

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

## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

### **Aplicação da Transformada Wavelet à Filtragem de Sinais de Descargas Parciais**

Diego Buriti Araujo

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Dezembro de 2012

Diego Buriti Araujo

## **Aplicação da Transformada Wavelet à Filtragem de Sinais de Descargas Parciais**

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 Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Raimundo Carlos Silvério Freire, D. Sc.  
Orientador

Waslon Terllizzie Araujo Lopes, D. Sc.  
Orientador

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Dezembro de 2012



A663r Araújo, Diego Buriti.  
Aplicação da transformada wavelet à filtragem de sinais de descargas parciais / Diego Buriti Araújo. - Campina Grande, 2012.  
68 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2012.  
"Orientação : Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire, Prof. Dr. Waslon Terlizzie Araújo Lopes".  
Referências.

1. Isolamento Elétrico. 2. Descargas Parciais. 3. Transformada Wavelet. 4. Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Freire, Raimundo Carlos Silvério. II. Lopes, Waslon Terlizzie Araújo. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 621.3.048(043)

**"APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA WAVELET À FILTRAGEM DE SINAIS DE  
DESCARGAS PARCIAIS"**

**DIEGO BURITI ARAÚJO**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 21/12/2012**

*RAIMUNDO CARLOS S. FREIRE*

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

*WASLON TERLLIZZIE ARAÚJO LOPES*

**WASLON TERLLIZZIE ARAÚJO LOPES, D.Sc., UFCG**  
Orientador(a)

*WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES*

**WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG**  
Examinador(a)

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

**CAMPINA GRANDE - PB**

À minha amada esposa, Vanessa Dantas de Macedo.

# Agradecimentos

Agradeço aos professores Waslon Terllizzie Araujo Lopes, Raimundo Carlos Silvério Freire e Edson Guedes da Costa pelas orientações, sábios conhecimentos e pelo voto de confiança no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos membros da banca por terem aceitado o pedido de contribuição neste trabalho.

Ao professor Tarso Vilela Ferreira pela amizade, apoio e disponibilidade durante diversas fases da minha vida acadêmica.

Aos colegas do Laboratório de Alta Tensão (LAT) e do Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científica (LIMC), Maria Alice Oliveira, Pablo Vilar, Malone Castro, Warner Barros, Filipe Lucena, Euler Macêdo e Juan Villanueva, pelo apoio nos experimentos realizados e nas atividades desenvolvidas. Agradeço também aos técnicos do LAT, Eduardo, Chico e Adriano, sempre atenciosos e solícitos.

Ao professor Genoilton João de Carvalho Almeida pela permissão da utilização das instalações do LAT no desenvolvimento dos experimentos.

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) por fornecer apoio a atividades realizadas neste trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

À minha família e amigos pela paciência e carinho.

Por fim, à minha amada esposa Vanessa Dantas de Macedo, pelo companheirismo de todas as horas e auxílio no relatório desta pesquisa.

Obrigado a todos.

*“Faça as coisas o mais simples que puder, porém não as mais simples.”*

*Albert Einstein*

# Sumário

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	13
1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	15
1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	16
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 ISOLAMENTOS ELÉTRICOS	18
2.2 DESCARGAS PARCIAIS	18
2.2.1 CLASSIFICAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS	19
2.3 OCORRÊNCIA DE DESCARGAS PARCIAIS EM TENSÃO ALTERNADA	20
2.4 DETECÇÃO E MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS	21
2.4.1 DETECÇÃO	21
2.4.2 MEDIÇÃO PELO MÉTODO ELÉTRICO	22
2.5 MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM CAMPO	23
2.5.1 INTERFERÊNCIAS NAS MEDIÇÕES DE DESCARGAS PARCIAIS	24
CAPÍTULO 3 EVOLUÇÃO DAS TÉCNICAS DE FILTRAGEM DE SINAIS DE DESCARGAS PARCIAIS	26
3.1 MÉTODOS DE ATENUAÇÃO DE RUÍDO DE SINAIS DE DP	26
3.2 ANÁLISE MULTIRRESOLUÇÃO (AM)	31
3.2.1 TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO NO TEMPO-FREQÜÊNCIA	31
3.2.1.1 Diferenças Entre as Transformadas Janelada de Fourier e Wavelet	32
CAPÍTULO 4 TRANSFORMADA WAVELET	35
4.1 DECOMPOSIÇÃO WAVELET DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS	36
4.2 ALGORITMO PIRAMIDAL PARA CÁLCULO DA TWD	37
4.3 RECOMPOSIÇÃO WAVELET	39
4.4 <i>DENOISING</i>	40
4.4.1 LIMAR DE REJEIÇÃO ( <i>THRESHOLD</i> )	40
CAPÍTULO 5 MATERIAIS E MÉTODOS	42
5.1 CIRCUITO PARA MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS	43
5.1.1 KIT DE ALTA TENSÃO	45



5.1.2	OBJETO DE TESTE	45
5.1.3	CAPACITOR DE ACOPLAMENTO E IMPEDÂNCIA DE MEDIÇÃO	46
5.1.4	TRANSFORMADOR DE CORRENTE DE ALTAS FREQUÊNCIAS	47
5.1.5	OSCILOSCÓPIO DIGITAL DE ALTA TAXA DE AQUISIÇÃO	47
5.1.6	SOFTWARE PARA PROCESSAMENTO DE SINAIS	47
5.1.6.1	Função de decomposição Wavelet: wavedec( )	48
5.1.6.2	Função de recomposição Wavelet: waverec( )	49
5.2	CÁLCULO DO LIMIAR DE REJEIÇÃO	49
CAPÍTULO 6 ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS		51
6.1	SINAIS DE DESCARGAS PARCIAIS	51
6.2	FILTRAGEM DOS SINAIS DE DESCARGAS PARCIAIS	53
CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS		62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		64

# Lista de Figuras

FIGURA 1. 1 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO PANORAMA GERAL DAS DESCARGAS PARCIAIS. ....	14
FIGURA 2. 1 - DIFERENTES TIPOS DE FALHAS QUE PODEM CAUSAR DP EM UM ISOLAMENTO (KREUGER, 1989). .....	19
FIGURA 2. 2 - (A) DIELÉTRICO DEFEITUOSO SUBMETIDO À ALTA TENSÃO; (B) CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE. (KREUGER, 1989). .....	20
FIGURA 2. 3 - OCORRÊNCIA DE DP EM TENSÃO ALTERNADA (KREUGER, 1989). .....	21
FIGURA 2. 4 - MÉTODO ELÉTRICO DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS (IEC 60270). .....	23
FIGURA 3. 1 - ANÁLISE MULTIRESOLUÇÃO DA TJF (GRAPS, 1995). .....	33
FIGURA 3. 2 - ANÁLISE MULTIRESOLUÇÃO DA TW (GRAPS, 1995). .....	33
FIGURA 4. 1 - PRIMEIRO NÍVEL DA TWD DE UM SINAL (COSTA, 2010). .....	36
FIGURA 4. 2 - DECOMPOSIÇÃO WAVELET DE MÚLTIPLOS ESTÁGIOS (COSTA, 2010). .....	37
FIGURA 4. 3 - RECOMPOSIÇÃO WAVELET. .....	39
FIGURA 4. 4 - LIMIARES DE REJEIÇÃO (SHIM, SORAGHAN E SIEW, 2001): (A) SUAVE; (B) BRUSCO. ....	41
FIGURA 5. 1 - ESQUEMA DO CIRCUITO DE MEDIÇÃO. ....	43
FIGURA 5. 2 - CIRCUITO DE MEDIÇÃO MONTADO EM LABORATÓRIO. ....	44
FIGURA 5. 3 - BANCADA DE CONTROLE DO REGULADOR DE TENSÃO E SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS. ....	44
FIGURA 5. 4 - TRANSFORMADOR DE POTENCIAL UTILIZADO COMO OBJETO DE TESTE. ....	46
FIGURA 5. 5 - TRANSFORMADOR DE CORRENTE DE ALTAS FREQUÊNCIAS. ....	47
FIGURA 5. 6 - DECOMPOSIÇÃO WAVELET NÍVEL QUATRO DE UM SINAL. ....	48
FIGURA 5. 7 - SINAL RESULTANTE DA DECOMPOSIÇÃO WAVELET NÍVEL QUATRO DE UM SINAL. .....	49
FIGURA 5. 8 - FUNÇÃO DENSIDADE DE PROBABILIDADE DE UMA VARIÁVEL COM DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA. ....	49
FIGURA 5. 9 - DISTRIBUIÇÃO DOS COEFICIENTES DE DETALHE PARA TENSÃO APLICADA DE 8 KV; (A) D1; (B) D2; (C) D3; (D) D4. ....	50
FIGURA 6. 1 - SINAL DE DP E TENSÃO DE REFERÊNCIA COM TENSÃO APLICADA DE 8 KV. ....	52
FIGURA 6. 2 - SINAL DE DP E TENSÃO DE REFERÊNCIA COM TENSÃO APLICADA DE 10 KV. ....	52
FIGURA 6. 3 - SINAL DE DP E TENSÃO DE REFERÊNCIA COM TENSÃO APLICADA DE 12 KV. ....	53

FIGURA 6. 4 - SINAL DE DP E TENSÃO DE REFERÊNCIA COM TENSÃO APLICADA DE 15 KV. ....	53
FIGURA 6. 5 - COEFICIENTES ANTES E APÓS A SUBMISSÃO AO LIMIAR DE REJEIÇÃO QUANDO APLICADOS 8 KV NO OBJETO DE TESTE. ....	55
FIGURA 6. 6 - COEFICIENTES ANTES E APÓS A SUBMISSÃO AO LIMIAR DE REJEIÇÃO QUANDO APLICADOS 10 KV NO OBJETO DE TESTE. ....	56
FIGURA 6. 7 - COEFICIENTES ANTES E APÓS A SUBMISSÃO AO LIMIAR DE REJEIÇÃO QUANDO APLICADOS 12 KV NO OBJETO DE TESTE. ....	57
FIGURA 6. 8 - COEFICIENTES ANTES E APÓS A SUBMISSÃO AO LIMIAR DE REJEIÇÃO QUANDO APLICADOS 15 KV NO OBJETO DE TESTE. ....	58
FIGURA 6. 9 - SINAL DE DP, SINAL FILTRADO E TENSÃO DE REFERÊNCIA COM TENSÃO APLICADA DE 8 KV. ....	59
FIGURA 6. 10 - SINAL DE DP, SINAL FILTRADO E TENSÃO DE REFERÊNCIA COM TENSÃO APLICADA DE 10 KV. ....	60
FIGURA 6. 11 - SINAL DE DP, SINAL FILTRADO E TENSÃO DE REFERÊNCIA COM TENSÃO APLICADA DE 12 KV. ....	60
FIGURA 6. 12 - SINAL DE DP, SINAL FILTRADO E TENSÃO DE REFERÊNCIA COM TENSÃO APLICADA DE 15 KV. ....	61
FIGURA 6. 13 - ZOOM EM UM TRECHO DO SINAL QUE NÃO HÁ OCORRÊNCIA DE DP. ....	61

