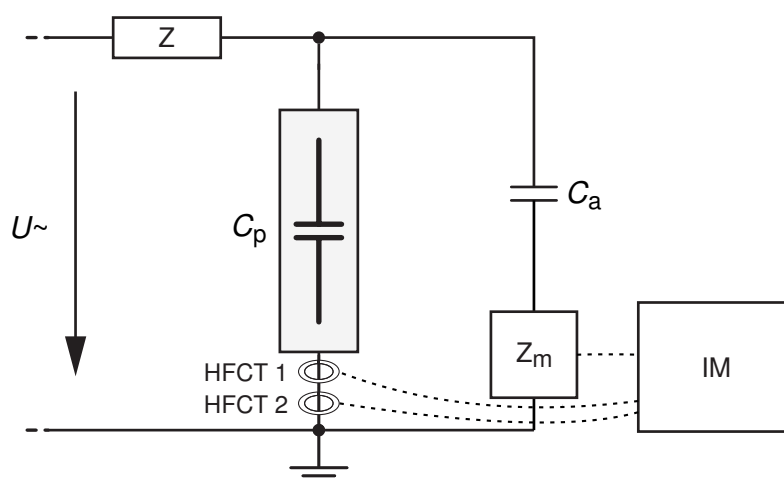
Os Transformadores de Corrente de Alta Frequência (HFCT) utilizados foram fabricados e comercializados pela HVPD (*High Voltage Partial Discharge*). Um deles, modelo HFCT 220/150, possui resposta em frequência na faixa de 100 kHz a 10 MHz; sensibilidade de 2,8 mV/mA; e tempo de subida superior a 35 ns quando conectado a uma carga de 50 Ω . O segundo sensor, modelo 140-100HC, possui resposta em frequência entre 100 kHz a 12 MHz com uma sensibilidade de 3,2 mV/mA. Os sensores são do tipo alicate, conforme mostrado na Figura 5.7, e podem ser utilizados em campo sem a necessidade de interrupção do cabo de aterramento do para-raios.

Figura 5.7 – Fotografia dos HFCT utilizados.

Fonte: produzida pelo autor.

5.3.3 Arranjo Experimental

Para a medição de descargas parciais, utilizando o material apresentado previamente, foi montado um arranjo experimental no qual a medição é realizada simultaneamente para o arranjo convencional e os dois HFCT. Para a ligação da saída do sistema ao instrumento de medição, foi utilizado três cabos coaxiais de 5 m cada e 50Ω de impedância característica. O arranjo experimental utilizado é apresentado no diagrama da [Figura 5.8](#), onde se pode observar o arranjo do método convencional e a conexão dos dois HFCT na saída do cabo de aterramento do para-raios. Na [Figura 5.9](#) é apresentada uma fotografia do arranjo montado.

Figura 5.8 – Arranjo de medição utilizado.

Fonte: produzida pelo autor.

Figura 5.9 – Fotografia do arranjo de medição utilizado.



Fonte: produzida pelo autor.

A medição foi realizada com as amostras submetidas a uma tensão senoidal, a fim de fazer uma avaliação em relação à fase da tensão. Para a aplicação do método PRPD, as medições foram realizadas para 60 ciclos de tensão, sendo cada medição espaçada de aproximadamente 10 segundos.

5.3.4 Instrumento de Medição

O instrumento de medição utilizado foi o osciloscópio MDO4104B-3 da Tektronix, que possui quatro (04) canais analógicos e largura de banda de 1 GHz. As medições foram realizadas a uma taxa de amostragem de 250 MSa/s, 5 MSa de memória por canal, capacidade de representação numérica de 16 bits por ponto e impedância de entrada de 1 M Ω .

5.4 Avaliação da Taxa de Amostragem para Aquisição de Descargas Parciais

Após a medição de descargas parciais com o arranjo experimental apresentado previamente, foi realizado um estudo da Densidade Espectral de Potência (DEP) das medições realizadas. Em seguida, foi avaliada a taxa de amostragem para a medição de descargas parciais utilizando

os HFCT e o impedor de medição apresentados. Para tanto, utilizou-se a medição de descargas parciais realizada no PR_B . Dentre as 60 aquisições obtidas, calculou-se a DEP da aquisição com maior relação sinal ruído. Então, a mínima taxa de amostragem $f_{s_{min}}$ necessária para medição de descargas parciais foi calculada conforme o teorema da amostragem a seguir:

$$f_{s_{min}} = 2 \cdot f_{MAX}, \quad (5.1)$$

onde f_{MAX} é a máxima frequência do sinal verificada na DEP.

Com a finalidade de reduzir o esforço computacional no processo de filtragem e processamento dos dados, os sinais foram subamostrados para obtenção de sinais com uma taxa de amostragem próximo de $f_{s_{min}}$. Para tanto, os sinais foram subamostrados pelo fator:

$$a = \text{fix}(fs/f_{s_{min}}), \quad (5.2)$$

onde a função $\text{fix}(\cdot)$ retorna o maior inteiro inferior ou igual ao seu argumento, fs é a taxa de amostragem do sinal original e $f_{s_{min}}$ a taxa de amostragem mínima calculada.

5.5 Procedimento de Filtragem dos Sinais de Descargas Parciais

Para a identificação eficiente das descargas parciais e aplicação do método PRPD, é necessário proceder a filtragem da medição. Para tanto, foi utilizada a Transformada Wavelet Discreta (TWD) e o método de Limiarização de Coeficientes Wavelets (LCW) como ferramenta computacional de filtragem digital de ruídos. No processo de LCW foi escolhida a wavelet mãe mais adequada mediante o método SWTBWS (CARVALHO *et al.*, 2015). O método seleciona a wavelet mãe maximizando o módulo dos coeficientes da Transformada Wavelet Estacionária (SWT) do sinal.

O número de níveis de decomposição J foi escolhido utilizando o algoritmo DNN proposto por Carvalho *et al.* (2015). O número de níveis de decomposição utilizado é aquele para o qual pelo menos $u\%$ da densidade espectral de energia do sinal original é decomposta em subespaços de detalhamento. Foi adotado um valor de $u\% = 95\%$.

A determinação dos limiares de ruído foi realizada utilizando o Threshold Universal, com estimação do nível do ruído σ_j a cada nível de decomposição j .

O banco de filtros utilizados para seleção da melhor wavelet mãe é apresentado na [Tabela 5.2](#). Optou-se somente pela escolha de filtros ortogonais, a fim de garantir o número de níveis J independente do banco de filtro a ser avaliado no processo de LCW ([CARVALHO et al., 2015](#)). Ao todo foram testadas 65 filtros de decomposição.

Tabela 5.2 – Banco de filtros utilizados para a seleção da melhor wavelet mãe.

Famílias Wavelets	
Daubechies	‘db1’ ou ‘haar’, ‘db2’, ... , ‘db45’.
Coiflets	‘coif1’, ‘coif2’, ‘coif3’, ‘coif4’, ‘coif5’.
Symlet	‘sym1’, ‘sym2’, ‘sym3’, ... , ‘sym15’.

5.6 Detecção dos Pulsos de Descarga Parcial

A detecção dos pulsos de descargas parciais foi realizada após a filtragem wavelet e, em seguida, foram construídos os gráficos PRPD. Para tanto, a identificação dos pulsos de descargas parciais foi feita utilizando a estratégia de detecção de cruzamento de nível. A estratégia de detecção consiste em estabelecer um limiar de ruído de fundo acima do qual o sinal é registrado como de descargas parciais. O limiar é necessário a fim de evitar que resquícios do ruído após o processo de filtragem interfiram na identificação dos pulsos de descargas parciais. Em seguida, os gráficos PRPD foram construídos para cada um dos ensaios realizados.

5.7 Parametrização dos HFCT

Após a aquisição dos dados e a criação dos gráficos PRPD, foi realizada a parametrização dos HFCT. Para tanto, nos para-raios PR_B e PR_C , e em todos os defeitos simulados, o seguinte procedimento foi adotado:

1. Para uma mesma amostra, identificou-se os pulsos de descargas parciais obtidos simultaneamente com o método convencional e o HFCT a ser parametrizado. Então, criou-se um conjunto de pares ordenados (Q_i, V_i) , onde Q_i representa a carga obtida para um pulso i pelo método convencional e V_i a tensão obtida pelo HFCT;

2. A partir do conjunto de pares ordenados obtidos, realizou-se um ajuste de curvas $V = f(Q)$, de modo a obter uma curva de correlação entre a medição com o HFCT e o arranjo convencional. O ajuste foi realizado mediante o método dos quadrados mínimos;
3. Construiu-se um gráfico Q versus V a partir dos pares ordenados e da curva $V = f(Q)$, a fim de verificar a dispersão dos dados obtidos.

Para a aplicação do procedimento, foi necessário que somente pulsos medidos simultaneamente com o método convencional e o HFCT fossem utilizados no conjunto de pares ordenados (Q_i, V_i) . Para a identificação dos pulsos, foi adotada a seguinte metodologia:

1. Localizou-se no tempo t_{CA} os pulsos de descargas parciais obtidos pelo método convencional;
2. Localizou-se no tempo t_{HFCT} os pulsos de descargas parciais obtidos pelo HFCT;
3. Criou-se um par ordenado para os pulsos que satisfazem, no tempo, a seguinte condição: $|t_{CA} - t_{HFCT}| \leq \varepsilon$. Em outras palavras, somente os pulsos localizados no mesmo instante de tempo, com uma tolerância de ε , foram considerados pulsos identificados simultaneamente pelos métodos utilizados.

Este capítulo apresentou a metodologia desenvolvida para realizar a detecção de descargas parciais em para-raios e a parametrização dos HFCT. Verificou-se que o conjunto de pares ordenados (Q_i, V_i) a ser construído deve ser amplo, de diferentes magnitudes e diversificado. Para tanto, optou-se pelo método PRPD, pelo uso de dois para-raios (PR_B e PR_C) e pela inserção de defeitos artificiais. Para evitar falsos positivos, a metodologia utiliza três procedimentos distintos: (1) a utilização de uma filtragem wavelet seletiva, (2) o estabelecimento de um limiar de ruído de fundo no sistema de aquisição e (3) a utilização somente de pulsos localizados aproximadamente no mesmo instante de tempo na medição, com o método convencional e o HFCT. A partir da metodologia proposta, foram obtidos os resultados apresentados no próximo capítulo.

Capítulo 6

Resultados e Análises

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a metodologia utilizada. Inicialmente, são apresentados as medições realizadas. Em seguida, são apresentados os resultados do estudo da Densidade Espectral de Potência (DEP) e da avaliação da taxa de amostragem para medições de descargas parciais, utilizando os HFCT e o impedor de medição. Posteriormente, são apresentados os resultados da análise da melhor topologia wavelet para filtragem dos sinais de descargas parciais. Segue-se com a apresentação dos gráficos PRPD obtidos após o processo de subamostragem, filtragem e identificação dos pulsos de descargas parciais. Por fim, são mostrados os resultados da parametrização dos HFCT.

6.1 Medição dos Sinais de Descargas Parciais

Com o intuito de avaliar a capacidade do sistema utilizado de medir descargas parciais, foram utilizados 6 arranjos de medição, conforme apresentado na [Tabela 6.1](#).

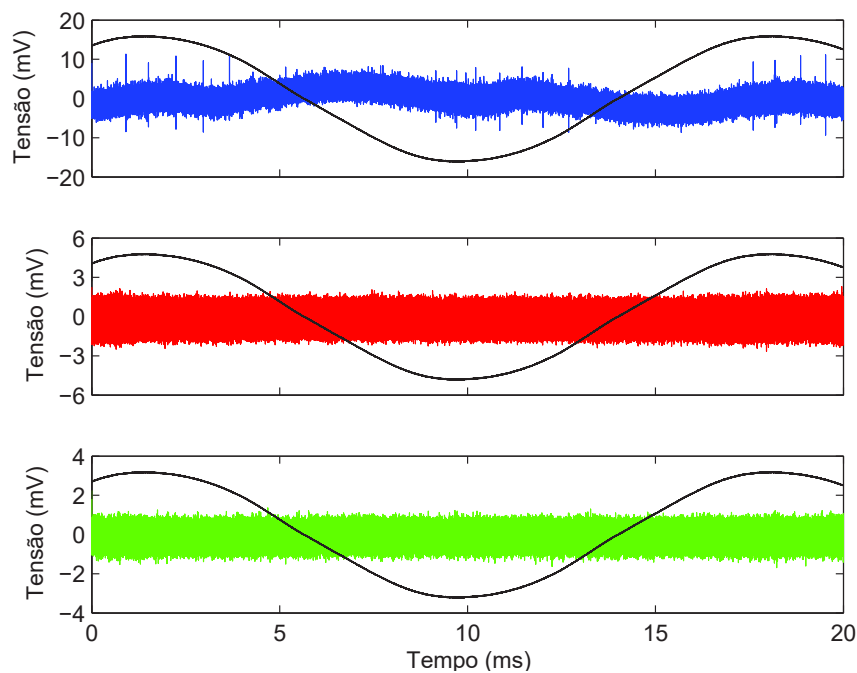
Tabela 6.1 – Medições realizadas em cada para-raios.

Para-Raios	Medições realizadas
PR_A	Para-raios limpo
PR_B	Para-raios limpo
PR_C	Para-raios limpo
	Para-raios com poluição à base de caulim
	Para-raios com poluição à base de bentonita
	Para-raios com umidade interna

Nas Figuras 6.1 a 6.5 são apresentadas os sinais obtidos em cada medição, onde verificam-se a representação do sinal da tensão aplicada e o sinal medido nos sensores. A forma de onda senoidal é utilizada como referência de fase em relação à ocorrência do pulso de descarga parcial e será útil na geração de padrões PRPD. Os sinais em azul correspondem as medições com o impedor de medição; os sinais em vermelho correspondem as medições com o HFCT 140-100HC; e os sinais em verde correspondem as medições com o HFCT 200/150.

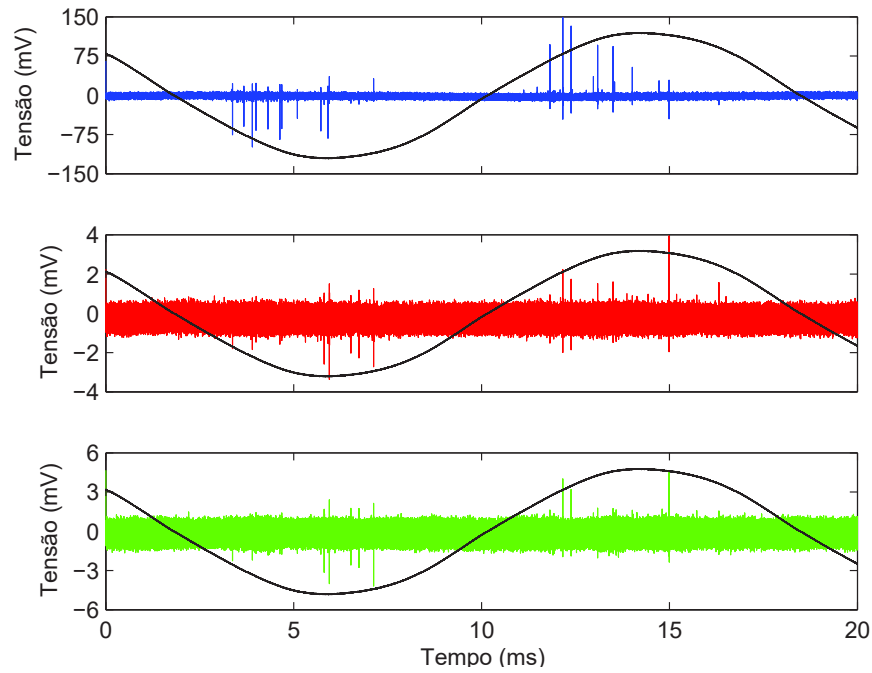
A partir dos dados obtidos, é possível verificar que o sistema foi capaz de medir os sinais provenientes do arranjo de medição. Os sinais possuem pulsos, provavelmente provocados por descargas parciais, sobrepostos por um ruído branco presente em toda a faixa de medição. Além disso, observaram-se a geração de características bem definidas e diferentes entre si, principalmente a magnitude e a localização dos pulsos em relação à fase da tensão. Portanto, tornou-se evidente a necessidade de filtragem dos dados, a fim de suprimir o ruído branco presente na medição. Para a identificação dos padrões presentes em cada medição, posteriormente serão apresentados os gráficos PRPD correspondentes.

Figura 6.1 – Medição de descargas parciais no PR_A limpo. Os sinais em azul correspondem as medições com o impedor de medição; os sinais em vermelho correspondem as medições com o HFCT 140-100HC; e os sinais em verde correspondem as medições com o HFCT 200/150.



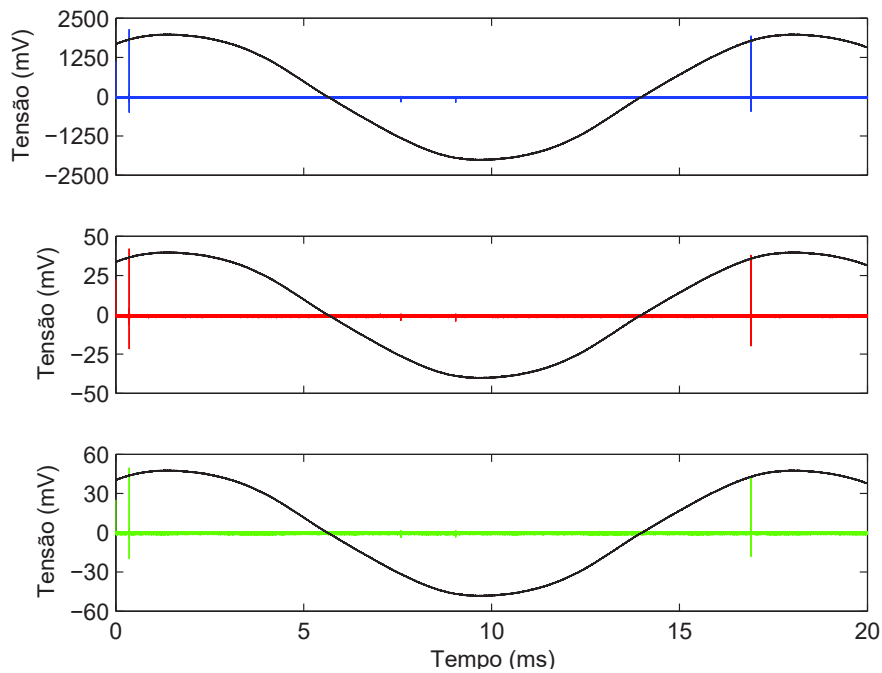
Fonte: produzida pelo autor.