# Lista de Tabelas

TABELA 1 - SINOPSE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	30
TABELA 2 -WAVELETS-MÃE DISPONÍVEIS NO MATLAB.....	44
TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE DE ALTAS FREQUÊNCIAS	47
TABELA 4 - VALORES DE LIMIAR PARA CADA CONJUNTO DE COEFICIENTES DE DETALHE NAS DIFERENTES TENSÕES APLICADAS.....	54

# Lista de Abreviaturas

AM – Análise Multiresolução

DP – Descargas parciais

PET – Politereftalato de Etileno

RFI – Resposta Finita ao Impulso

RII - Resposta Infinita ao Impulso

RLC – Resistor, indutor e capacitor

TF – Transformada de Fourier

TJF – Transformada Janelada de Fourier

TW – Transformada Wavelet

TWC – Transformada Wavelet Contínua

TWD – Transformada Wavelet Discreta

# Resumo

O isolamento elétrico é uma das partes mais importantes dos equipamentos elétricos. Seu objetivo é manter separadas as partes que se encontram entre diferentes potenciais, para que o seu funcionamento ocorra normalmente. Desta forma a integridade dos isolamentos é essencial para o bom funcionamento do equipamento e, no caso de uma falha do isolamento, danos podem ser causados ao mesmo, aos demais equipamentos que compõem o sistema e também às pessoas, além de poder interromper o fornecimento de energia elétrica, ocasionando em multas aplicadas por órgãos reguladores.

As empresas do setor elétrico possuem interesse no bom funcionamento de seus equipamentos, e uma das formas de averiguar o bom funcionamento é por meio da verificação da integridade dos isolamentos elétricos, que pode ser realizada por meio da medição dos seus níveis de descargas parciais. Entretanto, estas medições são de difícil execução na maioria dos equipamentos elétricos, devido aos baixos níveis de intensidade das descargas, além de ruídos provenientes de diversas fontes, tais como emissões eletromagnéticas e manobras do sistema elétrico.

Neste trabalho, um método de filtragem digital de sinais baseado na Transformada Wavelet é utilizado para realizar a atenuação dos ruídos presentes em sinais de descargas parciais medidos em laboratório. A partir dos resultados experimentais obtidos, verificou-se, por meio da visualização das formas de onda resultantes, uma redução considerável do ruído inerente às medições de descargas parciais. A filtragem deste ruído permite que uma futura quantificação do nível de descargas possa ser realizada, fazendo com que um diagnóstico do isolamento elétrico de um equipamento possa ser realizado, permitindo tomadas de decisão acerca de operação do equipamento, como possíveis realizações de manutenções para que os equipamentos possam operar de forma mais confiável.

**Palavras-chave:** Descargas parciais, Transformada Wavelet, isolamento elétrico.

# Abstract

The electrical insulation is one of the most important parts of electrical equipment, which objective is to keep separate the different potential parts to guarantee the correct operation of the equipment. Thus, the integrity of those electrical insulations is essential for the correct operation of the equipment, and, in the case of failure, damage is caused to the equipment, to the others that compose the electrical system, people close to the installation and damage to the company's image. Failures in the electrical systems can cause the interruption of the electrical energy supply, generating very high fines applied by regulatory agencies.

The electric companies have interest on the correct operation of their equipment, and a way to verify that can be the verification of the integrity of the electrical insulation by measuring its partial discharge level. However, those measurements are very hard to be made in the great part of electrical equipment due to the low intensity level of the discharges, in addition to the from various sources such as electromagnetic emissions, system switching among others.

In this work, a digital filtering method based on Wavelet Transform is used to perform the attenuation of noise in real partial discharge signals measured in laboratory. From the experimental results, it's verified by visualizing the resultant waveforms a considerably attenuation of noise present in partial discharges. The noise filtering allows a future partial discharge quantification, making possible to know the integrity of the equipment insulation and also to make decisions about the operation of the equipment such as maintenances for the correct and more trustable operation of the equipment.

**Keywords:** Partial Discharges, Wavelet Transform, electrical insulation.

# Capítulo 1

## Introdução

As concessionárias de energia elétrica possuem diversos equipamentos de alta tensão que são empregados nos sistemas de geração, transmissão, proteção e distribuição de energia elétrica. Os equipamentos elétricos de alta tensão operam em níveis de tensão muito elevados e necessitam de materiais que possam realizar um isolamento elétrico entre partes com diferentes potenciais para que o seu funcionamento ocorra corretamente. Os isolamentos elétricos são compostos por materiais isolantes destinados a suportar fisicamente os condutores e também separá-los eletricamente de outros condutores ou objetos (Gorur, Cherney e Burnham, 1999).

O bom desempenho dos isolamentos elétricos é fundamental para o bom funcionamento dos equipamentos elétricos e também para a sua confiabilidade. Uma falha do sistema de isolamento de um equipamento provoca danos que podem retirá-lo de operação, causando interrupções no fornecimento de energia elétrica, danos a outros equipamentos e proporcionando risco de morte aos profissionais que atuam em campo. Devido à importância deste bom funcionamento, faz-se necessária a utilização de técnicas que possibilitem verificar a integridade de tais isolamentos, permitindo a obtenção de um diagnóstico acerca do seu nível de degradação. As consequências da interrupção do fornecimento de energia elétrica são prejuízos financeiros às empresas concessionárias de energia elétrica por meio de multas aplicadas pelos órgãos reguladores da operação de sistemas elétricos além de danos à imagem da empresa e a seus clientes.

Uma forma de averiguar o estado do isolamento de um equipamento elétrico é por meio da medição de Descargas Parciais (DP) (Lemke, Berlijn, *et al.*, 2008), que também tem sido utilizada como um controle de qualidade de novos equipamentos. Entretanto, as medições de descargas parciais de equipamentos elétricos em campo e em laboratório são afetadas por interferências externas (ruídos) provenientes de diversas fontes, tais como ondas eletromagnéticas e impulsos de manobra. A presença de ruídos no sinal interfere na quantificação das descargas parciais, alterando o seu valor real, podendo ainda ocasionar resultados falsos positivos ou falsos negativos. Para que os níveis de descargas parciais dos equipamentos possam ser quantificados corretamente, é



necessária a aplicação de técnicas de atenuação de ruído aos sinais medidos. A quantificação do nível de descargas parciais de um equipamento poderá gerar um diagnóstico sobre o nível de degradação do seu isolamento, possibilitando tomada de decisões. É ilustrado na Figura 1.1 um panorama geral sobre as descargas parciais, em que a partir dos fluxos das setas, é possível verificar quais são as causas das DP assim como suas consequências, os problemas na medição junto com soluções para contorná-los e também como solucionar o problema.

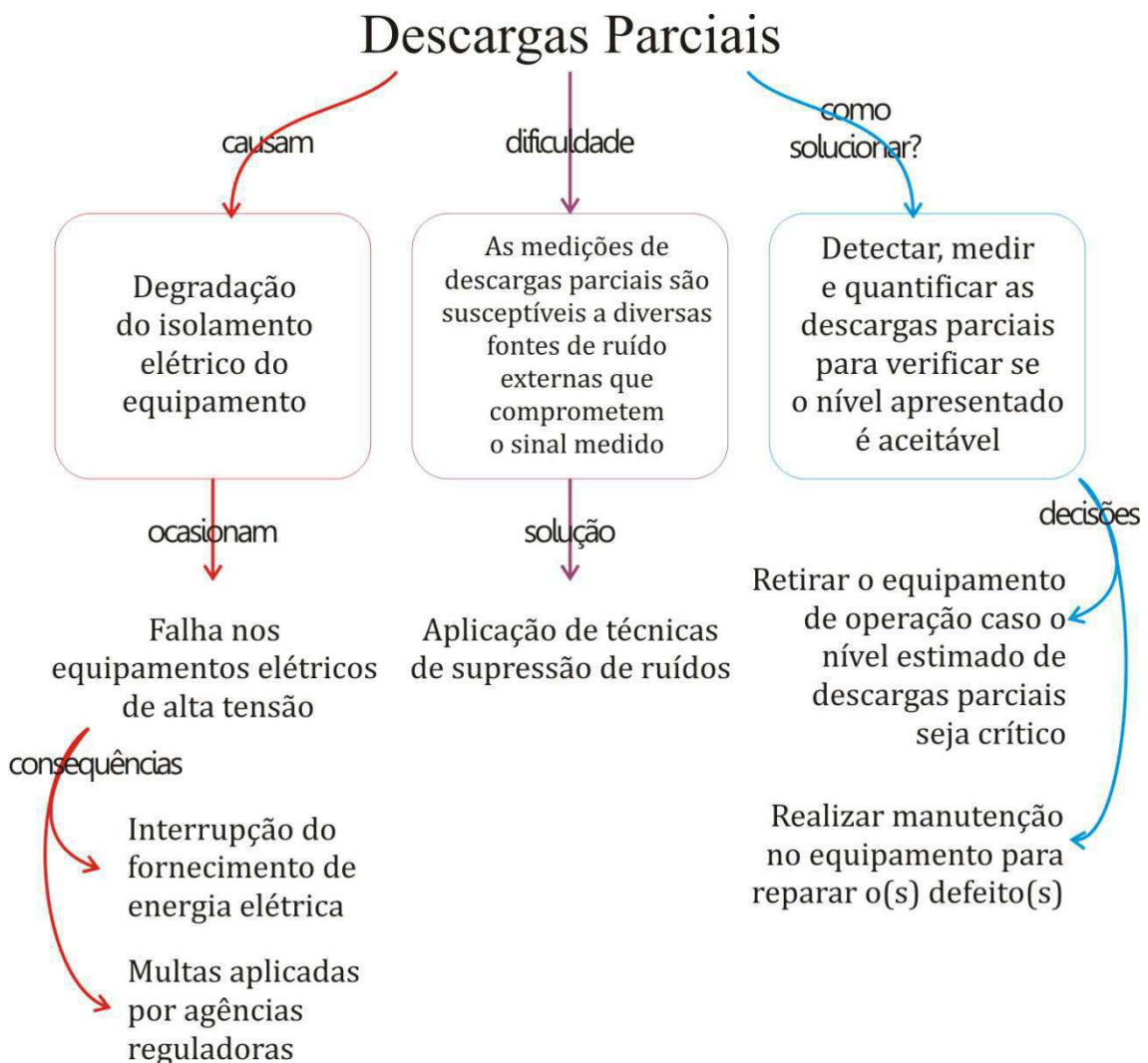


Figura 1. 1 - Diagrama de blocos do panorama geral das descargas parciais. Fonte: o autor.

## 1.1 Motivação e Justificativa

O bom funcionamento dos equipamentos elétricos de alta tensão é de interesse geral de concessionárias de energia elétrica. Os custos elevados destes equipamentos e as onerosas consequências em caso de falha manifestam um grande desejo em relação ao monitoramento de tais equipamentos em operação (*on-line*). Este monitoramento é realizado por meio de medições de grandezas que possam indicar seu bom ou mau funcionamento (Macedo, 2012).

O monitoramento de descargas parciais de um equipamento é realizado pela análise do nível das descargas que ele apresenta, as quais podem ser quantificadas após serem medidas e submetidas a processos de filtragem para atenuação do ruído. Diversos autores empregam várias técnicas de filtragem tais como a Transformada de Fourier (Feser, König, *et al.*, 1988), Filtragem Adaptativa (Su, 1994), Transformada Wavelet (Ma, Zhou e Kemp, 2002) (Shim, Soragham e Siew, 2000), dentre outras. Grande parte dos pesquisadores realizaram simulações computacionais dos sinais de descargas parciais e dos ruídos para que as técnicas de filtragem possam ser aplicadas.

Na simulação computacional, é de conhecimento do pesquisador as formas de onda do sinal de descargas parciais e do ruído, sendo possível determinar a eficácia do método utilizado na filtragem visto que o sinal real e o filtrado são conhecidos. Entretanto, com sinais reais de descargas parciais, em que as formas de onda do sinal “puro” das descargas não são conhecidas, torna-se praticamente impossível calcular parâmetros como relação sinal-ruído (SNR – *Signal to Noise Ratio*) ou a correlação cruzada entre os sinais, critérios estes que permitem observar a eficiência da filtragem.

Este trabalho apresenta o cálculo de limiares de filtragem por meio da análise da distribuição de probabilidade das componentes de frequência mais elevadas da Transformada Wavelet dos sinais reais de descargas parciais medidos em laboratório provenientes de um transformador de potencial. A vantagem da aplicação deste método é a utilização da análise multiresolução da TW aplicada nos sinais medidos assim como a simplicidade do algoritmo da TW.

## 1.2 Objetivos e Contribuições

O objetivo deste trabalho é a realização da filtragem de sinais de descargas parciais reais medidos em laboratório provenientes de um transformador de potencial indutivo, por meio da aplicação da Transformada Wavelet. Os critérios de aplicação de limiares de rejeição de filtragem são obtidos pela análise da distribuição de probabilidade dos coeficientes de maiores frequências dos diversos níveis da transformada.

Este trabalho contribui com a utilização de transformadores de corrente para a realização de medição de descargas parciais em equipamentos elétricos e também com a filtragem dos sinais de DP através de um método não assistido de definição de limiar de rejeição. A utilização do transformador de corrente serve para que a medição de DP de um equipamento em operação seja possível sem que haja a necessidade de retirá-lo de operação.

O sistema desenvolvido permite a obtenção não assistida de limiares de rejeição através da análise das distribuições de probabilidade dos coeficientes da Transformada Wavelet de sinais de Descargas Parciais medidos com a utilização de um Transformador de Corrente de Altas Frequências.

## 1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 é realizada uma revisão sucinta sobre o fenômeno das descargas parciais, assim como os principais métodos de detecção e medição. Na sequência, são apresentadas alguns tipos de interferência que ocorrem nas medições de descargas parciais e suas principais características.

No Capítulo 3 é realizada uma revisão bibliográfica do estado da arte da medição e da filtragem de descargas parciais, mostrando a evolução das técnicas utilizadas.

No Capítulo 4 é abordada a teoria da Transformada Wavelet, desde a decomposição Wavelet e do seu algoritmo, a recomposição Wavelet e o processo de *denoising* por meio da aplicação de limiares de rejeição (*threshold*).

No Capítulo 5 são descritos os materiais utilizados nas medições de descargas parciais, aquisição de dados e também são detalhados os procedimentos utilizados na filtragem de sinais de descargas parciais utilizando a Transformada Wavelet.

No Capítulo 6 apresentam-se os resultados obtidos do sistema de medição e também os resultados da filtragem de sinais reais de descargas parciais por meio da Transformada Wavelet, em que é possível verificar a eficiência do método pela da inspeção visual das formas de onda dos sinais adquirido e filtrado e através da observação da redução das amplitudes do ruído.

As conclusões do método utilizado e as perspectivas de trabalhos são abordadas no Capítulos 7.

## Capítulo 2

# Fundamentação Teórica

### 2.1 Isolamentos Elétricos

Os equipamentos elétricos de alta tensão possuem diversos isolamentos elétricos que estão sempre sujeitos a campos elétricos intensos devido aos níveis elevados de tensão em que os equipamentos operam. Geralmente, as superfícies dos isolamentos elétricos apresentam defeitos em seus formatos devido à falhas nos métodos de fabricação que provavelmente proporcionarão a ocorrência de descargas parciais uma vez que campos elétricos intensos são aplicados aos isolamentos (Gorur, Cherney e Burnham, 1999).

A ocorrência de descargas parciais ioniza o meio em que a descarga ocorre, alterando suas características físicas e químicas, causando, por exemplo, carbonização e trilhamento. Uma atividade constante de descargas parciais em um isolamento pode degradá-lo até o ponto em que o mesmo venha a falhar totalmente (Natrass, 1988).

### 2.2 Descargas Parciais

A norma IEC 60270 (IEC 60270, 2000) define as descargas parciais como descargas elétricas localizadas que curto-circuitam parcialmente o isolamento entre condutores e que pode ou não acontecer nas adjacências de um condutor. Quando ocorre uma descarga parcial, um pulso de corrente elétrica circula entre os eletrodos no local da descarga.

A ocorrência de descargas parciais em isolamentos de equipamentos são fenômenos prejudiciais devido a manifestações tais como geração calor, agentes oxidantes (ozônio), emissão de ondas eletromagnéticas que interferem nas recepções de rádio e também a deterioração do material isolante (Natrass, 1988).

Por se tratar de um fenômeno prejudicial aos equipamentos de alta tensão, a medição de descargas parciais tornou-se necessária para que uma avaliação do estado do

isolamento elétrico de um equipamento de alta tensão fosse realizada. A grandeza de quantificação das descargas parciais é o picocoulomb (pC) (IEC 60270, 2000).

As descargas parciais podem ocorrer em zonas com rigidez dielétrica distintas, ou seja, em junções de diferentes dielétricos, nas adjacências de eletrodos e também em cavidades em um dielétrico (bolhas), conforme ilustrado na Figura 2.1 (Kreuger, 1989).

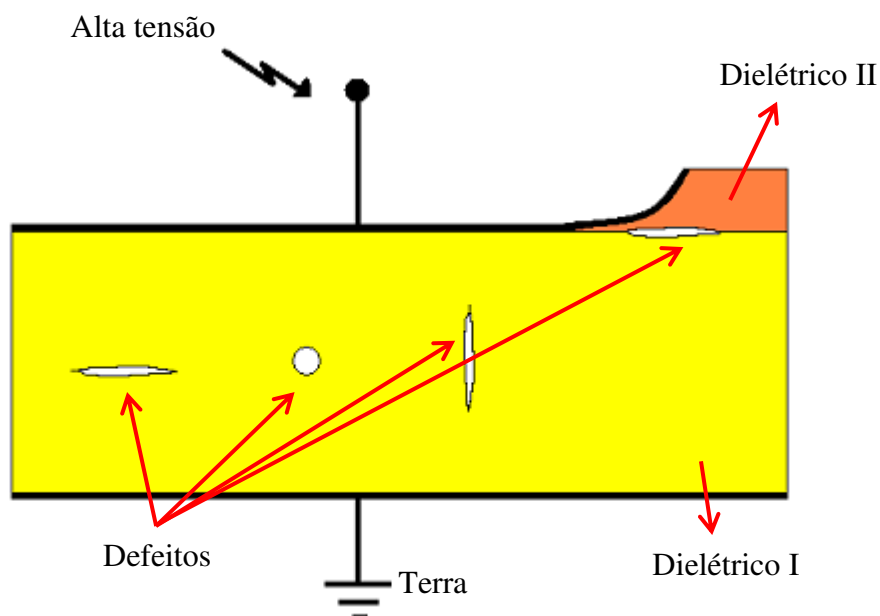


Figura 2. 1 - Diferentes tipos de falhas que podem causar DP em um isolamento (Kreuger, 1989).

### 2.2.1 Classificação de Descargas Parciais

As ocorrências das descargas parciais podem ser internas ou externas ao dielétrico. As descargas parciais no ar são classificadas como descargas externas e são comumente conhecidas como Descargas Corona ou Efeito Corona. As descargas parciais internas surgem devido às imperfeições dos dielétricos líquidos e sólidos, assim como em gases comprimidos, que também são classificados como descargas internas. As descargas em sólidos se manifestam em cavidades que contém gás, enquanto que nos líquidos, ocorrem em bolhas que também contém gás e/ou vapor de água, que pode ser criado em regiões de campo elevado (Lemke, Berlijn, *et al.*, 2008).

## 2.3 Ocorrência de Descargas Parciais em Tensão Alternada

O circuito cujo funcionamento representa o comportamento das descargas internas, quando submetidas a uma tensão alternada é ilustrado na Figura 2.2, em que o capacitor  $C$  representa a capacitância do defeito do dielétrico, o capacitor  $B$  representa a capacitância do dielétrico que se encontra em série com o defeito (região  $I$ ), e o capacitor  $A$  representa a capacitância do resto do dielétrico (região  $II$ ) (Kreuger, 1989).

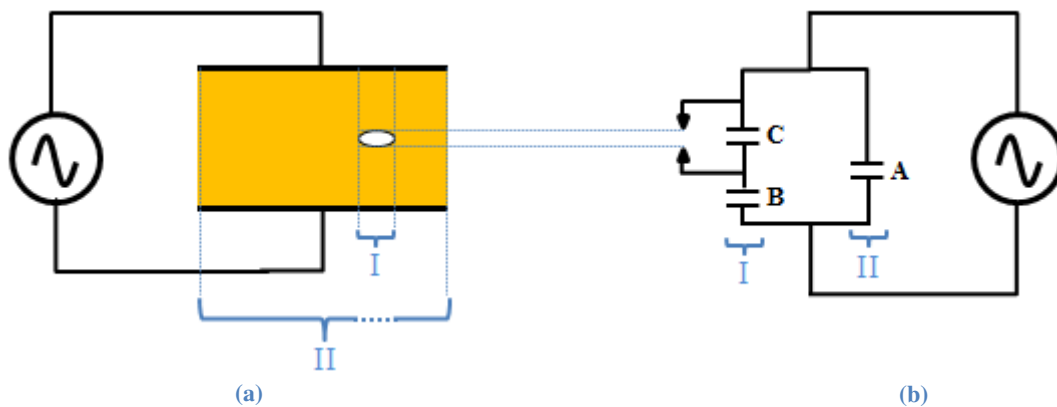


Figura 2. 2 - (a) Dielétrico defeituoso submetido à alta tensão; (b) Circuito elétrico equivalente. (Kreuger, 1989).