Figura 6.2 – Medição de descargas parciais no PR_B limpo. Os sinais em azul correspondem as medições com o impedor de medição; os sinais em vermelho correspondem as medições com o HFCT 140-100HC; e os sinais em verde correspondem as medições com o HFCT 200/150.



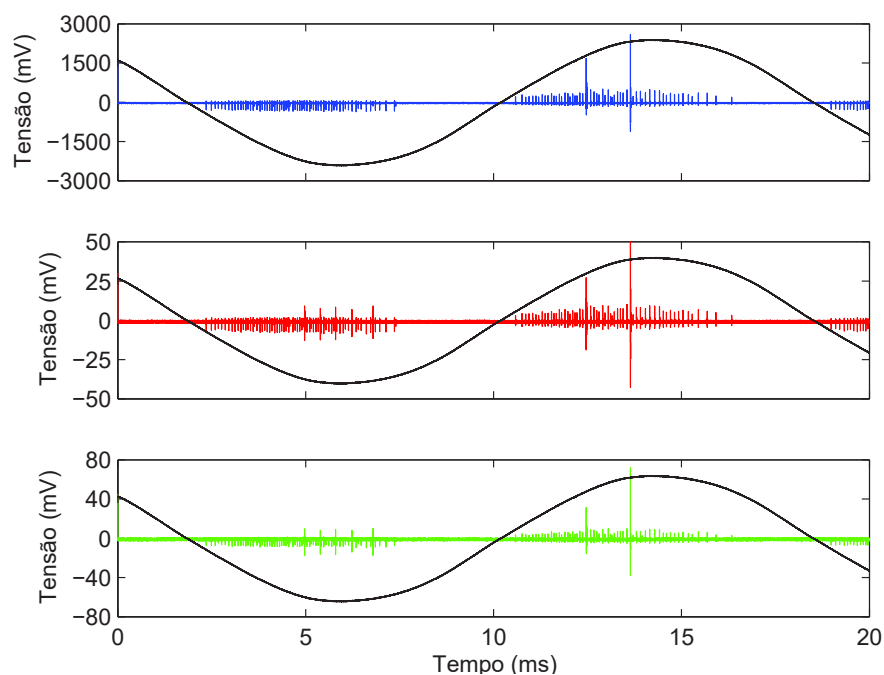
Fonte: produzida pelo autor.

Figura 6.3 – Medição de descargas parciais no PR_C limpo. Os sinais em azul correspondem as medições com o impedor de medição; os sinais em vermelho correspondem as medições com o HFCT 140-100HC; e os sinais em verde correspondem as medições com o HFCT 200/150.



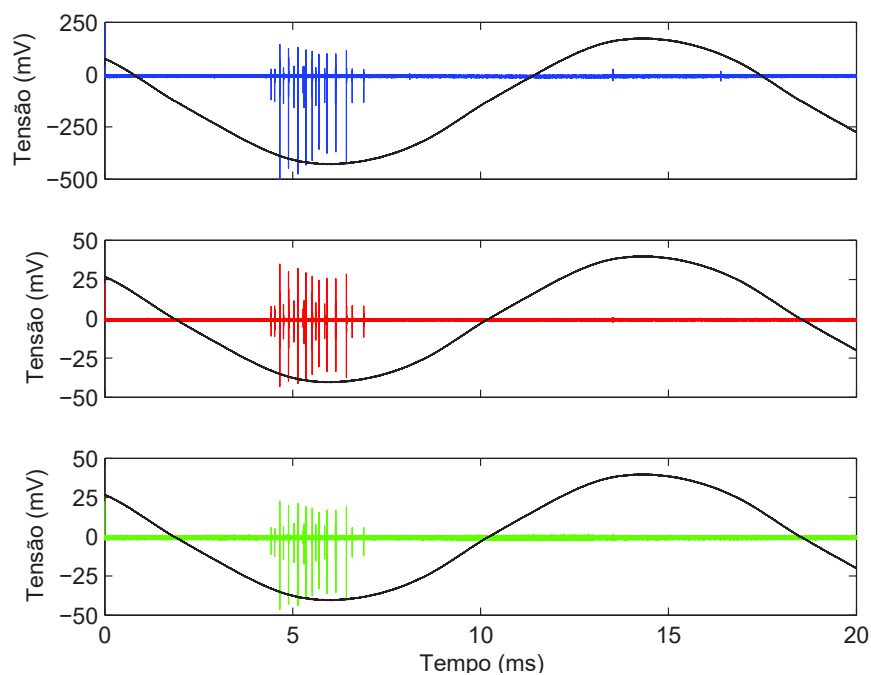
Fonte: produzida pelo autor.

Figura 6.4 – Medição de descargas parciais no PR_C poluído com caulín. Os sinais em azul correspondem as medições com o impedor de medição; os sinais em vermelho correspondem as medições com o HFCT 140-100HC; e os sinais em verde correspondem as medições com o HFCT 200/150.



Fonte: produzida pelo autor.

Figura 6.5 – Medição de descargas parciais no PR_C poluído com bentonita. Os sinais em azul correspondem as medições com o impedor de medição; os sinais em vermelho correspondem as medições com o HFCT 140-100HC; e os sinais em verde correspondem as medições com o HFCT 200/150.



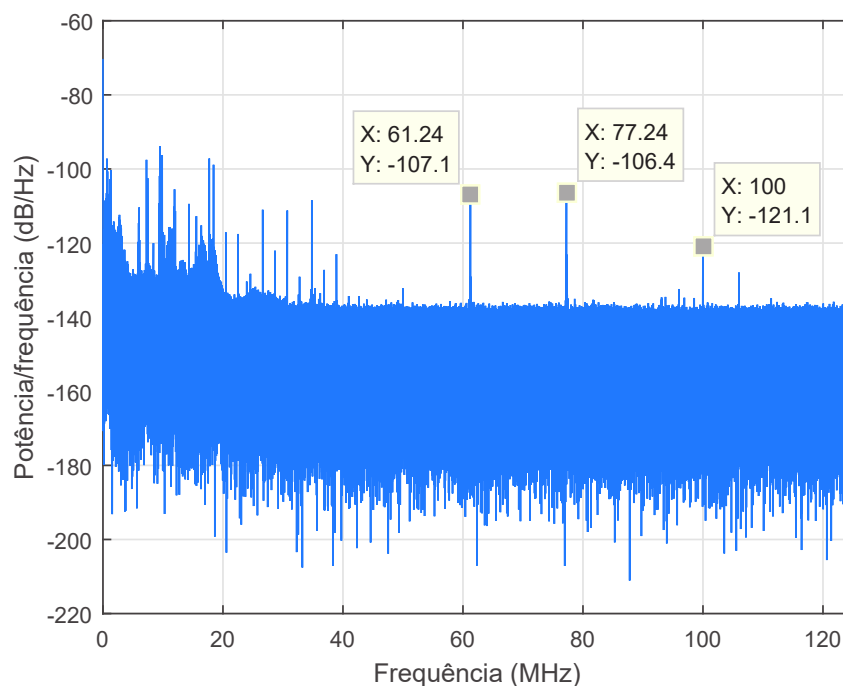
Fonte: produzida pelo autor.

6.2 Densidade Espectral de Potência e Taxa de Amostragem do Sinal

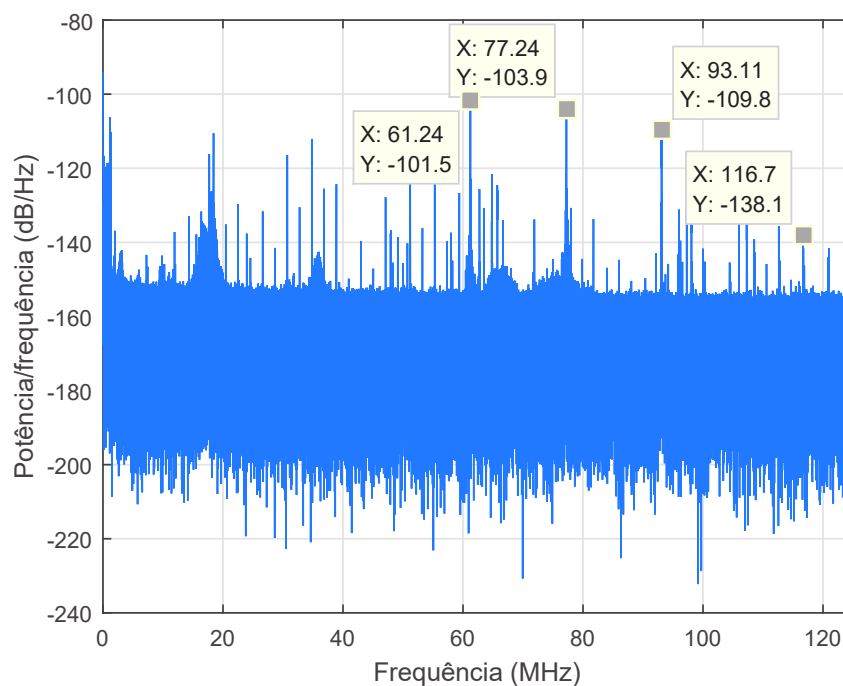
Com o propósito de verificar as componentes em frequência dos pulsos de descargas parciais, e a taxa de amostragem necessária para medições com os sensores utilizados, a seguir é realizada a análise da Densidade Espectral de Potência dos sinais. Nas Figuras 6.6 a 6.8 são apresentadas as DEP para o impedor de medição do arranjo convencional, para o HFCT 140-100HC e para o HFCT 200/150, respectivamente. Nas figuras são destacados alguns pontos de máximos locais.

A partir da análise da DEP dos sinais de descargas parciais medidos com os sensores utilizados, observa-se que a densidade de potência se distribue em uma larga faixa do espectro, acima da largura de banda dos sensores utilizados. Evidenciaram-se componentes dos sinais em até 100 MHz, 116 MHz e 107 MHz, respectivamente, para o impedor de medição, o HFCT 140-100HC e o HFCT 200/150. O resultado comprova que as bordas dos sinais podem conter componentes de frequência significativamente maiores que a largura de banda dos sensores, como destacado por [Keysight Technologies \(2014\)](#). Portanto, em medições de descargas parciais, as frequências verificadas devem ser consideradas as frequências de Nyquist das medições.

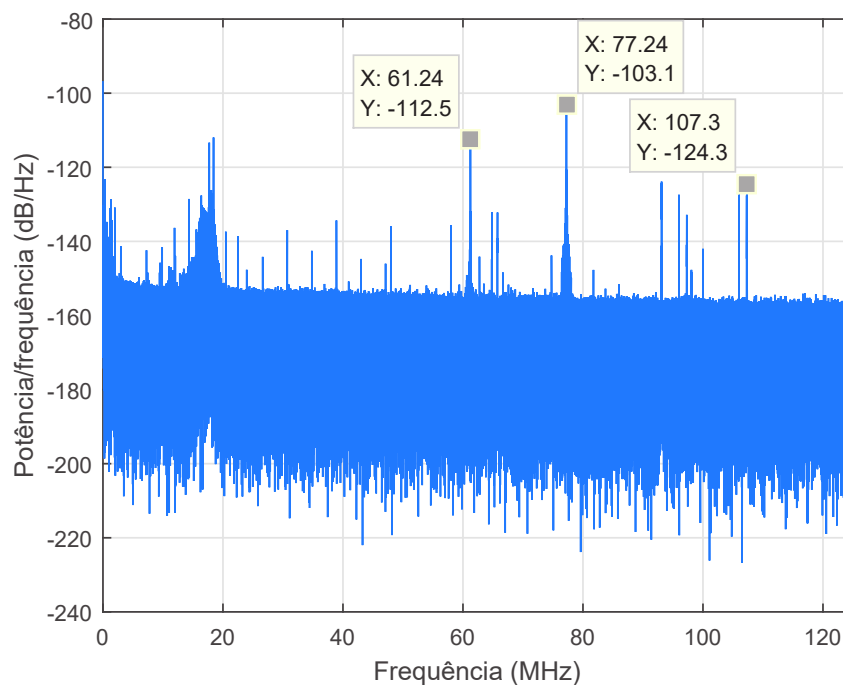
Figura 6.6 – Densidade espectral de potência do impedor de medição do arranjo convencional.



Fonte: produzida pelo autor.

Figura 6.7 – Densidade espectral de potência do HFCT 140-100HC.

Fonte: produzida pelo autor.

Figura 6.8 – Densidade espectral de potência do HFCT 200/150.

Fonte: produzida pelo autor.

A partir das frequências de Nyquist observadas, é possível calcular as taxas de amostragem necessárias para medições de descargas parciais, utilizando os HFCT e o impedor de

medição. Na [Tabela 6.2](#) são apresentados os valores calculados.

Tabela 6.2 – Taxas de amostragem mínimas para medição de descargas parciais, utilizando os HFCT e o impedor de medição.

Sensor	Taxa de Amostragem
Impedor de Medição	200 MSa/s
HFCT 200/150	232 MSa/s
HFCT 140-100HC	214 MSa/s

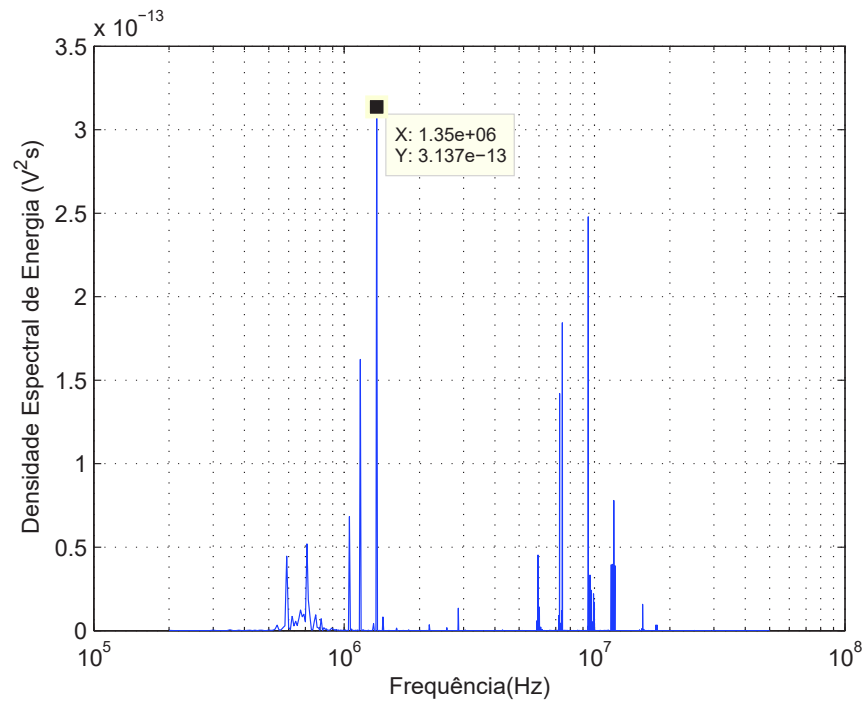
Como pode-se observar, as taxas de amostragem calculadas para medições de descargas parciais são bem próximas dos 250 MSa/s utilizados. Por essa razão, o fator de subamostragem calculado em (5.2) foi 1 (um) e os sinais não foram subamostrados. Caso contrário, haveria perda de informações.

6.3 Filtragem dos Sinais

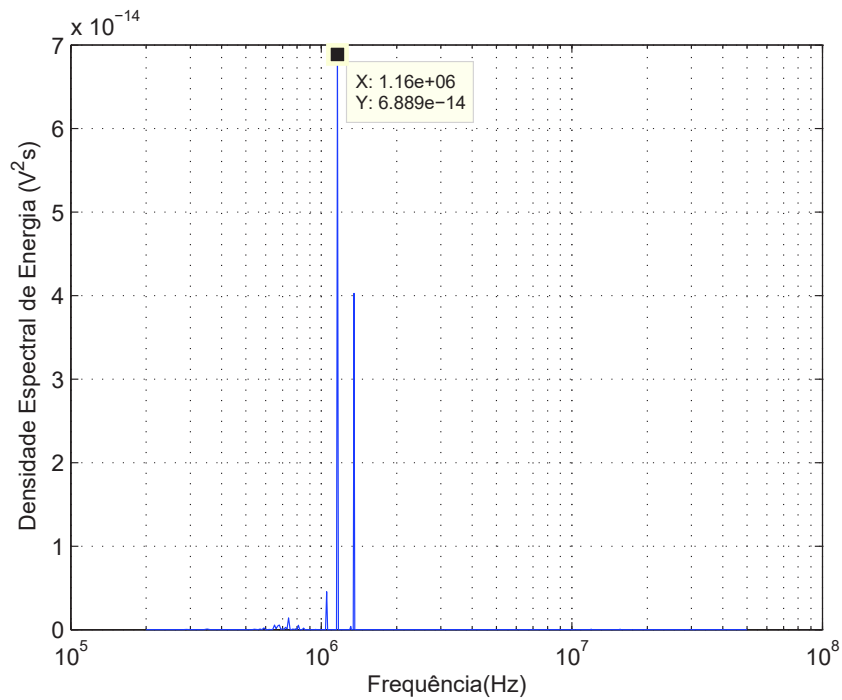
Para a realização de uma filtragem eficiente, utilizando o método de Limiarização de Coeficientes Wavelets, foi realizado um estudo da melhor topologia para filtragem de sinais de descargas parciais. Primeiramente foi realizado o estudo do número de níveis de decomposição necessários no processo de LCW. Em seguida, realizou-se a avaliação da melhor wavelet mãe, a partir de um conjunto de wavelet mães candidatas. Procedeu-se, então, o cálculo dos limiares de ruído (*threshold*) para a filtragem dos sinais. Por fim, obtiveram-se os sinais filtrados.