O processo de ocorrência das descargas parciais em tensão alternada é ilustrado na Figura 2.3 (Kreuger, 1989). Uma fonte alternada de alta tensão  $V_a(t)$  é aplicada ao dielétrico defeituoso, sendo  $V_c(t)$  a tensão que seria aplicada na região do defeito, caso ele não existisse. Quando a tensão  $V_c$  atinge o valor de ruptura  $U^+$ , uma descarga ocorre na cavidade. A tensão aplicada ao defeito decai para um valor residual  $V^+$ , onde a descarga se extingue, ocasionando um pulso de corrente elétrica, ilustrado no gráfico inferior. A queda da tensão possui tempos menores que 100 ps, e após a ocorrência e extinção da descarga, a tensão na cavidade cresce novamente, reiniciando o processo.

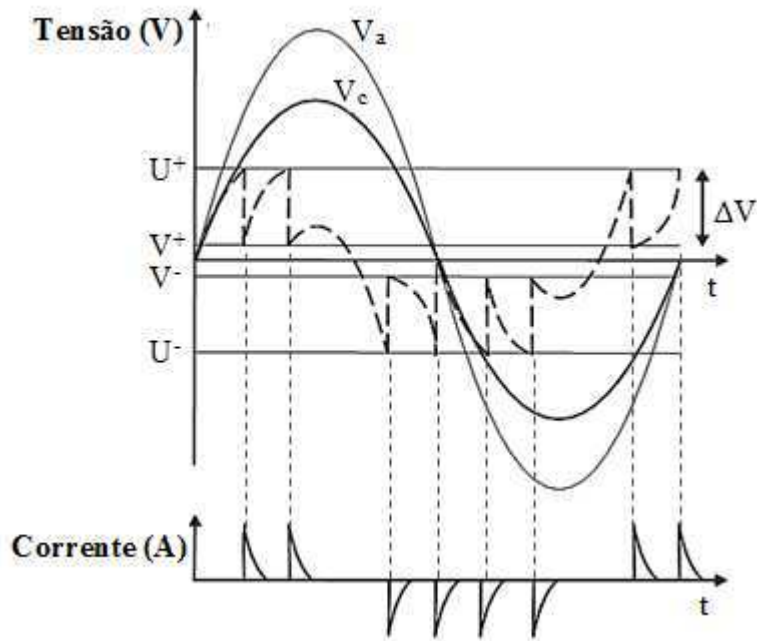


Figura 2. 3 - Ocorrência de DP em tensão alternada (Kreuger, 1989).

As descargas na cavidade geram pulsos de corrente cujos tempos de subida/descida são muito inferiores ao período da onda de 60 Hz. Nota-se que os locais de ocorrência dos pulsos de corrente são quando a tensão possui uma maior variação ( $dv/dt$ ), que se localizam nas suas passagens por zero, valores nos quais a variação do campo elétrico é máxima (Kreuger, 1989).

## 2.4 Detecção e Medição de Descargas Parciais

### 2.4.1 Detecção

A ocorrência de uma descarga parcial dentro de uma cavidade em um material dielétrico causa uma rápida transferência de cargas entre as superfícies opostas da cavidade, no sentido do campo elétrico aplicado. Esta transferência de cargas implica em um novo arranjo das cargas no dielétrico e, como consequência, ocorre o surgimento de um pulso de corrente no circuito externo do qual a amostra faz parte (Gulski, 1995). Geralmente, o pulso de corrente proveniente da descarga parcial possui uma largura média da ordem de dezenas de nanosegundos e a frente do pulso possui tempos de subida da ordem de picosegundos. As descargas parciais, quando ocorrem, além de



gerar os pulsos de corrente, produzem fenômenos físicos e químicos tais como (Natrass, 1988):

- Emissão de radiação eletromagnética;
- Emissão de luz;
- Variações térmicas;
- Variações mecânicas;
- Transformações químicas;
- Emissão de ruídos acústicos.

Devido às diversas manifestações físicas e químicas ocasionadas pelas descargas parciais, classificaram-se os métodos de detecção em dois principais tipos, o método elétrico, que utiliza sinais elétricos de tensão e corrente e os métodos não elétricos, que utilizam grandezas não elétricas, tais como som, temperatura, vibrações e outras. Os principais métodos não elétricos são métodos de medição acústica (Cuenca, 1995), método de medição óptica (Muhr, Schwarz, *et al.*, 2004), método químico (Hao, Lewin e Swingler, 2008) e de radiofrequência (Moore, Portugues e Glover, 2003) e (de Macedo, de Souza Neto, *et al.*, 2012). O método elétrico, normatizado pela IEC 60270 (IEC 60270, 2000), é o mais convencional nas pesquisas em descargas parciais e que foi elaborado pelo Comitê Internacional de Eletrotécnica (*International Electrotechnical Commission – IEC*) tornando-se o método escolhido na pesquisa deste trabalho.

#### **2.4.2 Medição pelo Método Elétrico**

Quando detectadas, as descargas parciais devem ser medidas para que depois possam ser quantificadas e assim possibilitar a concepção de um diagnóstico. A medição de descargas parciais pelo método elétrico consiste na inserção de um circuito de acoplamento em paralelo ao objeto de teste. O circuito deste tipo de medição é ilustrado na Figura 2.4, em que  $V_T$  é a fonte de tensão alternada,  $C_T$  o objeto de teste,  $C_K$  o capacitor de acoplamento,  $Z_M$  a impedância de medição e  $IM$  o instrumento de medição. Quando a tensão é aplicada ao objeto de teste, ocorrem pulsos de DP em  $C_T$ , e a variação de tensão proveniente dos pulsos são as mesmas no ramo em paralelo, composto por  $C_K$  e  $Z_M$ , fazendo com que uma corrente proporcional ao pulso de DP circule por este ramo e produza uma tensão proporcional ao pulso de descarga parcial

surja entre os terminais da impedância de medição, a qual é lida pelo instrumento de medição (IEC 60270, 2000).

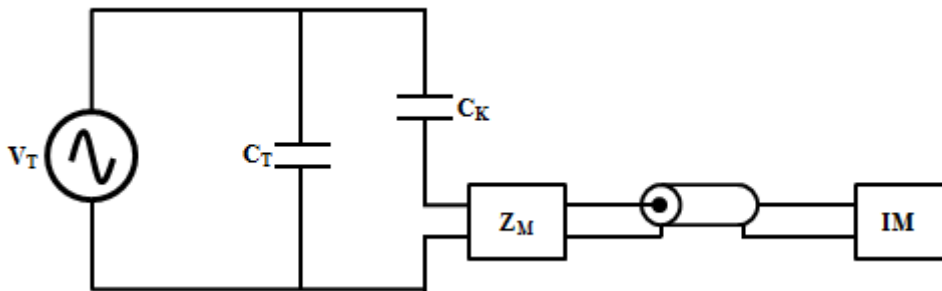


Figura 2. 4 - Método elétrico de medição de descargas parciais (IEC 60270).

Quando o objetivo da medição é registrar a forma de onda dos pulsos de descargas parciais na forma temporal e/ou avaliar os parâmetros relacionados com o sinal detectado, a impedância de medição é puramente resistiva (Morshuis, 1995). Um circuito RLC paralelo ressonante pode ser utilizado como impedância de medição quando se deseja estimar a carga aparente das descargas parciais, realizando-se a integração do pulso (Gulski, 1995).

A utilização de circuitos ressonantes como impedância de medição permite que eles sejam sintonizados em faixas de frequência que minimizam os efeitos das interferências de banda estreita, como as estações de rádio. No entanto, impedâncias de medição de banda estreita podem causar a integração do sinal, ocasionando erros (sobreposição) dos pulsos de DP, no caso da ocorrência de vários pulsos simultaneamente (Ma, Zhou e Kemp, 2002).

## 2.5 Medição de Descargas Parciais em Campo

A verificação da integridade do isolamento de equipamentos elétricos de alta tensão por meio da medição de descargas parciais é importante para as concessionárias de energia elétrica. A realização de diagnósticos acerca da integridade do isolamento permite saber se o equipamento está operando corretamente, tendo assim uma probabilidade menor de falhar. Entretanto, pelo fato de que a maior parte dos equipamentos elétricos de alta tensão encontram-se em subestações a céu aberto, as

medições de DP são susceptíveis a interferências provenientes de diversas fontes externas, as quais são detalhadas a seguir.

### **2.5.1 Interferências nas Medições de Descargas Parciais**

Os ruídos são definidos como quaisquer sinais provenientes de fontes externas que interferem nas comunicações, medições e processamento de sinais. Ruídos estão presentes em praticamente todos os ambientes, e podem causar erros de transmissão da informação e de medição, fazendo com que as análises dos sinais sejam susceptíveis a erros. Dependendo do tipo de fonte, os ruídos podem ser classificados em categorias, segundo sua ampla natureza física (Vaseghi, 2000):

- Ruído Acústico: emanado de movimentos, vibrações ou colisões de fontes, sendo um tipo de ruído bastante comum, presente em diversos níveis nos ambientes. O ruído acústico é gerado por fontes em movimento, tais como pessoas falando, vento, chuva, ruídos de equipamentos, etc.;
- Ruído Eletromagnético: presente em todas as frequências, particularmente nas frequências das estações de rádio. Todos os dispositivos eletrônicos, tais como rádios e transmissores/receptores de televisão geram ruídos eletromagnéticos;
- Ruído Eletrostático: gerado pela presença de uma tensão com ou sem circulação de corrente elétrica. Iluminação fluorescente é uma das fontes mais comuns de ruído eletrostático;
- Distorções de canais e eco: devido às características não ideais dos canais de comunicação, que alteram a propagação de sinais;
- Ruído de processamento: ruído resultante de conversões analógica/digital provenientes da quantização de sinais.

Os diferentes tipos de ruído podem ainda ser classificados de acordo com os níveis de frequência que apresentam, sendo eles (Vaseghi, 2000):

- Ruído de banda estreita: ruído cuja largura de banda é estreita, como por exemplo, ruídos do fornecimento de energia em 50/60 Hz;
- Ruído branco: ruído puramente aleatório cujo espectro de potência é plano. O ruído branco é caracterizado por possuir componentes em todas as frequências;

- Ruído branco limitado em banda: ruído branco com espectro de potência plano, mas cuja largura de banda é limitada, e que usualmente cobre o espectro limitado do sinal de interesse;
- Ruído colorido: ruído com espectro não plano;
- Ruído impulsivo: consiste em pulsos de pequena duração causados por diversas fontes como, por exemplo, o ruído de chaveamento;
- Ruído de pulsos transitórios: consistem relativamente de pulsos com pequenos tempos de subida seguidos de um decaimento em frequências mais baixas devido à ressonância do canal de comunicação excitado pelo pulso.