6.3.1 Número de Níveis de Decomposição

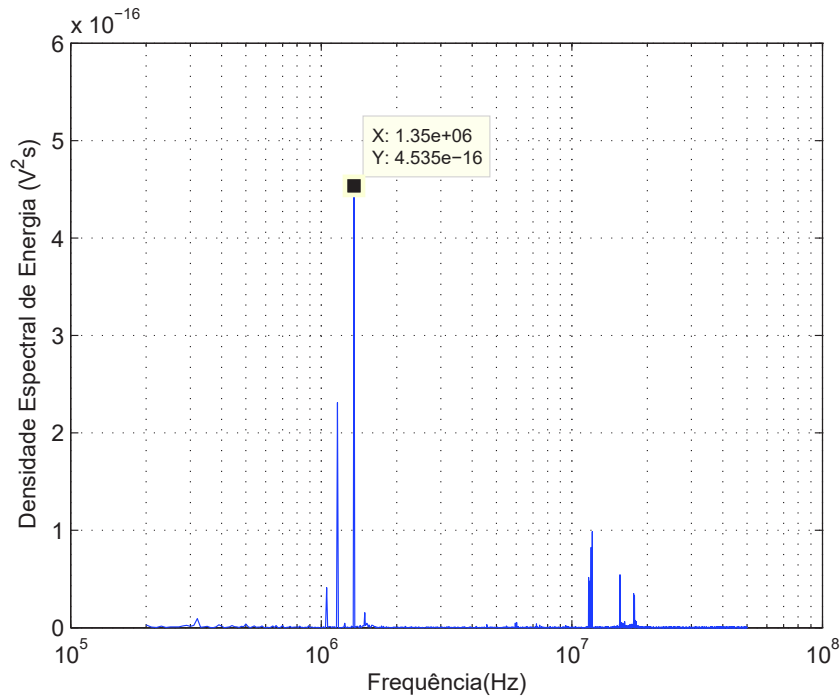
Para o cálculo do número de níveis de decomposição, foi utilizado o algoritmo DNN. Para a aplicação do método, foi calculada a Densidade Espectral de Energia (DEE) das medições de descargas parciais de cada sensor. Nas Figuras 6.9 a 6.11 são apresentadas as DEE para o impedor de medição do arranjo convencional, para o HFCT 140-100HC e para o HFCT 200/150, respectivamente.

Figura 6.9 – Densidade espectral de energia para o impedor de medição do arranjo convencional.

Fonte: produzida pelo autor.

Figura 6.10 – Densidade espectral de energia do HFCT 140-100HC.

Fonte: produzida pelo autor.

Figura 6.11 – Densidade espectral de energia do HFCT 200/150.

Fonte: produzida pelo autor.

A partir das DEE obtidas, calculou-se a frequência (f_{min}) acima da qual 95 % da energia do sinal é conservada. Com a f_{min} calculada, e sabendo que a taxa de amostragem (f_s) do sinal é 250 MSa/s, calculou-se o número de níveis de decomposição, utilizando a Equação 3.14. Na Tabela 6.3 são apresentadas as frequências f_{min} e os níveis de decomposição J_{min} calculados para cada sensor.

Tabela 6.3 – Frequências f_{min} e níveis de decomposição J_{min} calculados para cada sensor.

Sensor	f_{min}	J_{min}
Impedor de Medição	680 kHz	8
HFCT 200/150	1,16 MHz	7
HFCT 140-100HC	1,05 MHz	7

Como pode-se observar, para uma taxa de amostragem $f_s = 250$ MSa/s, são suficientes 8 níveis de decomposição para obter uma filtragem wavelet eficaz dos sinais provenientes do impedor de medição. Para os HFCT, 7 níveis de decomposição são necessários. O resultado foi

utilizado nas análises que se seguem.

Para medições realizadas com taxas de amostragem f_s diferentes de 250 MSa/s, o cálculo do número de níveis de decomposição pode ser realizada sem a necessidade de calcular a DEE dos sinais. Deve-se utilizar a f_{min} calculada (Tabela 6.3) e aplicar a fórmula a seguir (CARVALHO *et al.*, 2015):

$$J = fix \left[\frac{\log_2 \left(\frac{f_s}{2\gamma f_{min}} \right)}{\log_2 \left(\frac{1}{\gamma} \right)} \right]. \quad (6.1)$$

Caso se esteja utilizando filtros ortogonais, a equação acima é simplificada para:

$$J = fix \left[\log_2 \left(\frac{f_s}{f_{min}} \right) \right]. \quad (6.2)$$

6.3.2 Escolha da Wavelet Mãe

Após a determinação do número mínimo de níveis de decomposição para cada sensor utilizado, procedeu-se a análise da melhor wavelet mãe para a filtragem dos dados. Para tanto, avaliou-se o banco de filtros apresentado na Tabela 5.2 e se escolheu a wavelet mãe que maximiza o módulo dos coeficientes da Transformada Wavelet Estacionária (SWT) do sinal, conforme o método SWTBWS proposto por Carvalho *et al.* (2015).

Na Tabela 6.4 são apresentadas as melhores topologias wavelet avaliadas no processo de seleção. Verificou-se que, para todos os sensores, a ‘sym11’ é a wavelet mãe que apresenta melhores resultados no processo de filtragem.

Tabela 6.4 – Wavelet mãe selecionada e níveis de decomposição calculados.

Sensor	Wavelet Mãe	J_{min}
Impedor de Medição	‘sym11’	8
HFCT 200/150	‘sym11’	7
HFCT 140-100HC	‘sym11’	7

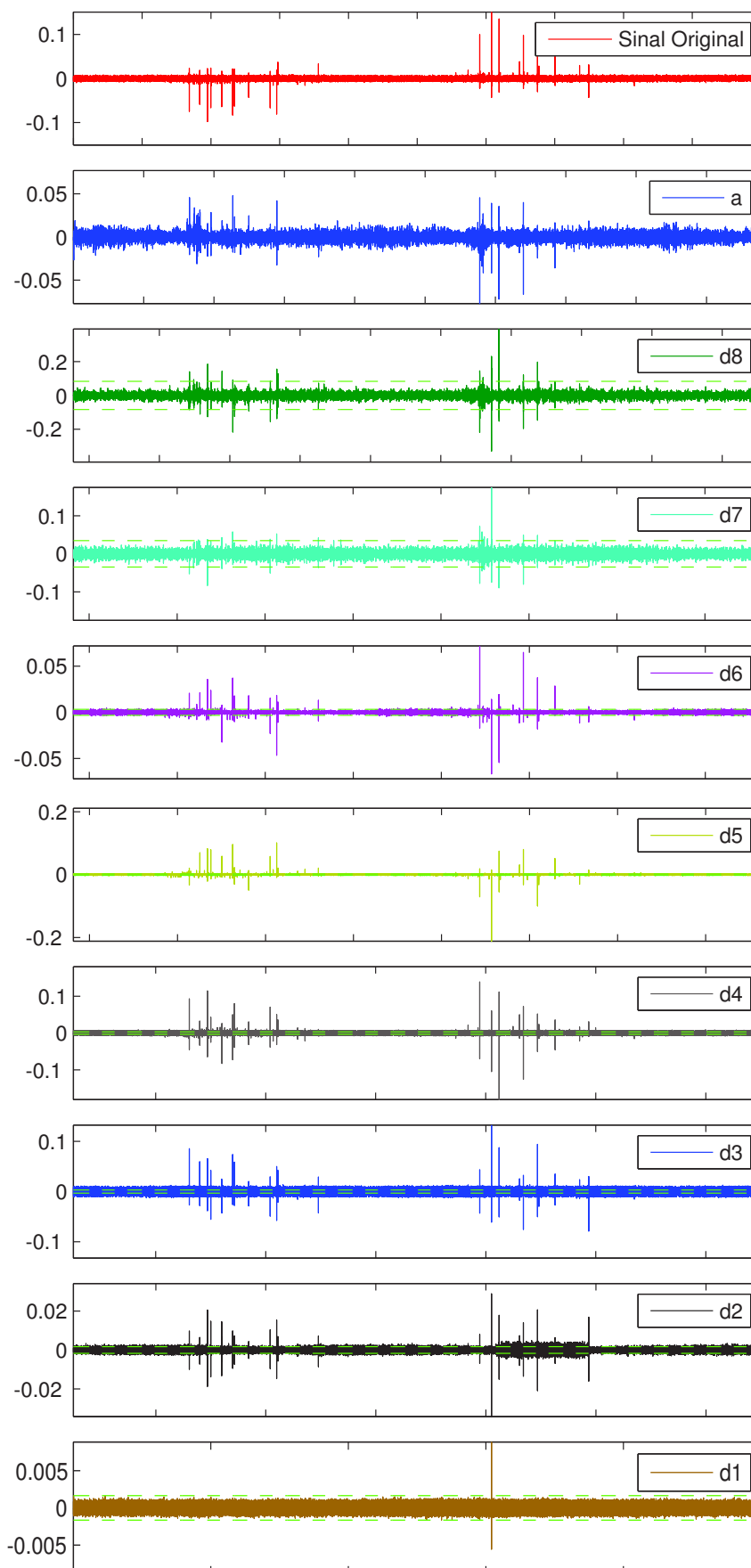
6.3.3 Limiarização dos Coeficientes Wavelet

A fim de observar o processo de Limiarização de Coeficientes Wavelets, nas Figuras 6.12 a 6.14 são apresentados os coeficientes wavelets de aproximação (a), de detalhes (d1 a d8) e os

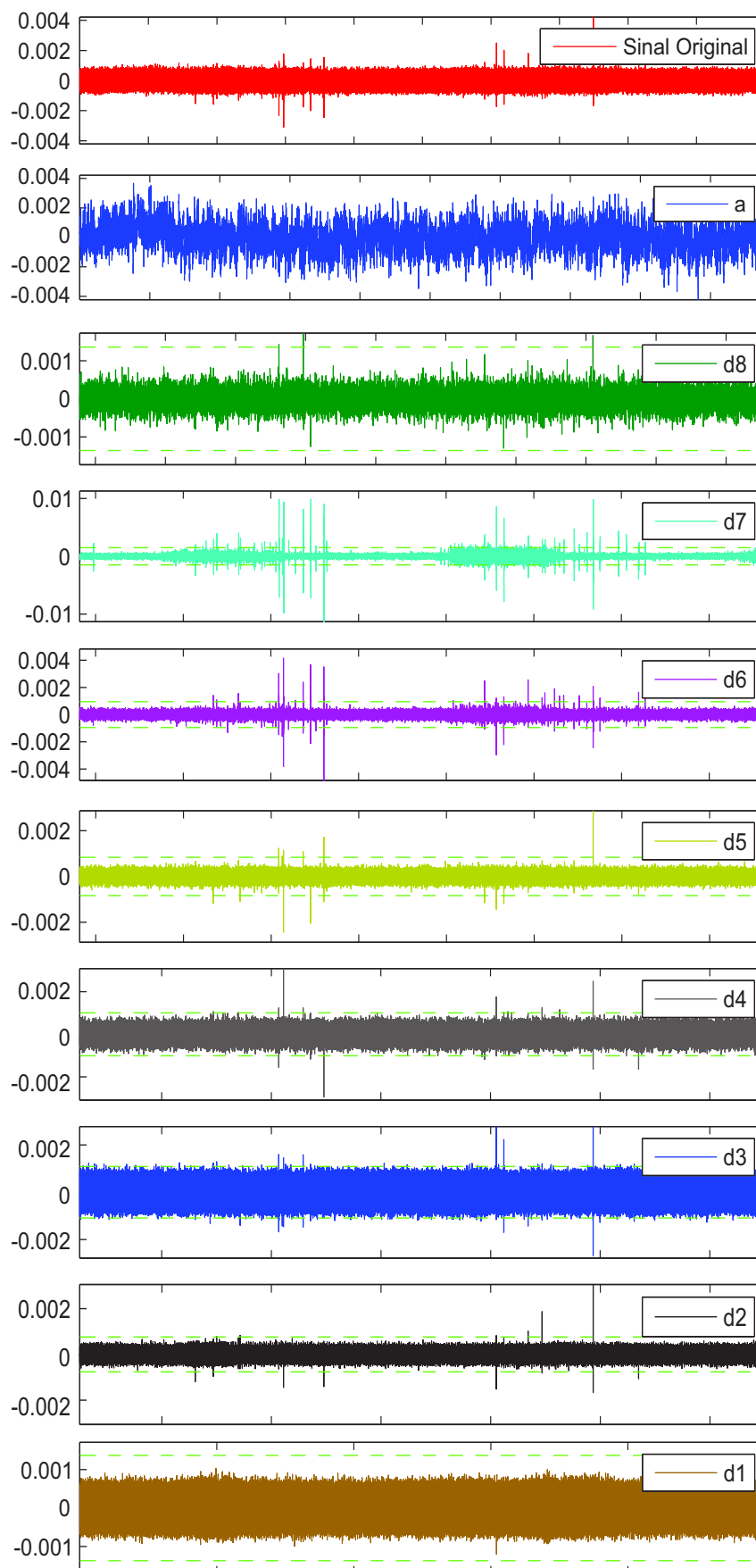
limiares de ruídos (linhas pontilhas em verde) calculados. Os dados apresentados correspondem ao impedor de medição e os dois HFCT, para uma medição realizada no PR_B .

A partir das figuras, é possível verificar que em cada nível de decomposição existem coeficientes correspondentes ao ruído branco (distribuídos em toda a faixa dos coeficientes). Verificam-se também coeficientes correspondentes às descargas parciais, representados em formas de pulsos. Os limiares de ruído calculados estão em sua maioria acima da faixa do ruído. Portanto, o uso do *Threshold Universal* como estratégia de limiarização apresentou resultados conservativos.

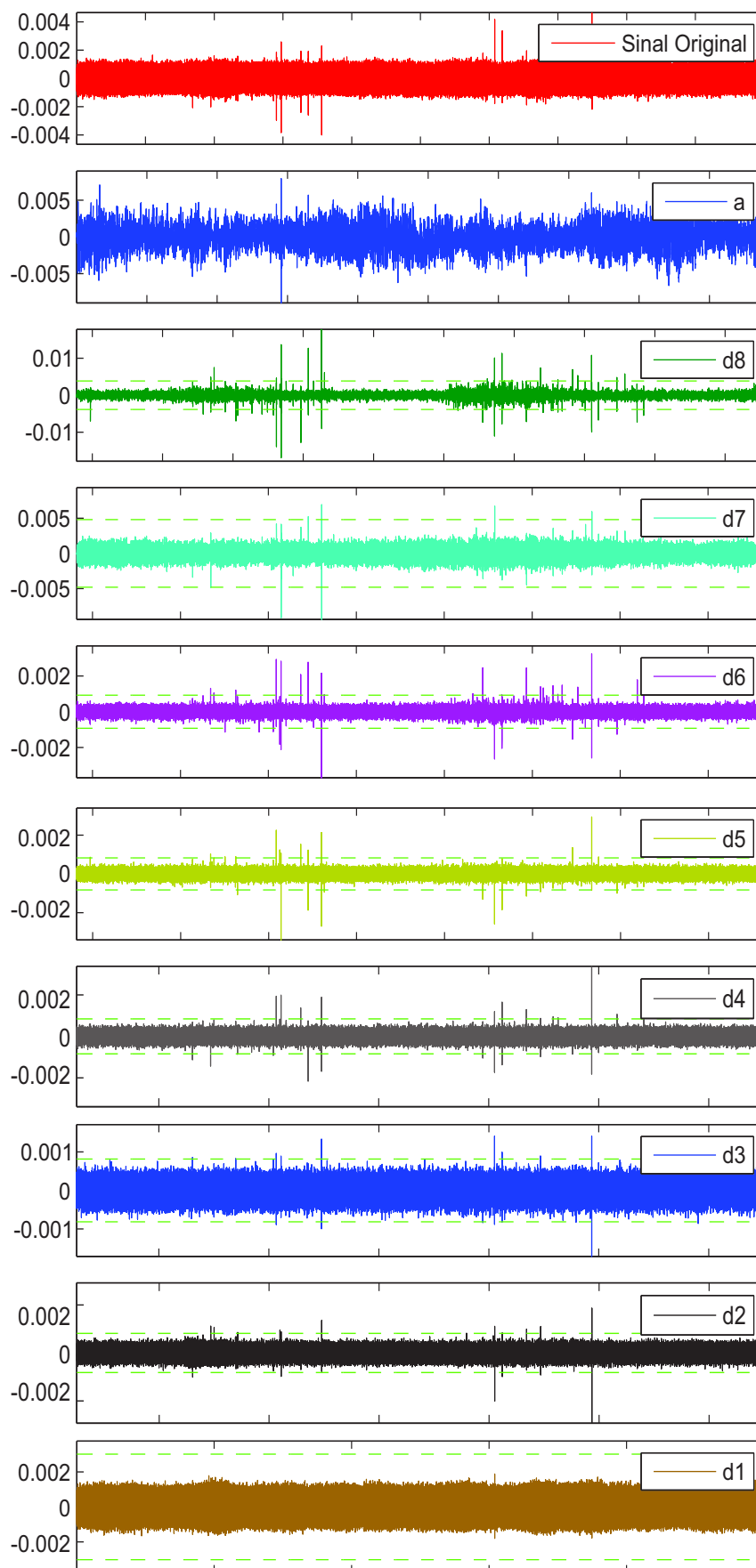
Figura 6.12 – Coeficientes wavelets e limiares de ruído calculados para o impedor de medição do arranjo convencional.



Fonte: produzida pelo autor.

Figura 6.13 – Coeficientes wavelets e limiares de ruído calculados para o HFCT 140-100HC.

Fonte: produzida pelo autor.

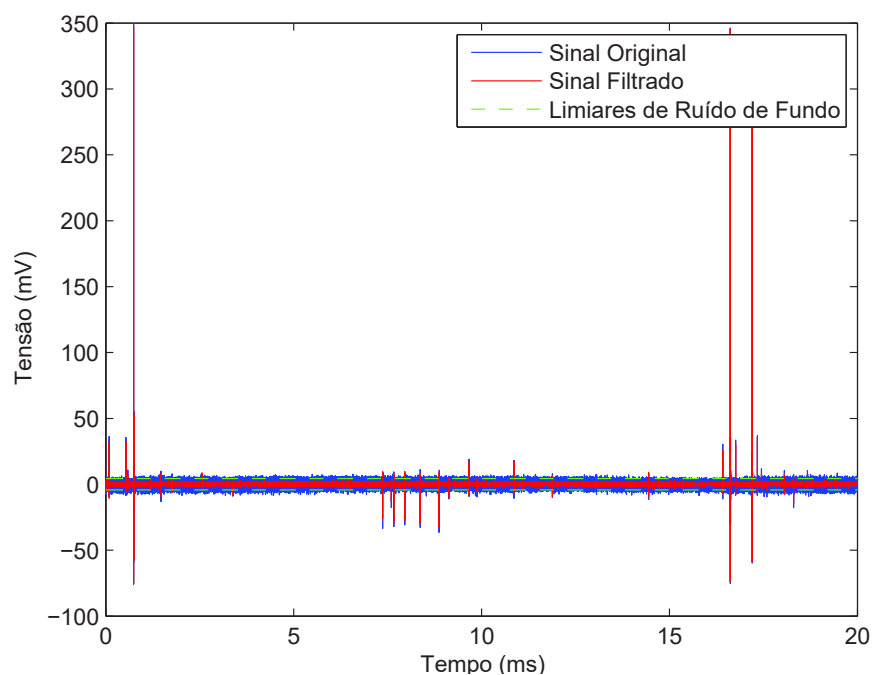
Figura 6.14 – Coeficientes wavelets e limiares de ruído calculados para o HFCT 200/150.

Fonte: produzida pelo autor.

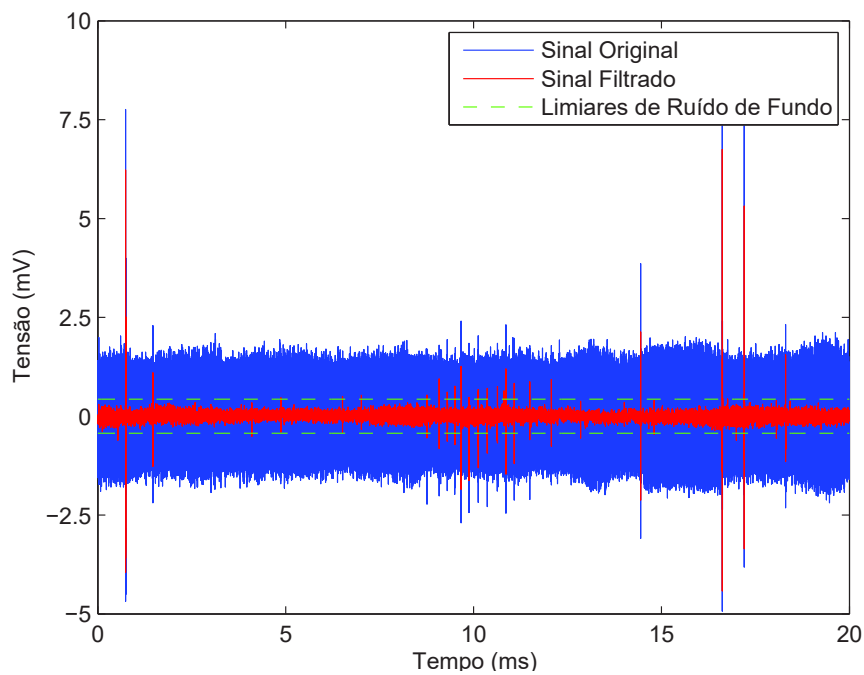
6.3.4 Resultado da Filtragem

Nas Figuras 6.15 a 6.17 são apresentados os resultados do processo de filtragem. As linhas pontilhadas em verde são os novos limiares de ruído de fundo utilizados na estratégia de detecção de cruzamento de nível, para identificação dos pulsos de descargas parciais. Os novos limiares são importante para a geração dos gráficos PRPD, conforme detalhado nos Capítulos 2 e 5. Como pode-se observar, o ruído branco existente no sinal original foi parcialmente suprimido, permitindo a identificação de pulsos de descargas parciais com magnitude próximo ao ruído anteriormente existente. Portanto, o processo de filtragem mostrou-se necessário para viabilizar a identificação de pulsos de menor magnitude.

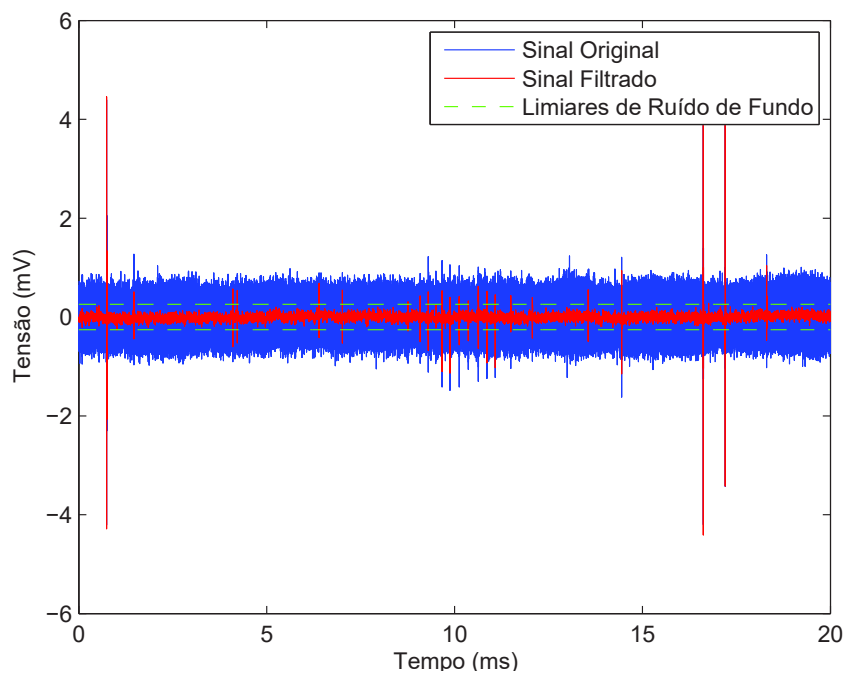
Figura 6.15 – Resultado do processo de filtragem para o impedor de medição do arranjo convencional.



Fonte: produzida pelo autor.

Figura 6.16 – Resultado do processo de filtragem para o HFCT 140-100HC.

Fonte: produzida pelo autor.

Figura 6.17 – Resultado do processo de filtragem para o HFCT 200/150.

Fonte: produzida pelo autor.

6.4 Gráficos PRPD

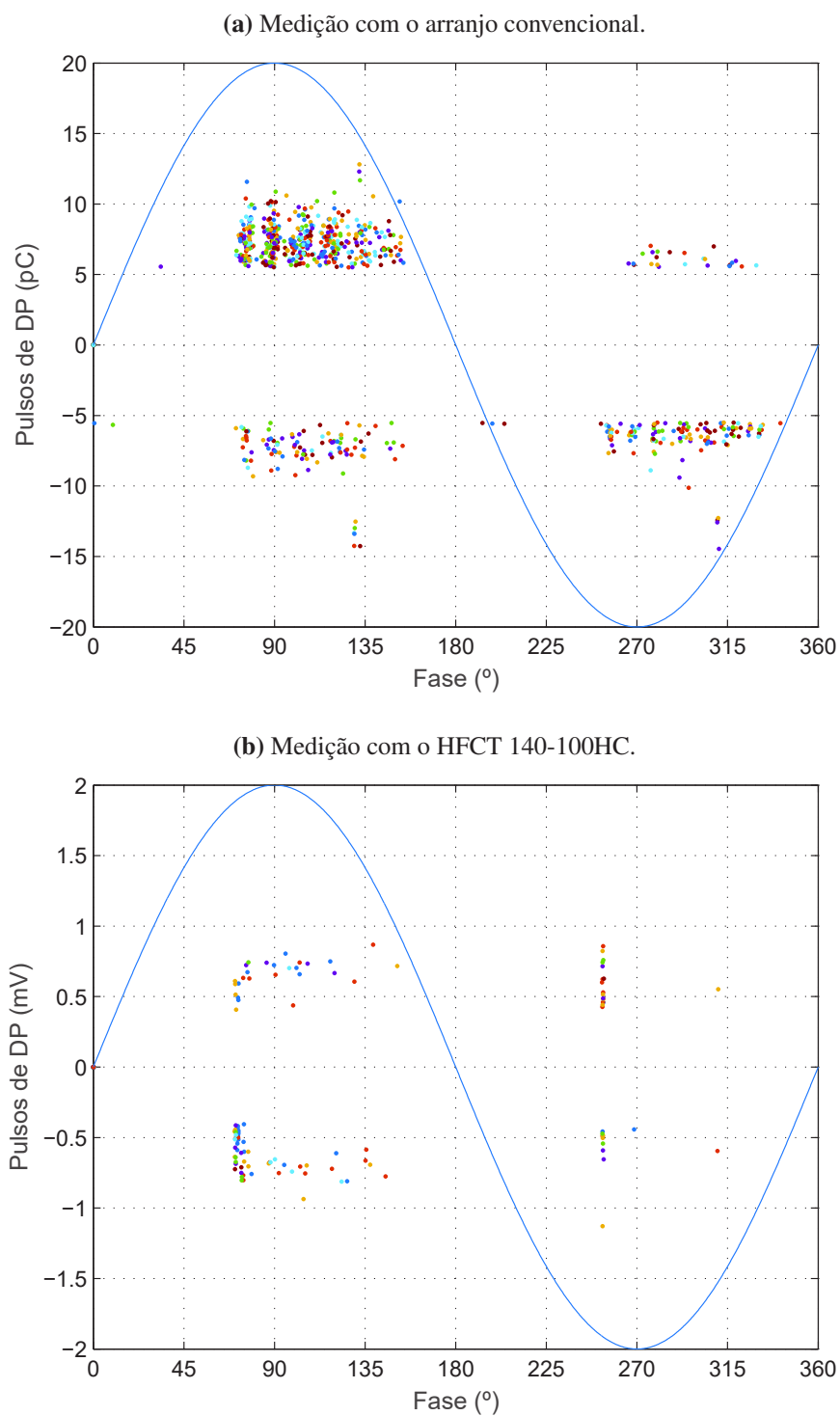
A fim de verificar o comportamento médio das descargas parciais, em função da fase da tensão aplicada, foram construídos gráficos PRPD para cada um dos ensaios realizados. Nas Figuras 6.18 a 6.18 são apresentados os gráficos obtidos. A forma de onda senoidal nas figuras é a representação de uma amostra da tensão aplicada ao objeto sob estresse elétrico. Os pontos representam os pulsos de descargas parciais identificados, com indicação da localização, magnitude e polaridade. A seguir é discutido brevemente cada resultado obtido.

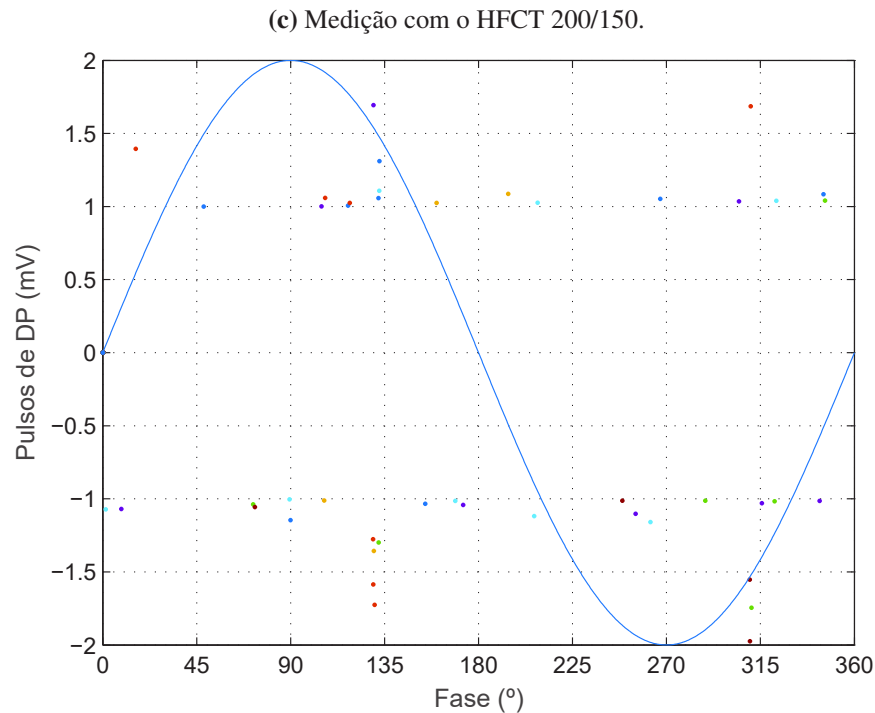
6.4.1 Medição no PR_A

Na Figura 6.18 é apresentado o gráfico PRPD para a medição realizada no PR_A . Conforme pode-se observar, na medição com o arranjo convencional (Figura 6.18a) foram identificados pulsos de baixa intensidade, com valores de até aproximadamente 15 pC. De igual modo, com os HFCT também foram identificados pulsos. No entanto, em quantidades menores.

Como o PR_A é um para-raios novo, e aparentemente sem defeito, provavelmente os pulsos identificados são devido ao ruído ambiente. Isso pode ocorrer porque o capacitor de acoplamento é uma antena exposta a interferências externas e, portanto, mais susceptível a captar ruídos ambiente. Essa premissa é fortalecida pelo fato de os HFCT identificarem menos pulsos que o arranjo convencional (ver Figuras 6.18b e 6.18c).

Figura 6.18 – Gráficos PRPD para a medição de descargas parciais realizada no PR_A . A forma de onda senoidal é a representação da tensão aplicada. Os pontos representam os pulsos de descargas parciais identificados.





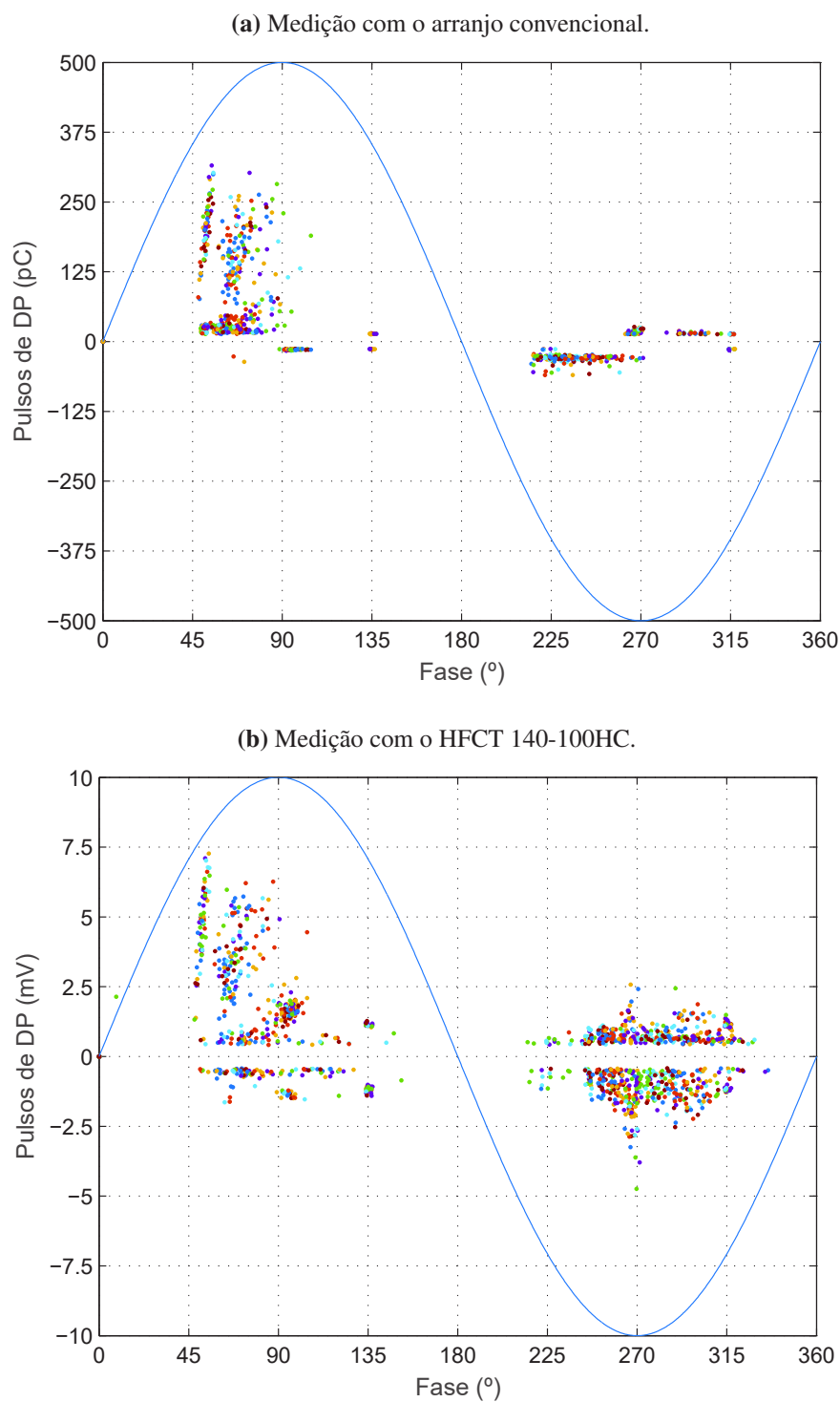
Fonte: produzida pelo autor.