A seguir são listados os tipos de ruído que possuem maior influência nas medições dos sinais de descargas parciais em campo e em laboratório, prejudicando assim sua medição (Satish e Nazneent, 2003; Ma, Zhou e Kemp, 2002).

- Interferências de Espectro Discreto (*DSI – Discrete Spectral Interference*), considerados como de banda estreita;
- Interferências periódicas em forma de pulso, considerados como impulsivo;
- Interferências estocásticas, que pelo fato de serem aleatórias, pode ser considerado de qualquer tipo;
- Ruído branco.

As interferências de espectro discreto possuem características de frequência bem definidas e formas de onda mais conhecidas, enquanto que os ruídos em forma de pulso (provenientes de chaveamentos de circuitos eletrônicos e manobras nos sistemas elétricos) se assemelham às descargas parciais por serem caracterizados por pulsos de curta duração, dificultando assim sua distinção. O estudo de técnicas que objetivam separar os sinais de descargas parciais dos diversos tipos de ruído tem ocorrido desde a década de 80 (Feser, König, *et al.*, 1988) e, desde então, têm-se aprimorado estas técnicas devido à evolução tecnológica dos equipamentos utilizados. Houve também a evolução de ferramentas matemáticas que auxiliam o processo de filtragem dos sinais de descargas parciais, possibilitando avanços maiores no campo de pesquisa.

## Capítulo 3

# Evolução das Técnicas de Filtragem de Sinais de Descargas Parciais

Este capítulo se inicia com uma breve revisão acerca das metodologias utilizadas no tratamento de sinais de descargas parciais. Na sequência, é dada uma ênfase na metodologia que utiliza a Transformada Wavelet, com o objetivo de tornar mais clara a contribuição deste trabalho.

### 3.1 Métodos de Atenuação de Ruído de Sinais de DP

Com o objetivo de solucionar os problemas das interferências nos sinais de descargas parciais, (Feser, König, *et al.*, 1988), na Alemanha, iniciaram pesquisas visando à atenuação do ruído DSI dos sinais de descargas parciais por meio da utilização da Transformada de Fourier. Entretanto, este método exige um esforço computacional muito grande além da dificuldade de se calcular um valor de limiar de rejeição.

Em 1989, foi proposta a utilização de um filtro com resposta ao impulso finita (RIF) de ordem 128 para a filtragem do ruído DSI com a intenção de reduzir o tempo de processamento (Konig e Feser, 1989). Em 1995, foi construído um filtro com resposta infinita ao impulso (RIF) de 255 pólos para a atenuação de ruídos de banda estreita (Köpf e Feser, 1995). A fim de reduzir os sinais indesejáveis utilizando uma filtragem fixa, suas frequências precisam ser conhecidas. Sendo assim, estes métodos envolvem uma análise do sinal no domínio da frequência e requer um filtro de ordem bastante elevada, fazendo com que o custo computacional também seja bastante elevado.

Em 1989, foi proposta a utilização de filtros digitais adaptativos para a atenuação do ruído DSI. Entretanto, estes filtros são sensíveis ao ruído e não podem distinguir sinais de pequenas intensidades (Borsi e Hartje, 1989).

No ano de 1993, foi sugerida a aplicação de processamento de sinais adaptativo baseado no princípio de decorrelação entre os pulsos de descargas parciais e o ruído, realizando a aquisição dos sinais em altas frequências e inserindo um atraso de tempo no sistema adaptativo. Como vantagem deste método, destaca-se a possibilidade de

aplicação sem o conhecimento das frequências do ruído, embora o custo computacional seja bastante alto, aumentando o tempo de processamento de forma considerável (Zaman, Zhu, *et al.*, 1993).

Estudos sobre a utilização de um filtro de rejeição adaptativo e um filtro de Kalman para suprimir ruído contínuo foram realizados em 1993 (Borsi, Gockenbach e Schinchler, 1993). Um ano depois, foi proposto um método que utiliza um filtro adaptativo, utilizando pulsos de calibração como sinal de referência. As limitações do filtro adaptativo são a necessidade dos valores de frequência do ruído e das características do sinal de referência (Su, 1994). Além disso, uma escolha criteriosa dos parâmetros é necessária para uma convergência mais rápida.

Comparações dos desempenhos de vários filtros digitais adaptativos e não adaptativos para a atenuação do ruído DSI foram realizadas, em que foi concluído que os métodos que utilizam filtros de rejeição com resposta infinita ao impulso em cascata de segunda ordem são os mais adequados para esta finalidade (Nagesh e Guruaj, 1993).

Os métodos citados anteriormente são direcionados à atenuação do ruído DSI de sinais de descargas parciais, que atualmente, com os adventos da tecnologia em favor dos sistemas de medição e processamento, são de simples atenuação devido às suas formas de onda, que possuem comportamentos bem definidos. Os maiores problemas encontrados no processamento de sinais de DP são os ruídos do tipo impulsivos, por apresentarem formas de onda bastante semelhantes com os pulsos de DP (Satish e Nazneent, 2003).

Propostas de utilização da Transformada Wavelet para realizar a atenuação de ruídos de sinais de descargas parciais começaram a surgir desde meados da década de noventa. (Massaroni, Okana, *et al.*, 1995) aplicaram uma análise da Transformada Wavelet em sinais de corrente e de sons emitidos pelos pulsos de DP, utilizando Wavelets-mãe gaussianas e chapéus mexicanos, chegando à conclusão de que um diagnóstico de degradação do isolamento pode ser emitido utilizando esta técnica.

A aplicação de Wavelets para a eliminação de sinais de som produzidos pelas descargas corona em uma cavidade formada por um eletrodo e um filme Politereftalato de Etileno (PET) foi realizada em 1997 (Arli, Shibahara e Fujii, 1997). A utilização de Wavelets em simulações de sinais de descargas parciais provenientes de uma cavidade

com e sem ruído foram realizadas em 1998. Foi mostrado que o ruído pode ser removido com sucesso e com um baixo custo computacional (Quan, Gao, *et al.*, 1998).

Em 1997, aplicou-se a análise Wavelet para extrair ruídos senoidais de diferentes frequências, mostrando as vantagens de sua utilização (Hang, Kexiong e Deheng, 1997). No ano 2000, foi averiguada a possibilidade de utilização de Wavelets para a filtragem de sinais de DP utilizando o limiar suave e o limiar brusco, mostrando suas qualidades e dificuldades (Shim, Soragham e Siew, 2000). Os resultados permitiram notar a necessidade de exploração de métodos mais eficientes para a filtragem.

Uma introdução ao método de Wavelets e à técnica desenvolvida por (Donoho e Johnstone, 1995) para a eliminação de ruídos, conhecida como *waveshrink* foi apresentada por (Shim, Soraghan e Siew, 2001). Resultados satisfatórios foram obtidos na aplicação da técnica na filtragem de sinais de DP medidos em cabos coaxiais de alta tensão. (Ma, Zhou e Kemp, 2002) aperfeiçoaram a técnica da utilização da Transformada Wavelet introduzindo procedimentos para automação da seleção de Wavelet-mãe e determinação dos limiares, apresentando resultados satisfatórios na filtragem de sinais de DP medidos em cabos coaxiais.

Foi apresentada no ano de 2003 uma técnica de filtragem baseada em Wavelets, análise multiresolução (AM) e inspeção visual. A filtragem consiste em uma análise das componentes associadas às sub-bandas de frequências de Wavelets, eliminando-se as associadas ao ruído. Apresentaram-se resultados satisfatórios para o processamento de interferências harmônicas e ruído branco (Satish e Nazneent, 2003).

Em 2005, foi utilizada uma metodologia para a eliminação de ruídos baseada na identificação dos sub-níveis de decomposição associados ao espectro de energia do sinal de descargas parciais (Zhou, Zhou e Kemp, 2005).

Ainda em 2005, foram realizadas comparações de desempenho de diversas formas de atenuação de ruído de sinais de descargas parciais tais como a transformada de Fourier, filtros passa-baixas, filtros casados, filtros de rejeição, Transformada Wavelet, etc. A Transformada Wavelet combinada com filtros de rejeição funcionam muito bem tanto com sinais reais quanto com sinais simulados (Sriram, Nitin, *et al.*, 2005).

Recentemente, um trabalho que apresenta a análise de sinais de DP utilizando uma Wavelet-mãe baseada em uma função ímpar foi publicado. Os resultados

experimentais foram comparados com resultados obtidos em simulações, apresentando resultados satisfatórios na filtragem dos pulsos de PD (Matsumoto, Shibuya e Ogura, 2011).

Para uma melhor visualização do desenvolvimento dos estudos acerca da atenuação de ruído dos sinais de descargas parciais, é apresentada na Tabela 1 a evolução da utilização de técnicas de filtragem de sinais de descargas parciais.



Tabela 1 - Sinopse da revisão bibliográfica

Pesquisadores	Contribuições	RII <sup>1</sup>	RFI <sup>2</sup>	TF <sup>3</sup>	FA <sup>4</sup>	TW <sup>5</sup>
(Feser, König, <i>et al.</i> , 1988)	Utilização da TF para a eliminação do ruído DSI			•		
(Konig e Feser, 1989)	Aplicação de filtros RIF de ordem 128 para eliminar ruído DSI		•			
(Borsi e Hartje, 1989)	Utilização de filtros digitais adaptativos para atenuação do ruído DSI				•	
(Borsi, Gockenbach e Schinchler, 1993)	Utilização de um filtro de rejeição adaptativo e um filtro de Kalman para suprimir o ruído contínuo				•	
(Nagesh e Gurujaj, 1993)	Compararam o desempenho de filtros digitais adaptativos e não adaptativos para a atenuação do ruído DSI				•	
(Su, 1994)	Utilização de um filtro adaptativo, utilizando pulsos de calibração como referência				•	
(Köpf e Feser, 1995)	Utilização de um filtro FIR de 255 pólos para filtrar ruídos de banda estreita		•			
(Massaroni, Okana, <i>et al.</i> , 1995)	Análise Wavelet para realizar diagnósticos de degradação de isolamentos elétricos					•
(Arlí, Shibahara e Fujii, 1997)	Aplicação de Wavelets para eliminação de sinais de som produzidos por DP					•
(Hang, Kexiong e Deheng, 1997)	Extração de ruídos senoidais de banda estreita utilizando uma análise por meio da TW					•
(Quan, Gao, <i>et al.</i> , 1998)	Atenuação de ruído em simulações de DP em uma cavidade em um dielétrico utilizando TW					•
(Shim, Soragham e Siew, 2000)	Filtragem de sinais utilizando Wavelets com <i>hard-threshold</i> e <i>soft-threshold</i>					•
(Shim, Soraghan e Siew, 2001)	Uso da técnica <i>waveshrink</i> para filtragem de sinais de DP por meio da Transformada Wavelet					•
(Ma, Zhou e Kemp, 2002)	Seleção automática de Wavelet-mãe e <i>threshold</i> para filtragem de sinais de DP					•
(Satish e Nazneent, 2003)	Filtragem através da análise das componentes associadas às sub-bandas de frequências de Wavelets					•
(Zhou, Zhou e Kemp, 2005)	Identificação de sub-níveis de decomposição associados ao espectro de energia do sinal de DP					•
(Sriram, Nitin, <i>et al.</i> , 2005)	Comparação de diversas técnicas de filtragem tais como transformada de Fourier, Transformada Wavelet, etc. concluindo que a TW é a mais apropriada para a filtragem de sinais de DP	•	•	•	•	•
(Matsumoto, Shibuya e Ogura, 2011)	Análise de DP utilizando Wavelets-mãe ímpares					•
(Araujo, 2012)	Cálculo de limiares de rejeição através da análise da distribuição de probabilidade dos coeficientes de detalhe provenientes da TW para a filtragem de sinais reais de DP medidos em laboratório					•