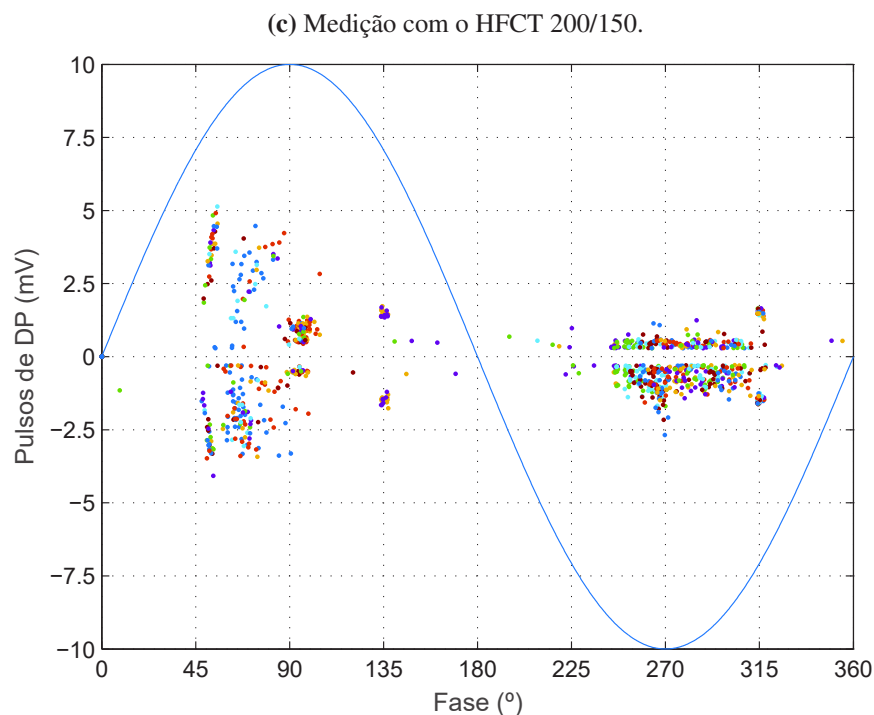
Como será mostrado adiante, as medições realizadas apresentaram níveis de descargas parciais muito acima do possível limiar de ruído de 15 pC. Portanto, o nível de interferência observado não é significativo no processo de correlação dos HFCT.

6.4.2 Medição no PR_B

Na [Figura 6.18](#) são apresentados os resultados da medição realizada no PR_B . Foram observados pulsos de descargas parciais da ordem de 300 pC, em sua maioria localizados entre os ângulos de fase 45° e 90° . Os HFCT identificaram a maioria dos pulsos obtidos com o impedor de medição. Como no PR_B não foram inseridos defeitos artificiais, o resultado mostra que o para-raios apresentava falhas internas e os HFCT foram capazes de identificá-las.

Figura 6.18 – Gráficos PRPD para a medição de descargas parciais realizada no PR_B . A forma de onda senoidal é a representação da tensão aplicada. Os pontos representam os pulsos de descargas parciais identificados.



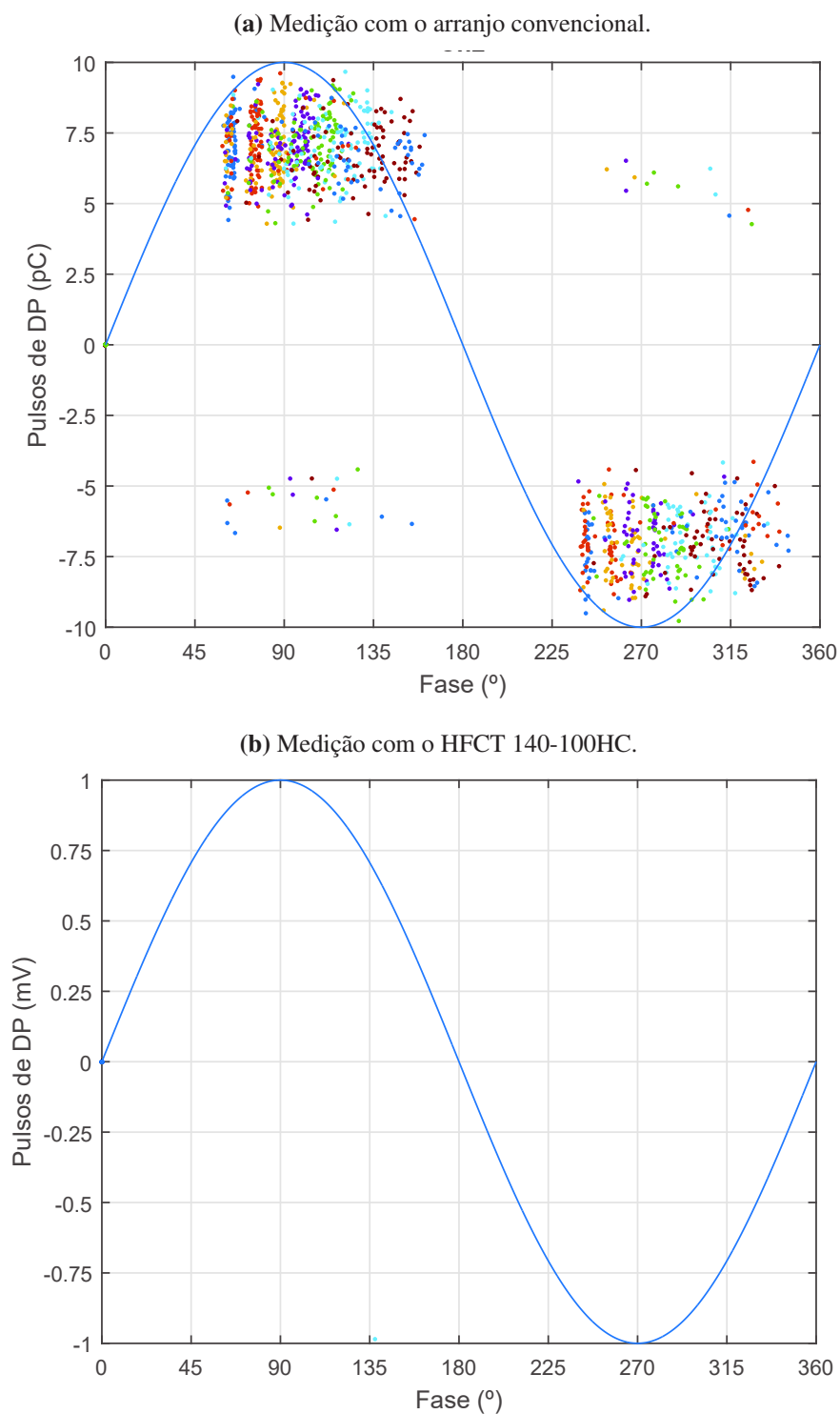


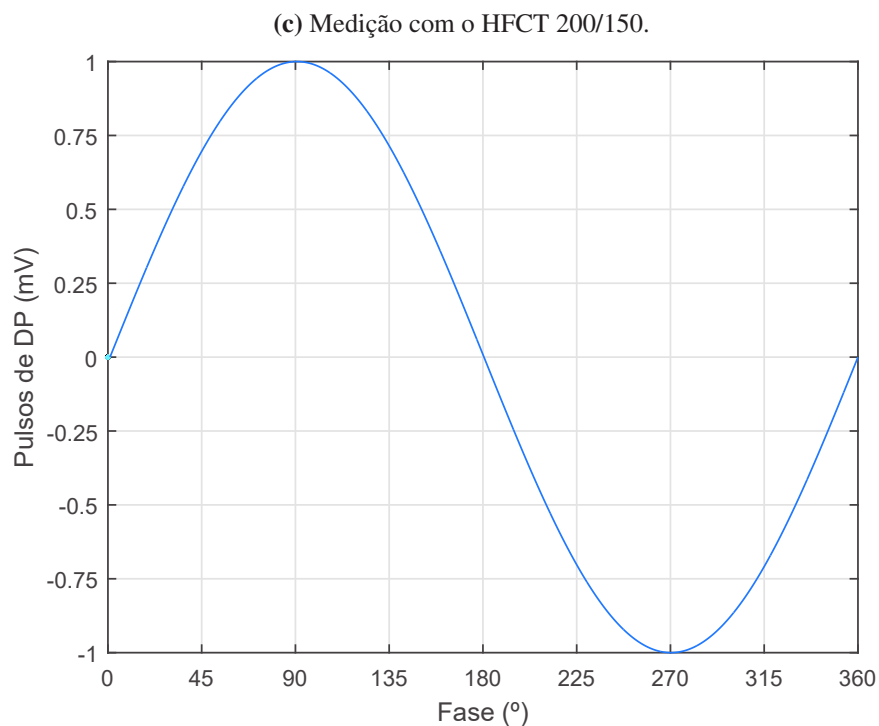
Fonte: produzida pelo autor.

6.4.3 Medição no PR_C Limpo

Na [Figura 6.18](#) são apresentados os resultados da medição realizada no PR_C limpo. Foram observados pulsos de descargas parciais de até 10 pC com o impedor de medição. Comparando-se aos resultados obtidos com o PR_B , observaram-se níveis de descargas parciais no PR_C significativamente menores. Por essa razão ele foi escolhido para inserção de defeitos artificiais. No que diz respeito à medição com os HFCT, não foi possível identificar pulsos nos sinais obtidos. A causa pode ser atribuída à falta de sensibilidade nos sensores ou ao processo de filtragem e identificação dos pulsos, que não mostrou-se eficaz. Como não foram identificadas descargas parciais, o resultado desse arranjo de medição não foi utilizado no processo de correlação dos HFCT.

Figura 6.18 – Gráficos PRPD para a medição de descargas parciais realizada no PR_C limpo. A forma de onda senoidal é a representação da tensão aplicada. Os pontos representam os pulsos de descargas parciais identificados.

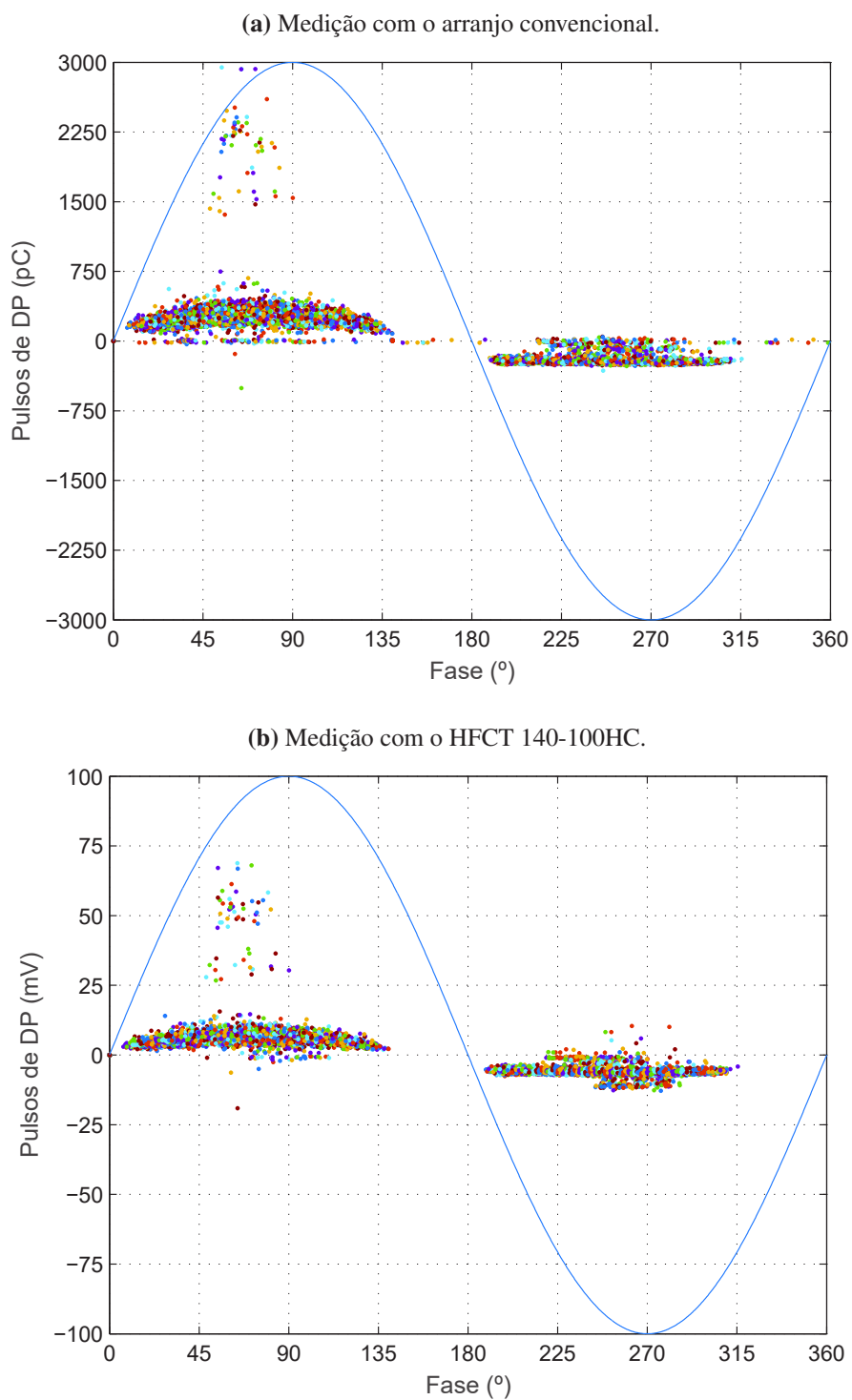


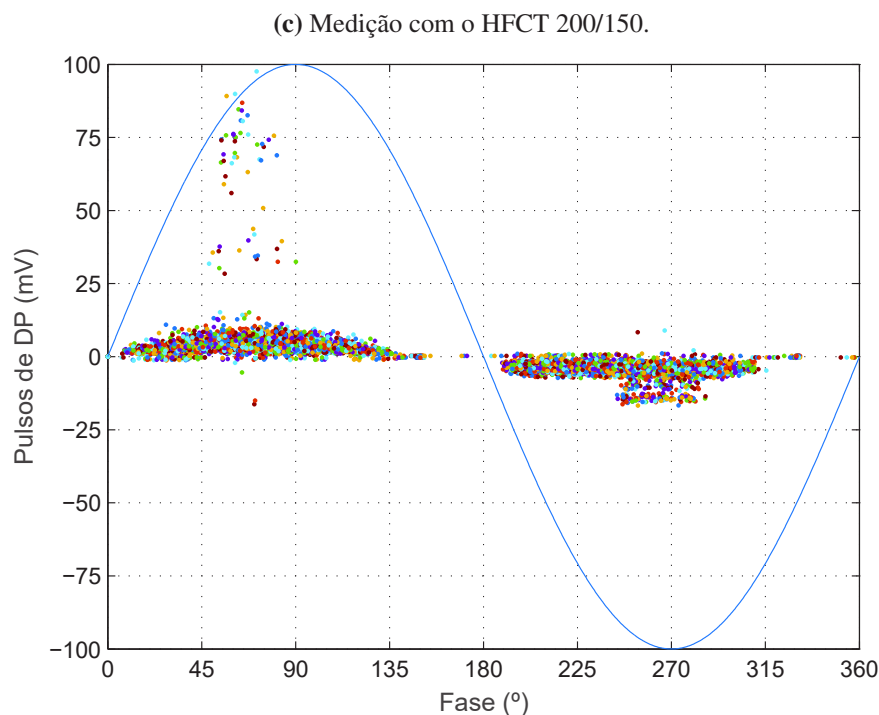


6.4.4 Medição no PR_C com Poluição à Base de Caulin

Na [Figura 6.18](#) são apresentados os resultados da medição realizada no PR_C com poluição à base de caulin. Foram observados pulsos de descargas parciais da ordem de 3000 pC. Além disso, comparando as [Figuras 6.18 e 6.18](#), verificou-se que a poluição, além de aumentar o nível das descargas parciais, aumentou o número de pulsos detectados e ampliou a faixa a sua faixa, em relação à fase da tensão. O resultado comprova que a poluição superficial pode aumentar o número de pulsos de descargas parciais detectados. No entanto, estudos mais detalhados são necessárias para localizá-los, isto é, identificar se eles ocorrem interiormente ou na superfície do para-raios. De todo modo, independente da localização dos pulsos, o processo de detecção com os HFCT mostrou-se eficaz.

Figura 6.18 – Gráficos PRPD para a medição de descargas parciais realizada no PR_C poluído com solução à base de caulim. A forma de onda senoidal é a representação da tensão aplicada. Os pontos representam os pulsos de descargas parciais identificados.



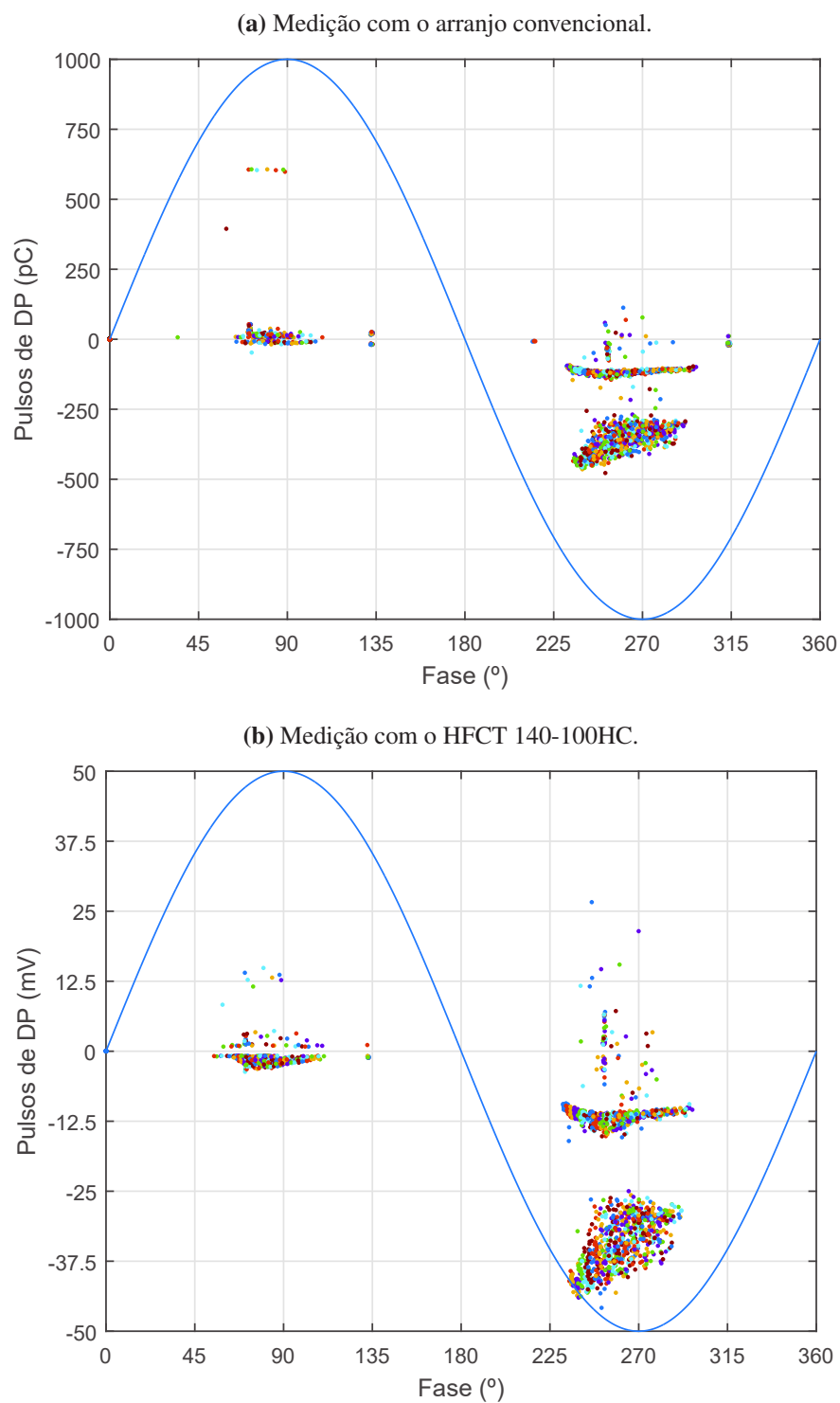


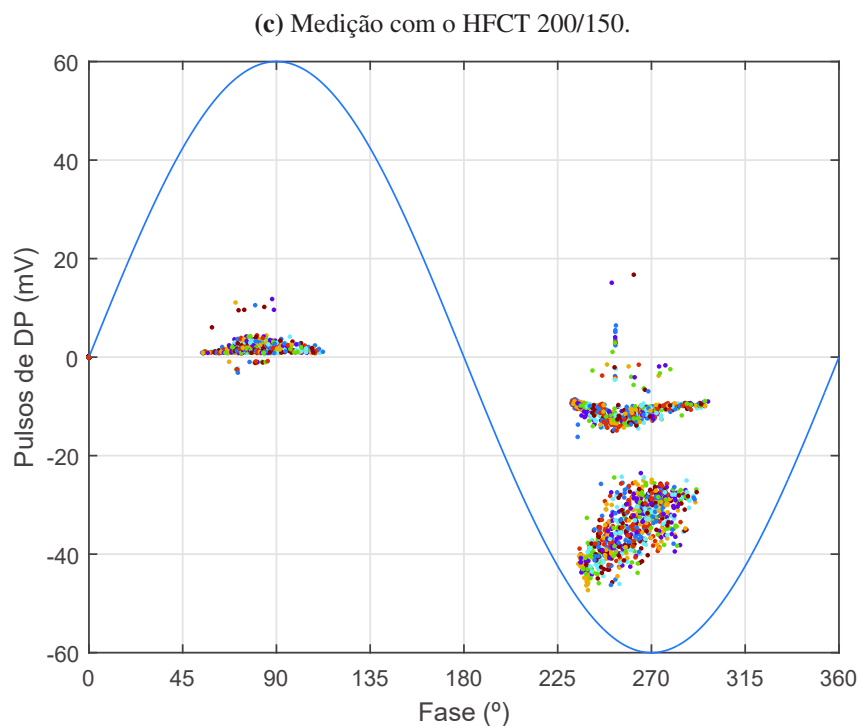
6.4.5 Medição no PR_C com Poluição à Base de Bentonita

Na [Figura 6.18](#) são apresentados os resultados da medição realizada no PR_C com poluição à base de bentonita. Foram observados pulsos de descargas parciais da ordem de 500 pC (com polaridade negativa). Comparando o resultado das medições de descargas parciais com as poluições à base de bentonita e caulim, verificou-se que a poluição à base de bentonita provocou descargas parciais de menores intensidades no para-raios. Além disso, os pulsos aparecem, em sua maioria, no semiciclo negativo da onda de tensão (enquanto para a poluição à base de caulim apareceram em sua maioria no semiciclo positivo).

De modo semelhante à medição no PR_C com poluição à base de caulim, o processo de detecção com os HFCT mostrou-se eficaz. No entanto, estudos mais detalhados são necessárias para localizar os pulsos no para-raios.

Figura 6.18 – Gráficos PRPD para a medição de descargas parciais realizada no PR_C poluído com solução à base de bentonita. A forma de onda senoidal é a representação da tensão aplicada. Os pontos representam os pulsos de descargas parciais identificados.

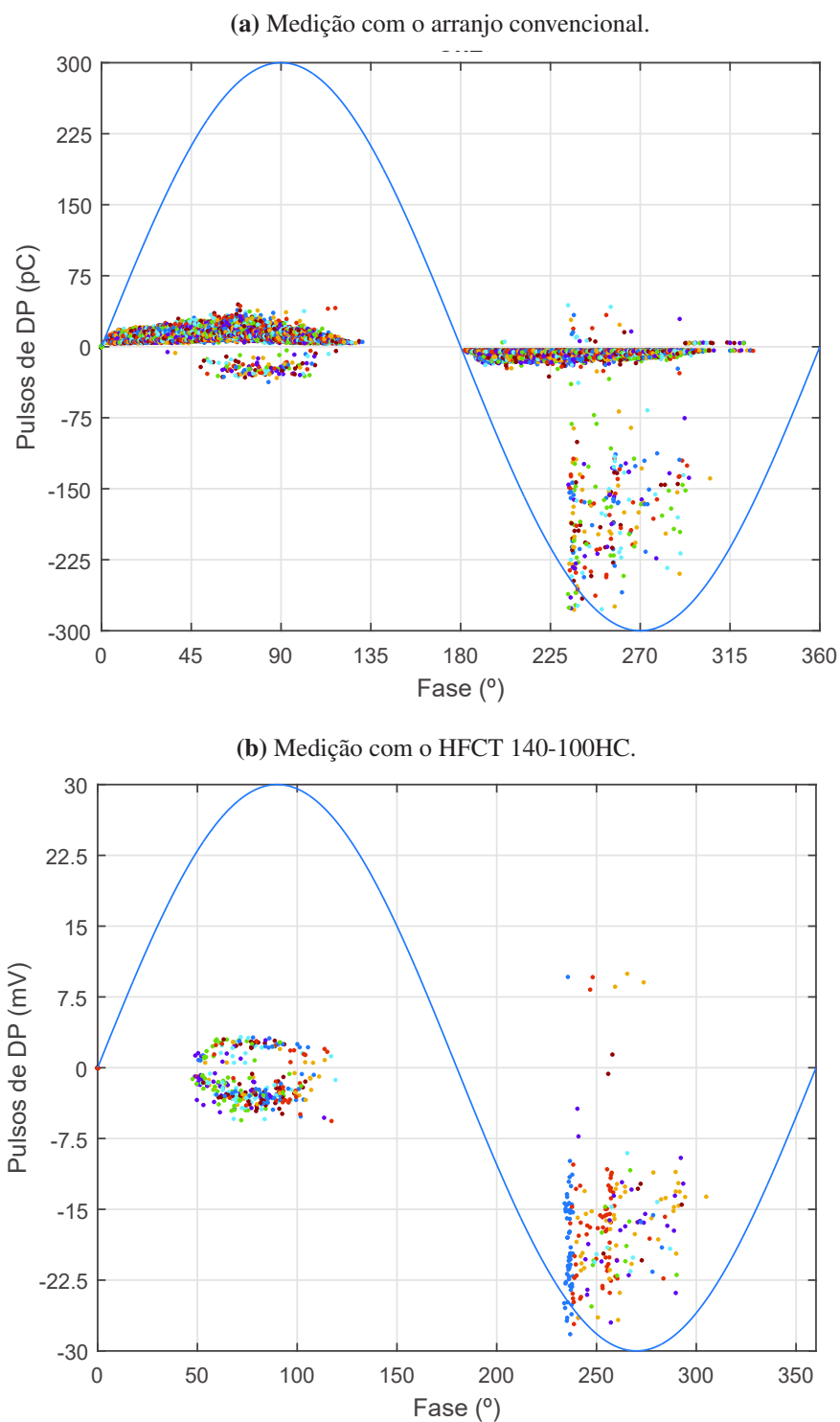


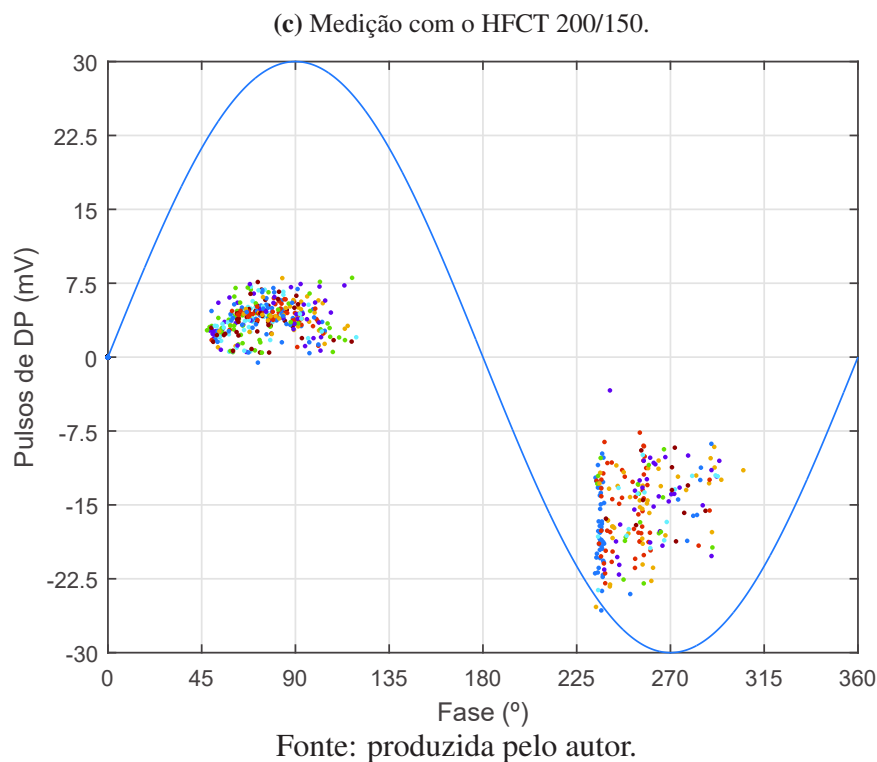


6.4.6 Medição no PR_C com Umidade Interna

Na [Figura 6.18](#) são apresentados os resultados da medição realizada no PR_C com a presença de umidade interna. Verificaram-se pulsos de descargas parciais de aproximadamente 300 pC, em sua maioria no semiciclo negativo da onda de tensão. O resultado comprova que a presença de umidade interna, devido à perda de estanqueidade do para-raios, pode provocar descargas parciais. Os HFCT foram capazes de identificar os pulsos de descargas parciais.

Figura 6.18 – Gráficos PRPD para a medição de descargas parciais realizada no PR_C com umidade interna. A forma de onda senoidal é a representação da tensão aplicada. Os pontos representam os pulsos de descargas parciais identificados.





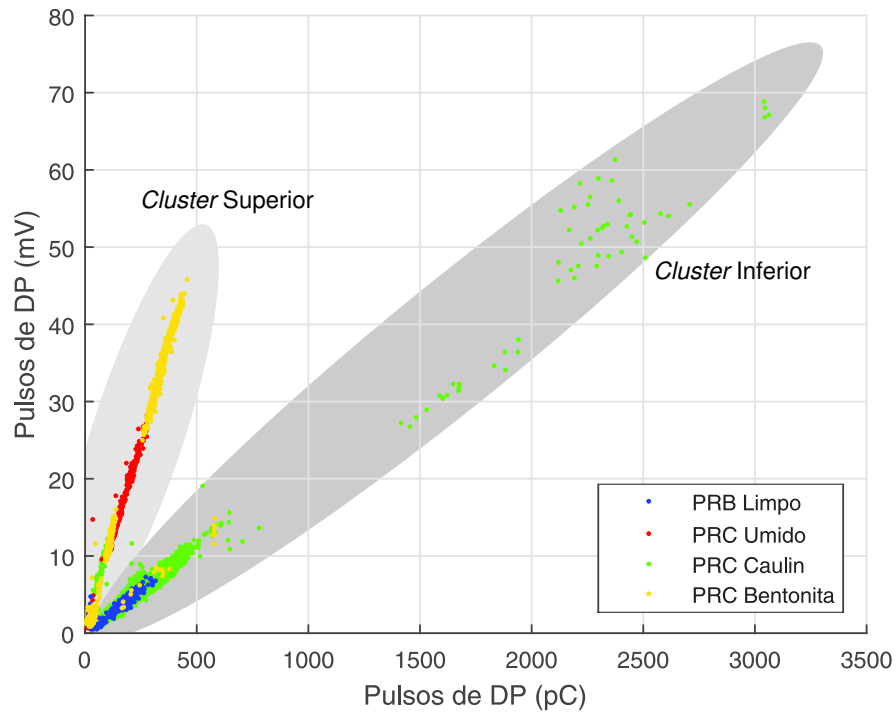
A partir dos resultados obtidos, foi possível realizar a construção de gráficos PRPD com sucesso, utilizando o processo de filtragem e identificação dos pulsos. Cada defeito simulado permitiu a geração de sinais de descargas parciais com características bem definidas e diferentes entre si, principalmente na magnitude e localização dos pulsos em relação à fase da tensão. As medições com os HFCT mostraram-se eficazes e apresentaram alta sensibilidade, sendo capazes de identificar pulsos de descargas parciais de 15 a 3000 pC.

6.5 Parametrização dos HFCT

Com o objetivo de verificar a relação entre os pulsos obtidos com o arranjo convencional e os HFCT, nas Figuras 6.18 e 6.19 são apresentados, em um mesmo gráfico, os pulsos identificados no mesmo instante de tempo (com uma tolerância ϵ). Pode-se observar um conjunto de pares ordenados (Q_i, V_i) , onde Q_i representa a carga obtida para um pulso i pelo método convencional e V_i a tensão obtida pelo HFCT.

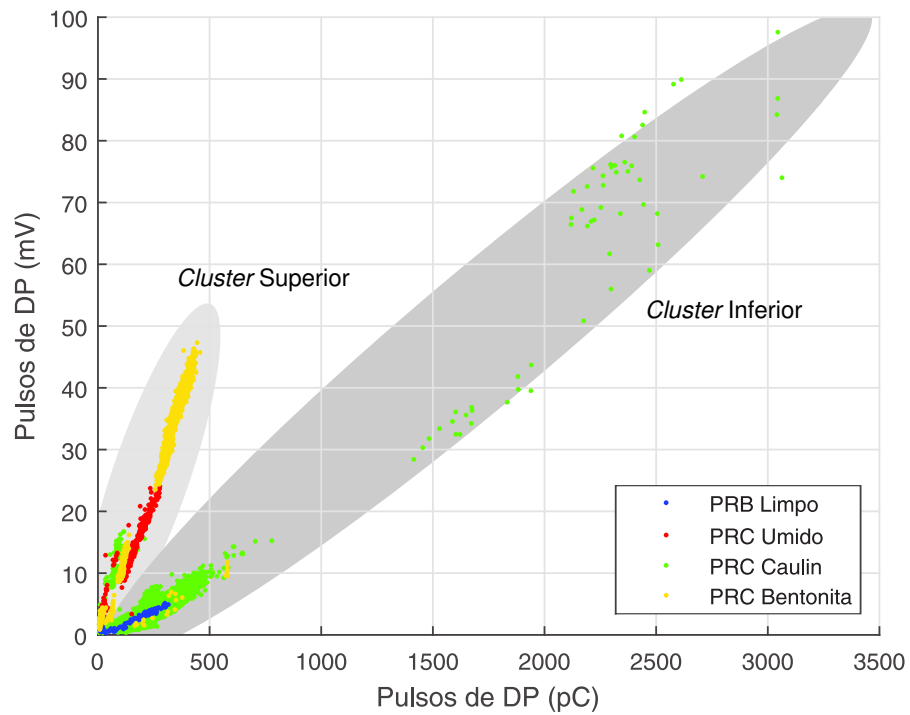
A partir dos dados obtidos, verificaram-se pulsos distribuídos em regiões bem definidas no plano bidimensional. Nas figuras pode-se observar claramente dois *clusters* onde os pulsos estão localizados. Os *clusters* estão nomeados como *Cluster Superior* e *Cluster Inferior*.

Figura 6.18 – Pares ordenados identificados para o HFCT 140-100HC.



Fonte: produzida pelo autor.

Figura 6.19 – Pares ordenados identificados para o HFCT 200/150.



Fonte: produzida pelo autor.

Para explicar porque os pulsos se distribuíram em duas regiões distintas e bem definidas no plano bidimensional, três hipóteses foram levantadas e discutidas brevemente a seguir. Dentre elas, acredita-se que somente a última é verdadeira.