<sup>1</sup> Resposta Infinita ao Impulso

<sup>2</sup> Resposta Finita ao Impulso

<sup>3</sup> Transformada de Fourier

<sup>4</sup> Filtragem Adaptativa

<sup>5</sup> Transformada Wavelet

## 3.2 Análise Multiresolução (AM)

A análise multiresolução permite a obtenção de informações de um determinado sinal em diferentes níveis de resolução de tempo e de frequência, tornando-se apropriada à detecção e localização de transitórios elétricos constituídos de componentes de baixas e altas frequências (Costa, 2010). Uma AM permite que se tenha uma localização no tempo-frequência de um sinal.

A localização no tempo-frequência é ter conhecimento da frequência do sinal ou função em um determinado instante de tempo. Seja um sinal no tempo  $f(t)$ , em que há o interesse em saber a frequência de um determinado intervalo de tempo, como por exemplo, no caso de um músico que toca um instrumento, em que ele deve saber qual nota musical (informação de frequência) deverá ser tocada em cada momento (instante de tempo) da música.

### 3.2.1 Técnicas de Localização no Tempo-Frequência

Existem diversas técnicas de localização no tempo-frequência, em que as mais conhecidas e utilizadas são a Transformada de Fourier (TF), Transformada Janelada de Fourier (TJF), Transformada Wavelet (TW) e Distribuição de Wigner (DW) (Daubechies, 1992).

A Transformada de Fourier (TF) é uma ferramenta matemática que, quando aplicada a um sinal/função no tempo, fornece o espectro de frequência deste, fazendo com que seja possível observar as diversas componentes de frequência que compõem o sinal. Entretanto, quando da aplicação da TF, as informações no domínio do tempo não podem ser acessadas sem que se aplique a Transformada Inversa de Fourier (TIF). Desta forma, a TF se aplica bem à análise de sinais/funções cujas componentes de frequência não variam com o tempo (Graps, 1995).

Para sinais não periódicos, que possuem variações de frequência no decorrer do tempo, é interessante saber em quais instantes ocorre a mudança destas frequências para que análises do seu comportamento possam ser realizadas, tais como ocorrência de descargas parciais, transitórios elétricos, dentre outros.

Ainda na mesma linha de considerações, a localização no tempo-frequência pode ser realizada por meio de um janelamento da transformada de Fourier, em que se

seleciona uma determinada faixa de tempo de um sinal e em seguida se aplica a transformada de Fourier. Esta ferramenta é conhecida como Transformada Janelada de Fourier (TJF), em que é possível observar o espectro de frequência de um determinado intervalo de tempo de um sinal.

A respeito de Fourier, que tratou da localização tempo-frequência e da análise multiresolução de sinais por meio da TJF, foi estudada a Distribuição de Wigner (DW) para estas aplicações (Boashash, 1990). Foi mostrado que, diferentemente da TJF, não existem funções-base para a representação do sinal por meio da DW. Entretanto, o sinal não é submetido à DW de forma linear, como na TF, e sim de forma quadrática, fato este que causa diversos fenômenos de interferência (Daubechies, 1992).

No ano de 1987, foi mostrado que os valores absolutos da TJF de uma função podem ser obtidos por meio de uma suavização da DW, mas as informações de fase são perdidas neste processo e a reconstrução do sinal não é mais possível, fato este que inviabiliza a utilização da DW na filtragem de sinais de descargas parciais (Flandrin, 1987).

A Transformada Wavelet (TW) é uma ferramenta matemática que “corta” o sinal ou função em diferentes componentes de frequência, estudando cada um destes componentes com uma resolução adequada (Graps, 1995). Diferentemente da TF, que possui apenas um conjunto de funções-base senoidais para representar os sinais, a TW possui infinitas possibilidades de funções-base (Graps, 1995). Assim, a TW propicia acesso às informações imediatas no tempo-frequência que não seriam possíveis com a utilização da TF.

### ***3.2.1.1 Diferenças Entre as Transformadas Janelada de Fourier e Wavelet***

Um meio de observar a diferença entre a TJF e a TW é de analisar as funções-base do plano tempo-frequência. É ilustrada na Figura 3.1 uma TJF, em que a janela é simplesmente uma onda quadrada, a qual trunca a função seno ou cosseno para se ajustar em uma banda de frequência em particular. Devido à utilização de apenas uma janela fixa para todas as frequências na TJF, a resolução da análise é a mesma em todas as localidades do plano tempo-frequência.

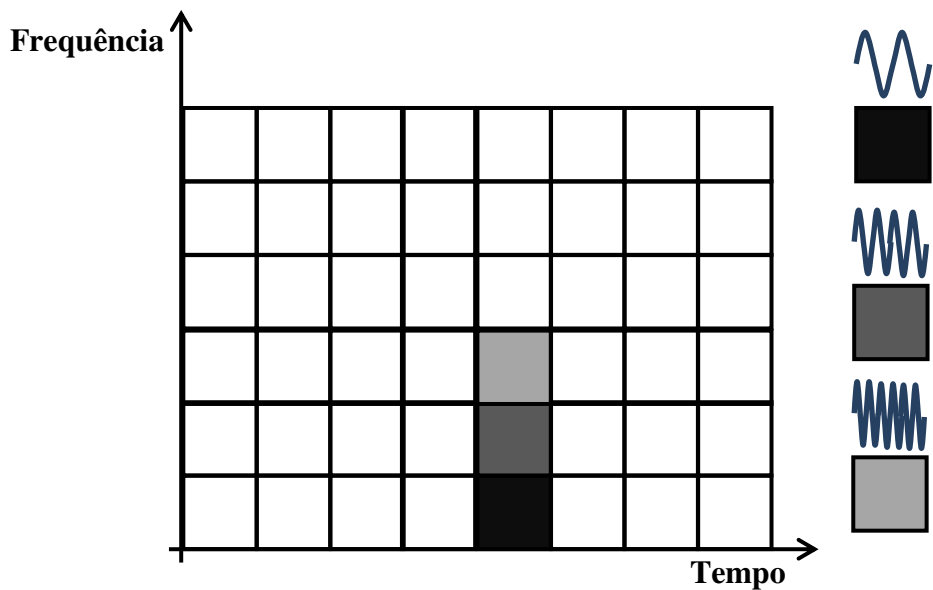


Figura 3. 1 - Análise multiresolução da TIF (Graps, 1995).

A vantagem da TW é a variação das janelas, em que funções-base curtas (altas frequências) e longas (baixas frequências) podem ser utilizadas para representar os sinais. É ilustrado na Figura 3.2 o plano tempo-frequência de uma Transformada Wavelet cuja função Wavelet-mãe é a Daubechies 4.

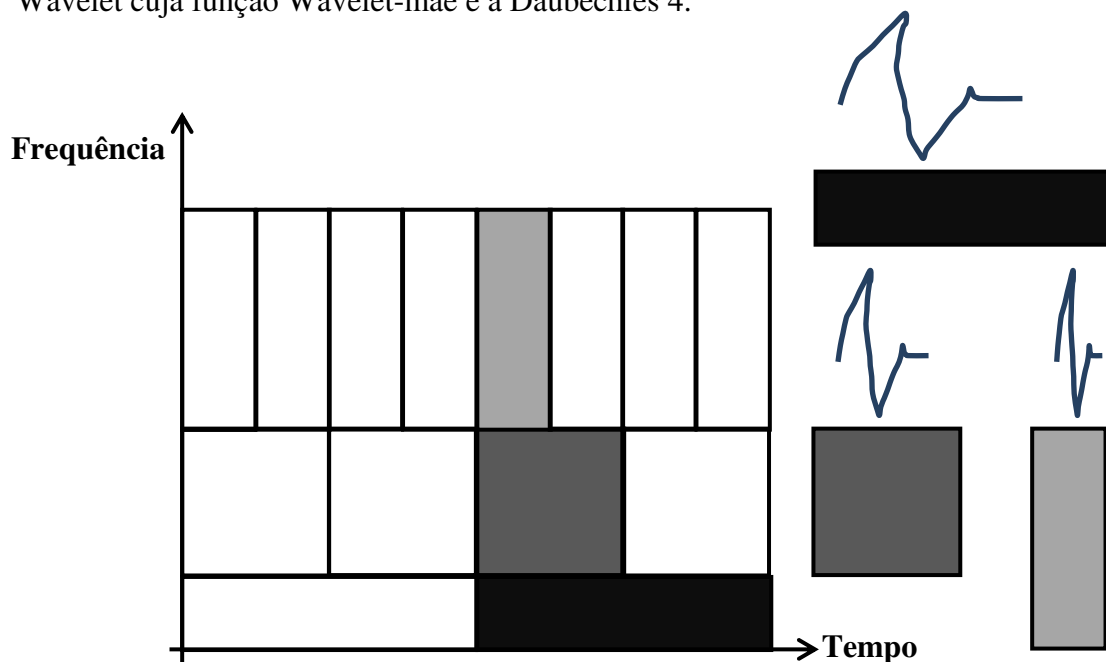


Figura 3. 2 - Análise multiresolução da TW (Graps, 1995).

A partir da observação da evolução das técnicas utilizadas por diversos autores e principalmente pelo fato de que a Transformada Wavelet permite uma análise

multiresolução muito precisa dos sinais submetidos à transformada, é justificada a utilização desta ferramenta para a filtragem de sinais de descargas. A originalidade do trabalho proposto encontra-se na análise da distribuição de probabilidade dos coeficientes de detalhe da decomposição Wavelet de sinais reais de descargas parciais para que valores de limiar de rejeição sejam calculados de forma a eliminar as componentes de frequência indesejadas do sinal, correspondentes ao ruído.