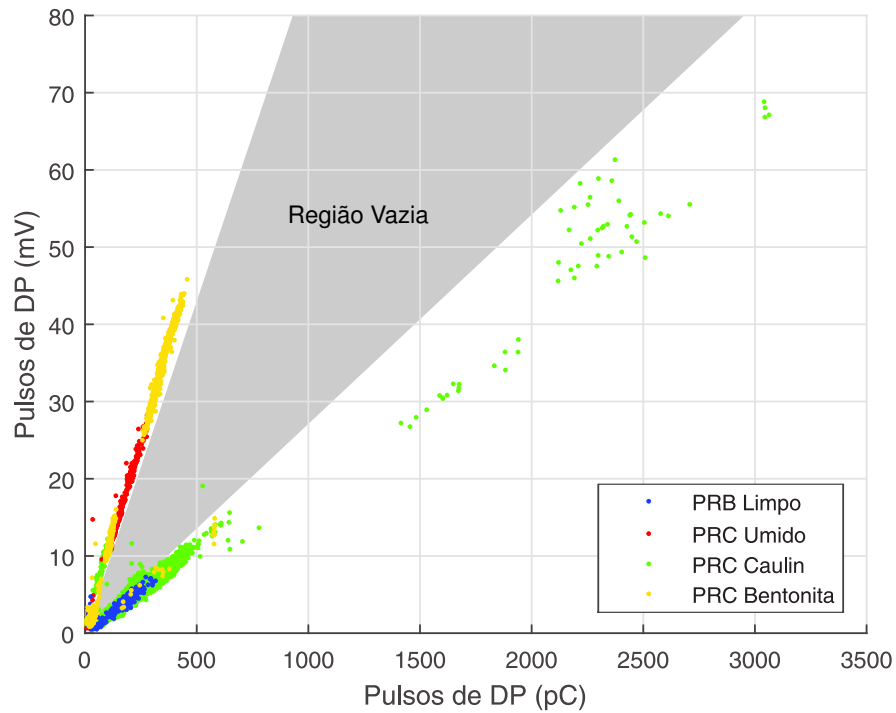
Hipótese 1: Erro de medição

A primeira hipótese é que os dois *clusters* foram obtidos devido a erros de escala na medição. No entanto, duas razões são apresentadas para contrapor essa hipótese. Primeiramente, durante os ensaios realizados não foram feitas alterações no sistema de aquisição que possa provocar mudança de escala nas medições. Em seguida, observa-se, nas Figuras 6.18 e 6.19, que as medições com o para-raios limpo, com o para-raios poluído à base de caulim e com o para-raios poluído à base de bentonita apresentaram pulsos localizados simultaneamente nos *Cluster Superior* e *Cluster Inferior*. Portanto, se houvesse ocorrido erro de escala na medição, ele afetaria todos os pulsos de uma mesma maneira, em uma mesma medição.

Hipótese 2: Os *clusters* representam diferentes localizações no eixo longitudinal do para-raios

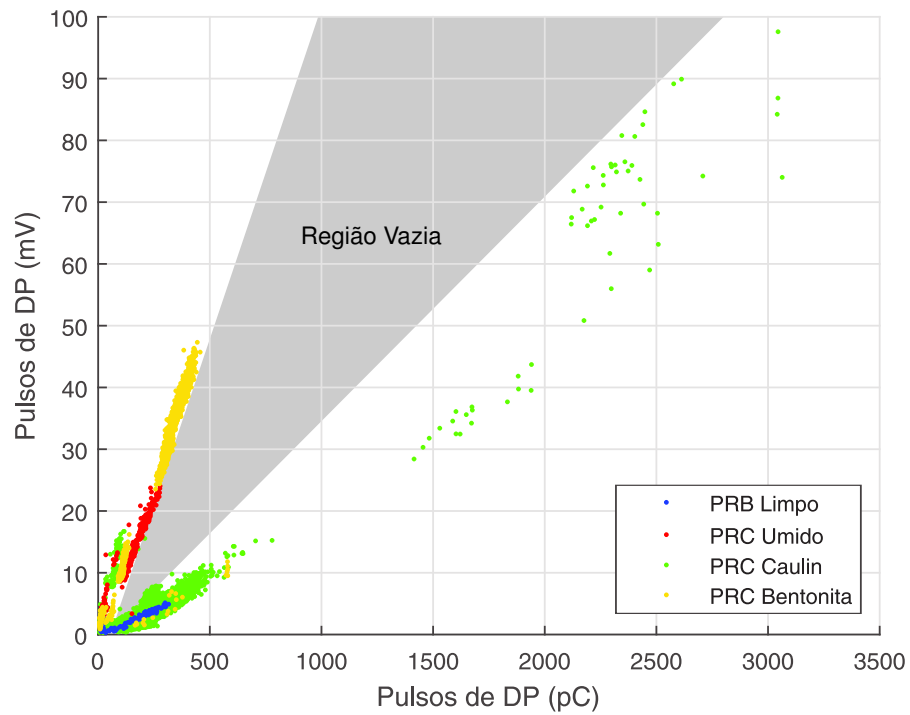
Um outra hipótese é que os pulsos localizados nos *clusters* representam descargas parciais que se originaram em diferentes localizações ao longo do eixo longitudinal do para-raios. Por isso, apresentaram diferentes níveis de atenuação no equipamento, sensibilizando os sensores de modo diverso. No entanto, se essa premissa fosse verdadeira, haveria pulsos de descargas parciais mais dispersos entre o *Cluster Superior* e o *Cluster Inferior*, representando infinitos níveis de atenuação para pulsos localizados entre a base e o topo do para-raios. Contudo, nas Figuras 6.20 e 6.21 observa-se que na região destacada não foram observadas a ocorrência de pulsos de descargas parciais.

Figura 6.20 – Região sem descargas parciais para o HFCT 140-100HC.



Fonte: produzida pelo autor.

Figura 6.21 – Região sem descargas parciais para o HFCT 200/150.



Fonte: produzida pelo autor.

Hipótese 3: Os *clusters* representam pulsos localizados internamente e externamente ao para-raios

A terceira hipótese é que o *Cluster Superior* representa pulsos internos no para-raios e o *Cluster Inferior* representa pulsos ocorridos externamente na porcelana. Três razões fortalecem essa premissa. A primeira é que foram identificados somente dois *clusters*, indicando apenas duas fontes distintas de descargas parciais. A segunda razão é que na medição com umidade interna, foram obtidos somente pulsos no *Cluster Superior*. Portanto, como a medição simula um defeito interno, acredita-se que o *Cluster Superior* representa pulsos internos. A terceira razão é que as medições com poluição à base de Caulin e Bentonita apresentaram pulsos localizados nos dois *clusters*. Segundo [Feser et al. \(1991\)](#), a poluição superficial no para-raios provoca tanto descargas parciais internas, quanto descargas parciais externas na porcelana. Pesquisas já foram realizadas no sentido de mostrar que diferentes fontes de descargas parciais podem ser identificados, a partir de sua localização em *clusters* em um plano bidimensional ([ARDILA-REY et al., 2013](#); [ARDILA-REY et al., 2015](#); [ALBARRACIN et al., 2015](#)).

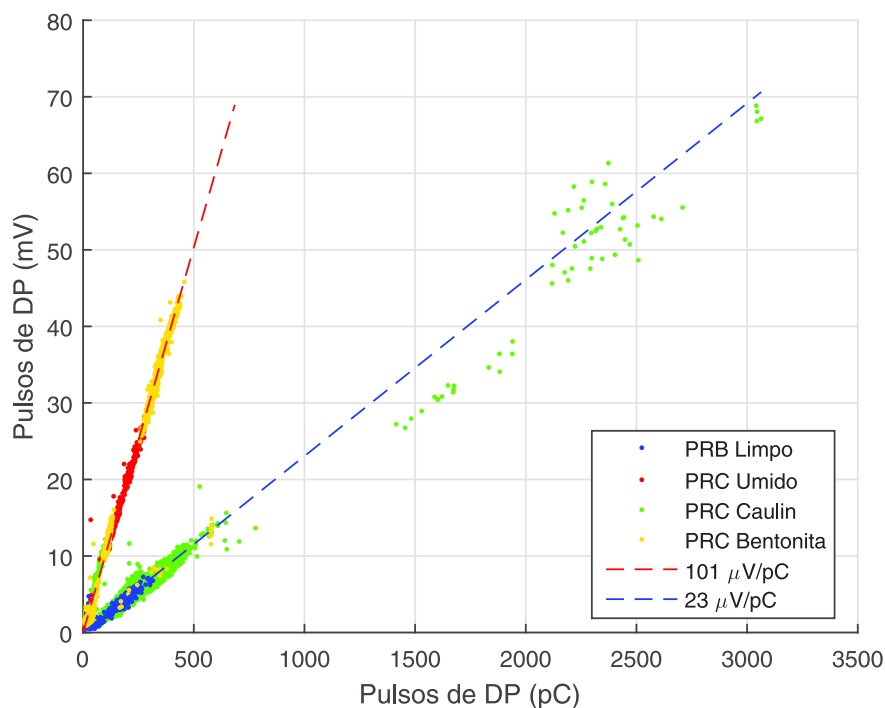
Ainda são necessárias explicações do por que a medição com poluição à base de bentonita apresentou mais pulsos no *Cluster Superior*, enquanto a medição com poluição à base de caulin apresentou mais pulsos no *Cluster Inferior*. Duas razões podem ser levantadas para explicar esse resultado. A primeira é que a solução à base de caulin possui condutividade de aproximadamente 80 mS/cm, oito vezes maior que a solução à base de bentonita, com condutividade de aproximadamente 10 mS/cm. Portanto, espera-se que a corrente superficial na porcelana do para-raios seja maior para a solução à base de caulin, provocando, portanto, mais pulsos no *cluster* que representa as descargas externas. A segunda razão é que as propriedades eletroquímicas da bentonita e do caulin são diferentes e, portanto, podem provocar a formação de bandas secas e campos elétricos de modo distinto. Nesse caso, pode ocorrer uma maior indução de descargas internas com uma poluição do que com outra. Estudos mais detalhados são necessários para investigar esse resultado.

Diante da análise realizada, algumas conclusões podem ser obtidas. Primeiramente, foi possível caracterizar a relação entre a carga aparente e a tensão medida nos HFCT. A partir dos gráficos, verificou-se que os conjuntos de pulsos apresentam uma relação Q_i versus V_i aproximadamente linear, sugerindo curvas de correlação lineares. Também conseguiu-se identificar

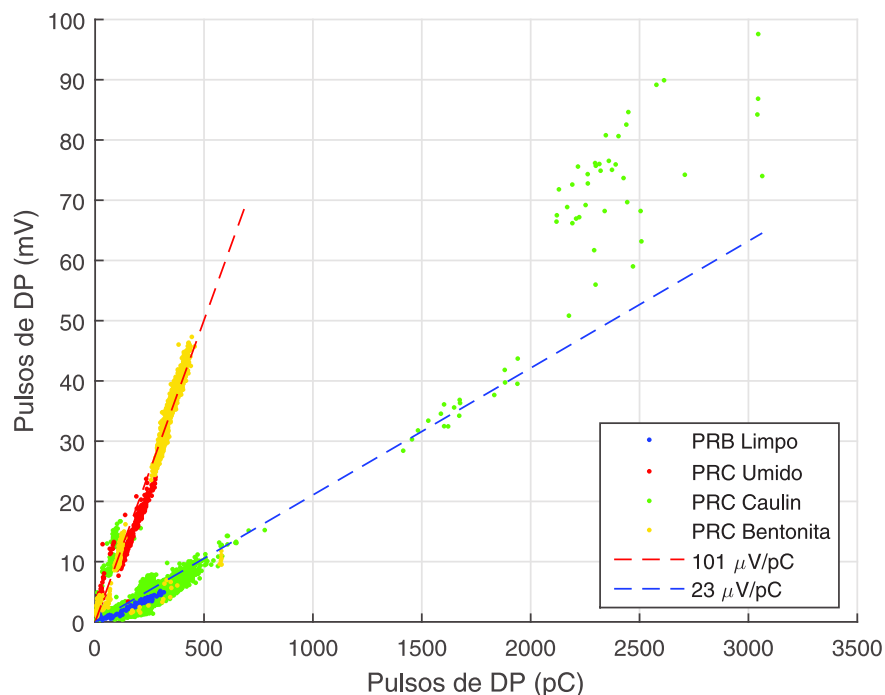
a localização dos pulsos de descargas parciais, a partir de uma estratégia de identificação *clusters* em um plano bidimensional. Verificou-se também que a poluição superficial pode provocar descargas internas, mas também externas, ratificando as conclusões de (FESER *et al.*, 1991) e (KNOBLOCH *et al.*, 1991).

A partir da relação Q_i versus V_i , construiu-se duas curvas de correlação lineares para cada HFCT. Uma curva ajustada a partir dos pulsos localizados no *Cluster Superior* e a outra a partir dos pulsos localizados no *Cluster Inferior*. Nas Figuras 6.22 e 6.23 são apresentadas as curvas ajustadas. Na Tabela 6.5 são apresentadas as relações obtidas para cada curva e na Tabela 6.6 os valores dos coeficientes de determinação (R^2) obtidos no ajuste de curvas.

Figura 6.22 – Parametrização final do HFCT 140-100HC.



Fonte: produzida pelo autor.

Figura 6.23 – Parametrização final do HFCT 200/150.

Fonte: produzida pelo autor.

Tabela 6.5 – Valores obtidos na parametrização dos HFCT.

Curva	HFCT 140-100HC	HFCT 200/150
Curva Superior	101 $\mu V/pC$	100 $\mu V/pC$
Curva Inferior	23 $\mu V/pC$	21 $\mu V/pC$

Tabela 6.6 – Coeficientes de determinação obtidos na parametrização dos HFCT.

Curva	HFCT 140-100HC	HFCT 200/150
Curva Superior	0,9985	0,9924
Curva Inferior	0,9765	0,8326

Conforme os dados apresentados, para as descargas internas no para-raios obteve-se uma relação de 101 $\mu V/pC$ e 100 $\mu V/pC$; e para as descargas parciais superficiais, as relações obtidas foram 23 $\mu V/pC$ e 21 $\mu V/pC$, para os HFCT 140-100HC e HFCT 200/150, respectivamente. Em todos os casos, os R^2 obtidos foram acima de 0,83. O resultado indica que os modelos representam bem os dados coletados.

A seguir será apresentado um resumo dos resultados obtidos neste capítulo. Inicialmente, foram apresentados as medições realizadas. Em seguida, os resultados do estudo da Densidade Espectral de Potência (DEP) e da avaliação da taxa de amostragem para medições de descargas parciais. Posteriormente, realizou-se a análise da melhor topologia wavelet para filtragem dos sinais de descargas parciais. Após o processo de subamostragem, filtragem e identificação dos pulsos de descargas parciais, apresentaram-se os gráficos PRPD obtidos. Por fim, foi realizada a parametrização dos HFCT.

O estudo da DEP indicou que a densidade de potência dos sinais se distribuem em uma larga faixa do espectro, acima da largura de banda dos sensores utilizados. Verificaram-se componentes dos sinais em até 100 MHz, 116 MHz e 107 MHz, respectivamente, para o impedor de medição, o HFCT 140-100HC e o HFCT 200/150. O resultado comprova que as bordas do sinal podem conter componentes de frequência significativamente maiores que a largura de banda dos sensores.

A avaliação da taxa de amostragem, para medição de descargas parciais, indicou que 200 MSa/s, 232 MSa/s e 214 MSa/s são necessários para amostrar os sinais provenientes do impedor de medição, do HFCT 140-100HC e do HFCT 200/150, respectivamente.

A análise da melhor topologia wavelet, para filtragem dos sinais de descargas parciais, indicou a ‘sym11’ como a melhor wavelet mãe para a filtragem dos dados. Além disso, para uma taxa de amostragem $f_s = 250$ MSa/s, são suficientes 8 níveis de decomposição para uma filtragem eficaz dos sinais provenientes do impedor de medição. Para os HFCT, 7 níveis de decomposição são necessários.

A análise dos gráficos PRPD permitiu verificar a geração de sinais de descargas parciais com características bem definidas e diferentes entre si. As medições com os HFCT mostraram-se eficazes e apresentaram alta sensibilidade, sendo capazes de identificar pulsos de descargas parciais de 15 a 3000 pC.

Na parametrização dos dados, pode-se observar um conjunto de pulsos de descargas parciais distribuídos em regiões bem definidas no plano bidimensional. Verificaram-se dois *clusters* onde os pulsos estão localizados. O *Cluster Superior* representa pulsos internos no para-raios e o *Cluster Inferior* representa pulsos ocorridos externamente na porcelana. Portanto, além da parametrização, conseguiu-se identificar a localização das descargas parciais no para-

raios. O ajuste de curvas realizado indicou uma curva para as descargas parciais internas e outra para as descargas parciais externas. Para efeito de medições em campo, deve-se utilizar a curva que representa os defeitos internos, pois são os fenômenos de interesse no diagnóstico do equipamento. Além disso, é a curva mais conservativa. Portanto, sugere-se as relações $101 \mu V/pC$ e $100 \mu V/pC$, para os HFCT 140-100HC e HFCT 200/150, respectivamente.

No capítulo a seguir são apresentadas as conclusões desta dissertação e algumas sugestões de trabalhos para a continuidade da pesquisa.

Capítulo 7

Conclusões

Nesta dissertação foi realizada uma parametrização de Transformadores de Corrente de Alta Frequência (HFCT) para medição de descargas parciais em para-raios de ZnO. Para tanto, foi utilizada uma metodologia experimental baseada na emulação, medição, processamento e identificação de sinais de descargas parciais. A metodologia permitiu obter um banco de dados amplo para a parametrização dos sensores.

Para a realização das medições de descargas parciais em laboratório, foram empregados métodos elétricos de medição, dentre eles o método convencional definido pela IEC 60270 e dois HFCT. Ao todo foram utilizados seis arranjos de medição de descargas parciais, sendo três medições com defeitos artificiais inseridos nos para-raios.