## Capítulo 4

### Transformada Wavelet

A Transformada Wavelet de um sinal é a representação deste por funções denominadas Wavelets-mãe, semelhante à Transformada de Fourier, em que as funções de representação são o seno e o cosseno (Burrus, 1998). Em 1910, Haar propôs uma transformada para realizar a representação de sinais por formas de onda conhecidas como funções de escala de Haar, porém, sua formulação matemática ocorreu apenas na década de 80 por (Grossman e Morlet, 1984), onde foi proposta a Transformada Wavelet Contínua (TWC). A partir dessa pesquisa, a comunidade científica iniciou o refinamento matemático da teoria das Wavelets, com destaque às contribuições de (Daubechies, 1992), que apresentou o conceito da Transformada Wavelet Discreta (TWD).

(Mallat, 1989) introduziu uma noção de análise multiresolução de sinais e propôs uma formulação matemática para o cálculo da Transformada Wavelet discreta de um sinal através de bancos de filtros, cujas formulações matemáticas são representadas por:

$$c_j(k) = \sum_n g(n - 2k) c_{j-1}(n) \quad (1)$$

$$d_j(k) = \sum_n h(n - 2k) c_{j-1}(n), \quad (2)$$

em que  $c_j(k)$  e  $d_j(k)$ , os coeficientes de aproximação e detalhe, respectivamente;  $g(k)$  e  $h(k)$  são os filtros passa-baixas e passa-altas, respectivamente. A Transformada Wavelet de nível  $j$  de um sinal consiste na convolução deste com os filtros  $g$  e  $h$ , em que serão obtidas as componentes de frequências mais baixas e mais altas, denominadas aproximação e detalhe, respectivamente. De acordo com (3) e (4), os coeficientes de aproximação e detalhe da primeira escala são:

$$c_1(k) = \sum_n g(n - 2k) c_0(n) \quad (3)$$

$$d_1(k) = \sum_n h(n - 2k) c_0(n), \quad (4)$$

em que  $c_0(n)$  é o sinal original.

É ilustrado na Figura 4.1 o processo de decomposição de um sinal  $c_0$  amostrado no tempo, a uma frequência de amostragem  $f_s$ , com a técnica de filtragem denominada *lifting* (Daubechies, 1992). O sinal original  $c_0$  é decomposto da componente  $c_1$ , que é o conjunto de coeficientes de aproximação e  $d_1$ , que é o conjunto de coeficientes de detalhe, referente aos conteúdos de mais baixa e mais alta frequência do sinal, respectivamente. Devido ao processo de subamostragem, o número de amostras destes coeficientes é a metade do sinal original.

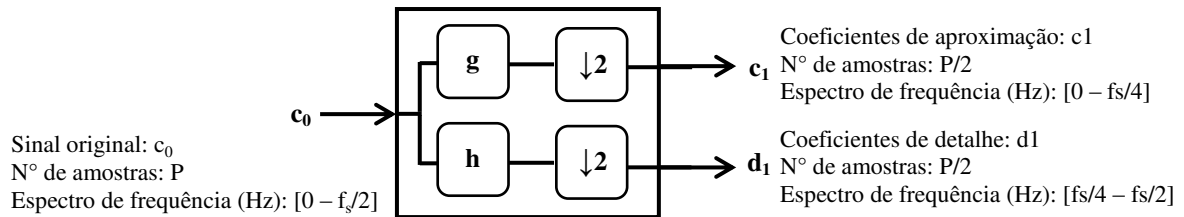


Figura 4. 1 - Primeiro Nível da TWD de um sinal (Costa, 2010).

Como consequência do teorema da amostragem de Nyquist<sup>6</sup> (Oppenheim e Schaffer, 1989), um sinal amostrado com uma frequência de amostragem  $f_s$  possui um espectro de frequência de zero a  $f_s/2$  Hz, e do fato de que os filtros digitais  $g$  e  $h$  constituírem-se em filtros espelhados em quadratura (Daubechies, 1992), os coeficientes de aproximação na primeira escala possuem espectro de frequência variando de zero a  $f_s/4$  Hz, enquanto que os coeficientes de detalhe, nesta escala, possuem espectro de frequência variando de  $f_s/4$  a  $f_s/2$  Hz.

## 4.1 Decomposição Wavelet de Múltiplos Estágios

O processo de decomposição Wavelet pode ser iterativo, com os coeficientes de aproximação sendo novamente decompostos, e assim sucessivamente. É ilustrado na Figura 4.2 uma decomposição Wavelet de 3 estágios, em que  $c_0$  é o sinal de entrada,  $P$  é o número de amostras do sinal,  $g$  e  $h$  são os filtros passa-altas e passa-baixas, respectivamente,  $\downarrow 2$  é a subamostragem de taxa 2:1,  $c_{1,2,3,\dots,N}$  e  $d_{1,2,3,\dots,N}$ , os coeficientes de aproximação e detalhe de cada nível, respectivamente.

<sup>6</sup> A frequência de amostragem de um sinal analógico, para que possa posteriormente ser reconstituído sem perda de informação, deve ser igual ou superior ao dobro da maior frequência do espectro desse sinal.

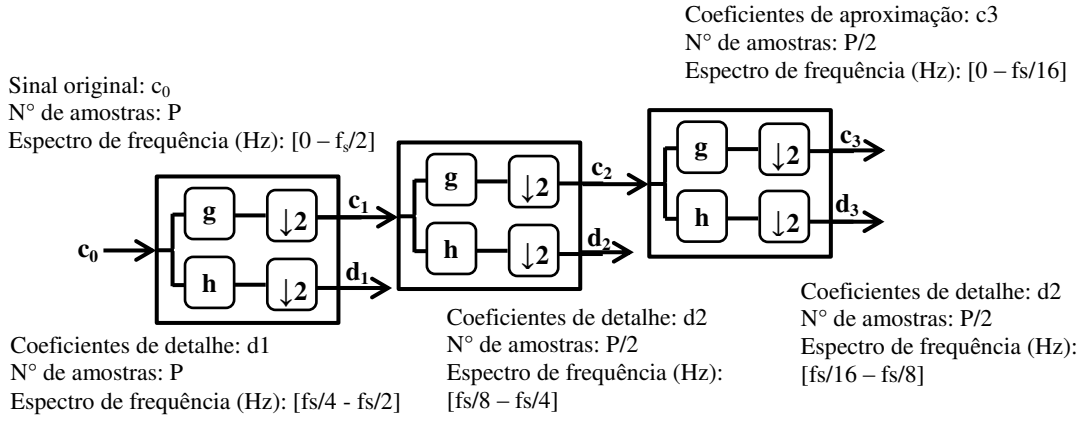


Figura 4. 2 - Decomposição Wavelet de múltiplos estágios (Costa, 2010).

Devido ao processo de subamostragem do sinal, existe um limite do nível da decomposição Wavelet de um sinal, que é representado por (5), em que  $N_{máx}$  é o nível máximo da decomposição Wavelet e  $P$  é a quantidade de pontos de dados que o sinal original é amostrado (Costa, 2006).

$$P = 2^{N_{máx}} - 1, \quad (5)$$

## 4.2 Algoritmo Piramidal para Cálculo da TWD

Seja  $f$  um sinal adquirido no tempo com  $P$  amostras. Os coeficientes de aproximação ( $c_l$ ) e detalhe ( $d_l$ ) possuem  $P/2$  amostras devido ao processo de subamostragem com taxa de 2:1. O número de amostras de  $f$  deve ser par, e consequentemente,  $c_l$  e  $d_l$  possuirão  $P/2$  amostras, cada.

De forma matricial, pode-se calcular os coeficientes  $c_l$  e  $d_l$  da seguinte forma:

$$c_1 = A_1 f \quad (6)$$

$$d_1 = B_1 f, \quad (7)$$

em que  $A_l$  e  $B_l$  são matrizes de ordem  $(P/2) \times P$ , devido ao fato que  $c_l$  e  $d_l$  possuem  $P/2$  elementos.

As matrizes  $A_l$  e  $B_l$  possuem  $P \times P$  elementos e, para a Wavelet-mãe  $db4$  (Daubechies4) são da forma (Percival e Walden, 2000):

$$A_1 = \begin{bmatrix} g(3) & g(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & g(1) & g(2) \\ g(1) & g(2) & g(3) & g(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g(1) & g(2) & g(3) & g(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & g(1) & g(2) & g(3) & g(4) \end{bmatrix} \quad (8)$$



$$B_1 = \begin{bmatrix} h(3) & h(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & h(1) & h(2) \\ h(1) & h(2) & h(3) & h(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h(1) & h(2) & h(3) & h(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & h(1) & h(2) & h(3) & h(4) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

A partir da análise das matrizes  $A_l$  e  $B_l$ , percebe-se que elas são formadas a partir de deslocamentos circulares de suas primeiras linhas. Nota-se que a linha subsequente é obtida por meio do deslocamento circular de duas unidades da linha atual, fator este que realiza o processo de subamostragem com taxa de 2:1 (Costa, 2010).

Desta forma, as equações (6) e (7) podem ser escritas da seguinte forma:

$$c_1 = \begin{bmatrix} g(3) & g(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & g(1) & g(2) \\ g(1) & g(2) & g(3) & g(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g(1) & g(2) & g(3) & g(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & g(1) & g(2) & g(3) & g(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(1) \\ f(2) \\ f(3) \\ \vdots \\ f(P) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1(1) \\ c_1(2) \\ c_1(3) \\ \vdots \\ c_1(\frac{P}{2}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$d_1 = \begin{bmatrix} h(3) & h(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & h(1) & h(2) \\ h(1) & h(2) & h(3) & h(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h(1) & h(2) & h(3) & h(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & h(1) & h(2) & h(3) & h(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(1) \\ f(2) \\ f(3) \\ \vdots \\ f(P) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1(1) \\ d_1(2) \\ d_1(3) \\ \vdots \\ d_1(\frac{P}{2}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Os coeficientes do segundo nível da transformada são:

$$c_2 = A_2 c_1 \quad (12)$$

$$d_2 = B_2 c_1, \quad (13)$$

As matrizes  $A_2$  e  $B_2$  possuem  $P/2 \times P/2$  elementos, e as equações (12) e (13) podem ser escritas da forma:

$$c_2 = \begin{bmatrix} g(3) & g(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & g(1) & g(2) \\ g(1) & g(2) & g(3) & g(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g(1) & g(2) & g(3) & g(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & g(1) & g(2) & g(3) & g(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1(1) \\ c_1(2) \\ c_1(3) \\ \vdots \\ c_1(\frac{P}{2}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_2(1) \\ c_2(2) \\ c_2(3) \\ \vdots \\ c_2(\frac{P}{4}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$d_2 = \begin{bmatrix} h(3) & h(4) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & h(1) & h(2) \\ h(1) & h(2) & h(3) & h(4) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h(1) & h(2) & h(3) & h(4) & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & h(1) & h(2) & h(3) & h(4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1(1) \\ d_1(2) \\ d_1(3) \\ \vdots \\ d_1(\frac{P}{2}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_2(1) \\ d_2(2) \\ d_2(3) \\ \vdots \\ d_2(\frac{P}{4}) \end{bmatrix}, \quad (15)$$

e que de forma análoga, os demais coeficientes dos níveis posteriores podem ser calculados.