A partir das medições realizadas, procedeu-se a avaliação da densidade espectral de potência dos sinais. Na análise, verificou-se que a densidade de potência dos sinais se distribuem em uma larga faixa do espectro, acima da largura de banda dos sensores utilizados. Os resultados comprovam que as bordas do sinal podem conter componentes de frequência significativamente maiores que a largura de banda dos sensores. Constataram-se componentes dos sinais em até 100 MHz, 116 MHz e 107 MHz, respectivamente, para o impedor de medição, o HFCT 140-100HC e o HFCT 200/150.

A partir da análise espectral dos sinais, calculou-se as taxas de amostragem necessárias para a medição de descargas parciais com os sensores utilizados. Verificou-se que 200 MSa/s, 232 MSa/s e 214 MSa/s são necessários para amostrar os sinais provenientes do impedor de medição, do HFCT 140-100HC e do HFCT 200/150, respectivamente.

Após a análise espectral dos sinais, avaliou-se a Transformada Wavelet como ferra-

menta computacional de filtragem de sinais. Foi possível suprimir/atenuar sinais de interferências existentes no ambiente de medição. A Transformada Wavelet destacou-se no processamento de sinais não-estacionários com característica transitórias, que é inerente aos sinais de descargas parciais. Como principais conclusões da avaliação da Transformada Wavelet como ferramenta de filtragem, pode-se citar que, dependendo do tipo de ruído, a filtragem é mais eficiente para uma determinada topologia wavelet. Por isso, foi avaliada a melhor wavelet mãe e o número mínimo de níveis de decomposição para uma filtragem adequada dos sinais. Verificou-se que a ‘sym11’ apresentou o melhor resultado, de acordo com o método SWTBWS utilizado. Além disso, foram necessários 8 níveis de decomposição para a filtragem dos sinais provenientes do impedor de medição do arranjo convencional e 7 níveis para os sinais provenientes dos HFCT.

Após o processo de filtragem, foram construídos gráficos PRPD para cada medição realizada. Cada defeito simulado permitiu a geração de sinais de descargas parciais com características bem definidas e diferentes entre si, principalmente na magnitude e localização dos pulsos em relação à fase da tensão aplicada. Com os defeitos simulados, comprovou-se que a poluição superficial pode aumentar a intensidade e o número de pulsos de descargas parciais detectados. No entanto, estudos mais detalhados são necessárias para localizá-los. Isto é, identificar se eles ocorrem interiormente ou na superfície do para-raios. A umidade interna também provocou aumento dos níveis de descargas parciais.

Em seguida, formou-se um banco de dados com os pulsos obtidos e criou-se um conjunto de pares ordenados (Q_i, V_i) , onde Q_i representa a carga obtida para um pulso i pelo método convencional e V_i a tensão obtida pelos HFCT. Então, construiu-se dois gráficos Q versus V a partir dos pares ordenados obtidos. A partir dos gráficos, pôde-se observar um conjunto de pulsos de descargas parciais distribuídos em regiões bem definidas no plano bidimensional. Evidenciaram-se dois *clusters*, onde os pulsos foram localizados. O *Cluster Superior* representa pulsos internos no para-raios e o *Cluster Inferior* representa pulsos ocorridos externamente na porcelana. Portanto, além da parametrização, conseguiu-se identificar a localização das descargas parciais no para-raios, com a metodologia utilizada. A partir da localização das fontes de defeitos, comprovou-se pesquisas anteriores que relataram que a poluição superficial em para-raios pode provocar tanto descargas internas, quanto descargas externas.

A partir do conjunto de pares ordenados obtidos, realizou-se um ajuste de curvas, de modo a obter curvas de correlação entre a medição com o HFCT e o arranjo convencional. Foram construídas duas curvas de correlação lineares para cada HFCT, uma ajustada a partir dos pulsos que representam as descargas internas, no *cluster* superior; e outra a partir dos pulsos que representam as descargas externas, localizados no *cluster* inferior. O ajuste foi realizado mediante o método dos quadrados mínimos R^2 e, em todos os casos, foram obtidos valores acima de 0,87. Os coeficientes de determinação obtidos comprovam que os modelos representam bem os dados coletados.

Para efeito de medições em campo, deve-se utilizar a curva que representa os defeitos internos, pois são os fenômenos de interesse no diagnóstico do equipamento. Além disso, é a curva mais conservativa. As relações obtidas foram $101 \mu V/pC$ e $100 \mu V/pC$, para os HFCT 140-100HC e HFCT 200/150, respectivamente.

Desta maneira, conclui-se que foi possível realizar a parametrização da saída de tensão dos Transformadores de Corrente de Alta Frequência utilizados. Além disso, o seu uso para medição de descargas parciais mostrou-se eficaz, com uma sensibilidade de acima de 15 pC.

A seguir são listadas algumas sugestões de trabalhos decorrentes da pesquisa realizada neste trabalho:

1. Realizar medições com defeitos em localizações bem definidas ao longo do eixo longitudinal da coluna ativa do para-raios. Com isso, pretende-se investigar se a localização da descarga parcial ao longo da coluna de varistores atenua os sinais medidos com os HFCT.
2. Realizar medições com o para-raios o poluído, mas sem a coluna ativa de varistores. Assim, pretende-se obter descargas parciais externas e investigar a localização dos pulsos no plano bidimensional.
3. Investigar se a presença de corona no ambiente de medição sensibiliza os HFCT.
4. Investigar o comportamento espectral dos pulsos identificados nos *Clusters* Superior e Inferior, a fim de observar padrões que indiquem a localização dos pulsos de descargas parciais no para-raios.

5. Aplicar a metodologia utilizada em medições de descargas parciais em banda estreita e comparar com os resultados obtidos na medição em banda larga.
6. Testar outros métodos de seleção da topologia wavelet, a fim de verificar quais apresentam melhores resultados.
7. Realizar campanhas de medição em campo, a fim de caracterizar o ruído existente em subestações de alta tensão.
8. Testar a metodologia desenvolvida em para-raios poliméricos, com o objetivo de realizar a parametrização para esse tipo de equipamento.
9. Testar a metodologia desenvolvida no monitoramento de outros equipamentos de subestações sujeitos à passagem de corrente de fuga.
10. Aplicar as curvas de correlação obtidas em medições de descargas parciais realizadas em campo.
11. Implementar em hardware as rotinas computacionais desenvolvidas.

Referências Bibliográficas

ALBARRACIN, R.; ROBLES, G.; MARTINEZ-TARIFA, J. M.; ARDILA-REY, J. Separation of sources in radiofrequency measurements of partial discharges using time–power ratio maps. *ISA transactions*, Elsevier, v. 58, p. 389–397, 2015. Citado na página 82.

AMORIM JÚNIOR, H. P.; CARVALHO, A. T.; RODRIGUES, T. B.; RODRIGUES, A. P.; OLIVEIRA, H. B.; DIAS, J. B. Avaliação de pára-raios no campo e no laboratório por meio das descargas parciais utilizando tc de alta frequência. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 2012, Goiânia, Brasil. *Anais eletrônicos...* Goiânia, Brasil: SBSE, 2012. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/anais/SBSE2012/anais01.html>>. Acesso em: 14 nov. 2015. Citado 3 vezes nas páginas 14, 35 e 37.

ARAÚJO, D. B. *Aplicação da transformada wavelet à filtragem de sinais de descargas parciais*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 26.

ARDILA-REY, J.; ALBARRACIN, R.; MARTINEZ-TARIFA, J.; ROBLES, G. On the use of spectral power ratios for partial discharge and noise separation in radiofrequency measurements. In: IEEE INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE (I2MTC). *Proceedings...* Pisa, Italy: IEEE, 2015. p. 1813–1818. Citado na página 82.

ARDILA-REY, J.; MARTINEZ-TARIFA, J.; ROBLES, G.; ROJAS-MORENO, M. Partial discharge and noise separation by means of spectral-power clustering techniques. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, v. 20, n. 4, p. 1436–1443, 2013. Citado na página 82.

BACEGA, W. R.; KANASHIRO, A. G.; TATIZAWA, H.; JUNIOR, M. Z.; OBASE, P. F. Diagnóstico do estado dos para-raios em operação no sistema de transmissão. In: V CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 2009, Belém, Brasil. *Anais eletrônicos...* Belém - PA, Brasil: CITENEL, 2009. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=579>>. Acesso em: 14 nov. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 37.

CARVALHO, A. T. *Seleção de bases wavelet para redução do ruído de banda larga em medições de descargas parciais em máquinas síncronas*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 16, 23, 25 e 28.

CARVALHO, A. T.; LIMA, A. C.; CUNHA, C. F.; PETRAGLIA, M. Identification of partial discharges immersed in noise in large hydro-generators based on improved wavelet selection

methods. *Measurement*, Elsevier, v. 75, p. 122–133, 2015. Citado 8 vezes nas páginas [24](#), [25](#), [26](#), [27](#), [29](#), [47](#), [48](#) e [59](#).

CHRZAN, K. L. Influence of moisture and partial discharges on the degradation of high-voltage surge arresters. *European transactions on electrical power*, Wiley Online Library, v. 14, n. 3, p. 175–184, 2004. Citado 4 vezes nas páginas [31](#), [32](#), [37](#) e [41](#).

COSTA, E. G.; NEVES, W. L. A. Apostila do curso de engenharia elétrica da universidade federal da paraíba. Descargas Parciais. 1996. Citado na página [9](#).

COSTA, E. G. da. *Análise do desempenho de para-raios de óxido de zinco*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba, 1999. Citado na página [1](#).

CUNHA, C. F. F. C.; CARVALHO, A. T.; PETRAGLIA, M. R.; LIMA, A. C. S. A new wavelet selection method for partial discharge denoising. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 125, p. 184–195, 2015. Citado 2 vezes nas páginas [24](#) e [25](#).

DAUBECHIES, I. *Ten lectures on wavelets*. Philadelphia, United States of America: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. v. 61. Citado na página [20](#).

DONOHO, D. L. De-noising by soft-thresholding. *IEEE Transactions on Information Theory*, IEEE, v. 41, n. 3, p. 613–627, 1995. Citado 2 vezes nas páginas [27](#) e [28](#).

DONOHO, D. L.; JOHNSTONE, I. M. Threshold selection for wavelet shrinkage of noisy data. In: ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY. ENGINEERING ADVANCES: NEW OPPORTUNITIES FOR BIOMEDICAL ENGINEERS. 16TH ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE. *Proceedings...* [S.l.]: IEEE, 1994. p. A24–A25. Citado na página [22](#).

EVAGOROU, D.; KYPRIANOU, A.; LEWIN, P. L.; STAVROU, A.; EFTHYMIOU, V.; METAXAS, A. C.; GEORGHIOU, G. E. Feature extraction of partial discharge signals using the wavelet packet transform and classification with a probabilistic neural network. *IET Science, Measurement & Technology*, IET, v. 4, n. 3, p. 177–192, 2010. Citado 2 vezes nas páginas [24](#) e [26](#).

FESER, K.; KOEHLER, W.; QIU, D.; CHRZAN, K. Behaviour of zinc oxide surge arresters under pollution. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 688–695, 1991. Citado 7 vezes nas páginas [31](#), [37](#), [41](#), [42](#), [43](#), [82](#) e [83](#).

HAO, L.; LEWIN, P.; HUNTER, J.; SWAFFIELD, D.; CONTIN, A.; WALTON, C.; MICHEL, M. Discrimination of multiple pd sources using wavelet decomposition and principal component analysis. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, v. 18, n. 5, p. 1702–1711, 2011. Citado na página [26](#).

HAO, L.; LEWIN, P. L.; SWINGLER, S. G. Identification of multiple partial discharge sources. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONDITION MONITORING AND DIAGNOSIS, 2008, Beijing, China. *Proceedings...* Beijing, China: IEEE, 2008. p. 118–121. Citado na página [14](#).

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 507: Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems*. [S.l.], 1991. Citado na página [33](#).

_____. *IEC 60270: High-voltage test techniques: partial discharge measurements*. Geneve, Switzerland, 2000. Citado 12 vezes nas páginas [x](#), [2](#), [5](#), [7](#), [8](#), [10](#), [11](#), [12](#), [16](#), [35](#), [37](#) e [44](#).

_____. *IEC 60507: Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems*. [S.l.], 2013. Citado na página [42](#).

_____. *IEC 60099-4: Surge arresters - part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems*. Geneva, Switzerland, 2014. Citado na página [2](#).

KEYSIGHT TECHNOLOGIES. *Evaluating Oscilloscope Sample Rates vs. Sampling Fidelity - Application Note*. United States, 2014. Citado 2 vezes nas páginas [13](#) e [54](#).

KNOBLOCH, H.; GÖHLER, R.; KÜHNE, W.; REICHEL, K.; SOLBACH, H.-B.; BRUCHHAUS, R.; HOLUBARSCH, W. Influence of the surrounding medium and service behaviour of metal oxide resistors for high voltage arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 680–687, 1991. Citado 4 vezes nas páginas [31](#), [37](#), [41](#) e [83](#).

KREUGER, F. H.; GULSKI, E.; KRIVDA, A. Classification of partial discharges. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, IEEE, v. 28, n. 6, p. 917–931, 1993. Citado na página [6](#).

LARSEN, V.; LIEN, K. In-service testing and diagnosis of gapless metal oxide surge arresters. In: X INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 2007, Foz do Iguaçu, Brazil. *Proceedings...* Foz do Iguaçu, Brazil, 2007. Citado 2 vezes nas páginas [33](#) e [37](#).

LI, J.; JIANG, T.; GRZYBOWSKI, S.; CHENG, C. Scale dependent wavelet selection for de-noising of partial discharge detection. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, v. 17, n. 6, p. 1705–1714, 2010. Citado 3 vezes nas páginas [24](#), [25](#) e [26](#).

LIRA, G. R. S. *Monitoramento de para-raios de óxido de zinco com base na medição da corrente de fuga total*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, 2012. Citado na página [41](#).

MA, X.; ZHOU, C.; KEMP, I. J. Automated wavelet selection and thresholding for pd detection. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 2, n. 18, p. 37–45, 2002a. Citado 5 vezes nas páginas [14](#), [24](#), [26](#), [28](#) e [29](#).

_____. Interpretation of wavelet analysis and its application in partial discharge detection. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, v. 9, n. 3, p. 446–457, 2002b. Citado na página [26](#).

MACÊDO, E. C. T. *Metodologia para a classificação de descargas parciais utilizando redes neurais artificiais*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014. Citado 3 vezes nas páginas [7](#), [11](#) e [14](#).

MACÊDO, E. C. T.; ARAUJO, D. B.; COSTA, E. G. da; FREIRE, R. C. S.; LOPES, W. T. A.; TORRES, I. S. M.; NETO, J. M. R. de S.; BHATTI, S. A.; GLOVER, I. A. Wavelet transform processing applied to partial discharge evaluation. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, v. 364, n. 1, 2012. Citado 2 vezes nas páginas [24](#) e [26](#).

MATHWORKS. *Wavelet Toolbox User's Guide*. [S.l.], 2009. Citado na página [20](#).

METWALLY, I. Status review on partial discharge measurement techniques in gas-insulated switchgear/lines. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 69, n. 1, p. 25–36, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 6, 8 e 44.

MISITI, M.; MISITI, Y.; OPPENHEIM, G.; POGGI, J.-M. *Wavelet toolbox Users's Guide*. [S.l.], 2015. Citado na página 28.

MONTANARI, G.; CAVALLINI, A. Partial discharge diagnostics: from apparatus monitoring to smart grid assessment. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, IEEE, v. 29, n. 3, p. 8–17, 2013. Citado na página 2.

MORAES, H. M. de. *Verificação de degradação de blocos ceramicos à base de oxido de zinco através da medição de descarga parciais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1987. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 37.

OLIVEIRA FILHO, O.; BARBOSA, F. B.; AZEVEDO, R. M. de; CRUZ, W. A. S.; CARVALHO, S. G. Performance evaluation of 20 years old zno surge arresters based on laboratory tests. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND APPLICATION, 2008, Chongqing, China. *Proceedings...* Chongqing, China: IEEE, 2008. p. 641–644. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 37.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. *Procedimentos de Rede. Submódulo 23.3 – Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos*. [S.l.], 2010. Citado na página 43.

SATISH, L.; NAZNEEN, B. Wavelet-based denoising of partial discharge signals buried in excessive noise and interference. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, v. 10, n. 2, p. 354–367, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 26.

SHIM, I.; SORAGHAN, J. J.; SIEW, W. H. Detection of pd utilizing digital signal processing methods. part 3: Open-loop noise reduction. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, IEEE, v. 17, n. 1, p. 6–13, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 26.

SILVA, D. da; JESUS, R. de; PISSOLATO, J.; LAHTI, K. Partial discharge activity in distribution mosas due to internal moisture. In: XIII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 2015, Balneário Camboriú, Brazil. *Proceedings...* [S.l.], 2015. p. 94–98. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 37.

SRIRAM, S.; NITIN, S.; PRABHU, K. M. M.; BASTIAANS, M. J. Signal denoising techniques for partial discharge measurements. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, v. 12, n. 6, p. 1182–1191, 2005. Citado na página 15.

STONE, G. Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, v. 12, n. 5, p. 891–904, 2005. Citado na página 6.

VASEGHI, S. V. *Advanced digital signal processing and noise reduction*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2009. Citado na página 15.

WALKER, J. S. *A primer on wavelets and their scientific applications*. New York, United States of America: CRC press, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.

WEEKS, M. *Digital Signal Processing Using MATLAB & Wavelets*. Hingham, United States of America: Infinity Science Press LLC, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

WONG, K. L. Electromagnetic emission based monitoring technique for polymer zno surge arresters. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, v. 13, n. 1, p. 181–190, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 37.

XIAORONG, W.; ZONGJUN, G.; YONG, S.; ZHANG, Y. Extraction of partial discharge pulse via wavelet shrinkage. In: 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PROPERTIES AND APPLICATIONS OF DIELECTRIC MATERIALS, 2000, Xian, China. *Proceedings...* Xian, China: IEEE, 2000. v. 2, p. 685–688. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 26.