De acordo com (11) e (15), os valores dos primeiros coeficientes de detalhe de cada nível dependem das duas amostras iniciais do sinal e das duas amostras finais. O trecho do sinal composto pelas duas últimas amostras e das duas primeiras pode conter uma descontinuidade. Quando isto acontece, o primeiro coeficiente de detalhe poderá ter uma amplitude consideravelmente diferenciada das demais. Este fenômeno é conhecido como efeito de borda, presente também no primeiro coeficiente de aproximação.

### 4.3 Recomposição Wavelet

Para realizar a Transformada Wavelet inversa de um sinal, faz-se necessária a aplicação do processo inverso da decomposição. Para a TWD inversa, os coeficientes de aproximação e de detalhe no nível  $N$  ( $A_N$  e  $D_N$ ), são sobreamostrados com uma taxa de 1:2 (operador  $\uparrow 2$ ), convoluídos com os filtros passa-baixas e passa-altas  $g(k)$  e  $h(k)$ , respectivamente, e somados, resultando no coeficiente de aproximação no nível  $N-1$  ( $A_{N-1}$ ). Este processo pode ser repetido recursivamente até que o sinal original seja reconstruído a partir dos coeficientes de aproximação e de detalhe do primeiro nível, conforme ilustrado na Figura 4.3.

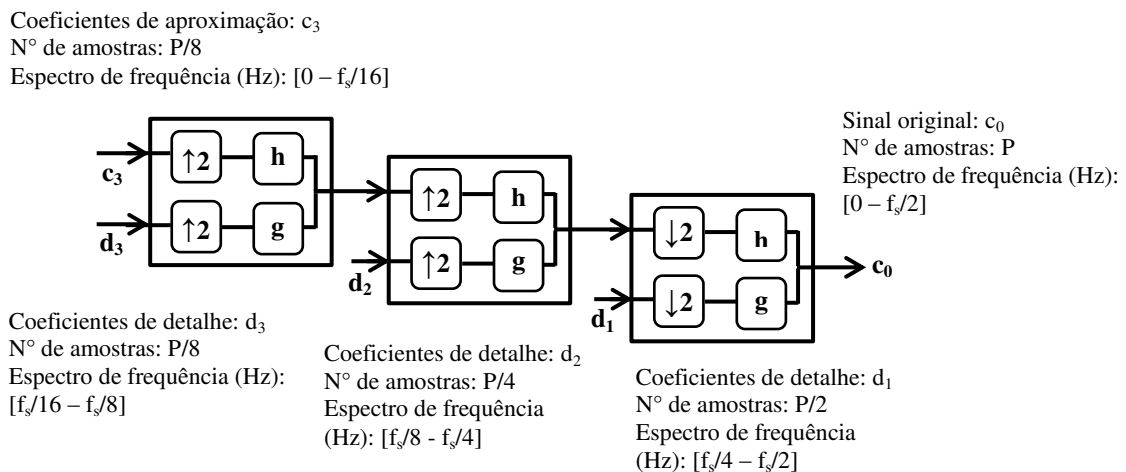


Figura 4. 3 - Recomposição Wavelet.

## 4.4 Denoising

A presença de interferências em sinais/funções faz com que exista a necessidade de eliminá-las para que se obtenha o sinal desejado. O processo de eliminação destas interferências é denominado *denoising*, o qual pode ser realizado com o auxílio de diversas ferramentas tais como a Transformada de Fourier, a Transformada Wavelet dentre outras. O objetivo deste processo é remover o ruído dos dados medidos o mais efetivamente possível, preservando as informações do sinal essenciais para a aplicação (Ma, Zhou e Kemp, 2002).

O processo de *denoising* utilizando a Transformada Wavelet consiste em realizar a decomposição Wavelet da função/sinal medido e submeter os coeficientes provenientes da transformada a valores de limiar de rejeição com o intuito de eliminar aqueles associados ao ruído, preservando os que representam o sinal de interesse (Ma, Zhou e Kemp, 2002). Após a aplicação dos limiares de rejeição, o sinal é recomposto pela Transformada Wavelet Inversa, em que o sinal filtrado é reconstituído.

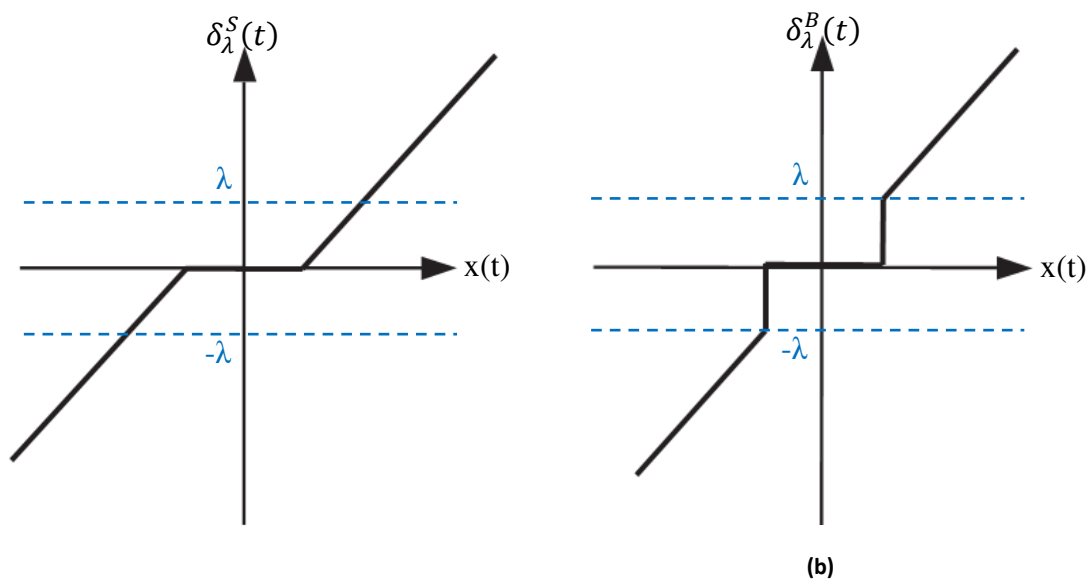
### 4.4.1 Limiar de Rejeição (*Threshold*)

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

$$\delta_{\lambda}^S(t) = \begin{cases} \text{sgn}(x(t))(|x(t)| - \lambda), & \text{se } |x(t)| > \lambda \\ 0, & \text{se } |x(t)| \leq \lambda \end{cases} \quad (16)$$

$$\delta_{\lambda}^B(t) = \begin{cases} x(t), & \text{se } |x(t)| > \lambda \\ 0, & \text{se } |x(t)| \leq \lambda \end{cases} \quad (17)$$

em que  $x(t)$  corresponde aos coeficientes da TW,  $\lambda$  é o valor de limiar de rejeição e a função  $\text{sgn}(\ )$  corresponde ao sinal do coeficiente. São ilustrados na Figuras 4.4 (a) e (b) os gráficos dos limiares suave e brusco, respectivamente, em que  $\lambda$  é o valor do limiar de rejeição (Shim, Soraghan e Siew, 2001).



(a)  
**Figura 4. 4 - Limiares de rejeição (Shim, Soraghan e Siew, 2001): (a) suave; (b) brusco.**

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

## Capítulo 5

### Material e Métodos

Neste capítulo são relacionados os materiais utilizados no trabalho de filtragem de sinais de descargas parciais utilizando a Transformada Wavelet, assim como a descrição dos métodos utilizados. Inicialmente, é apresentado o circuito geral para medição de descargas parciais, e cada um de seus equipamentos será apresentado mais detalhadamente, assim como o procedimento de medição, aquisição e filtragem dos sinais.

O circuito elétrico proposto pela IEC 60270 para medição de descargas parciais em equipamentos elétricos foi montado. Um transformador de corrente de altas frequências foi adicionado ao circuito para medir os pulsos de corrente das descargas, proporcionando uma forma de medição não invasiva, fazendo com que não seja necessário um desligamento do equipamento para instalação do equipamento de medição.

Um transformador de potencial indutivo de 13,8 kV foi utilizado como objeto de teste. Um curto circuito nos terminais de alta tensão foi realizado para que não houvesse circulação de corrente no transformador devido a limitações da fonte de tensão. Os terminais de baixa tensão também foram curto circuitados e aterrados para que o isolamento entre os enrolamentos de alta e baixa tensão pudesse ser verificado através da medição de descargas parciais pelo transformador de corrente e pelo equipamento comercial.

Os sinais medidos e registrados foram submetidos à Transformada Wavelet com todos os tipos de Wavelets-mãe disponíveis no Toolbox do MATLAB® e os limiares para todos os casos foram calculados de acordo com a análise da distribuição de probabilidade dos coeficientes de detalhe provenientes da transformada. São apresentados na Tabela 2 as Wavelets-mãe disponíveis no MATLAB®.

Tabela 2 – Wavelets-mãe disponíveis no MATLAB®

Família	Sintaxe
Daubechies	db1, db2, db3, db4, db5, db6, ... , db43, db44, db45
Coiflets	coif1, coif2, coif3, coif4, coif5
Biorotogonal	bior1.1, bior1.3, bior1.5, bior2.2, bior2.4, bior2.6, bior2.8, bior3.1, bior3.3, bior3.5, bior3.7, bior3.9, bior4.4, bior5.5
Biorotogonal Reversa	rbio1.1, rbio1.3, rbio1.5, rbio2.2, rbio2.4, rbio2.6, rbio2.8, rbio3.1, rbio3.3, rbio3.5, rbio3.7, rbio3.9, rbio4.4, rbio5.5

## 5.1 Circuito para Medição de Descargas Parciais

O circuito para a medição de descargas parciais é ilustrado na Figura 5.1, o qual segue as recomendações da IEC 60270 (IEC 60270, 2000) para a medição de descargas parciais adicionado de um transformador de corrente de altas frequências. O circuito é composto de um regulador de tensão senoidal (*RT*), um transformador elevador de tensão, um resistor de proteção (*R*), um objeto de teste (*OT*), um transformador de corrente de altas frequências (*HFCT*), um capacitor de acoplamento isento de descargas parciais (*C<sub>K</sub>*), uma impedância de medição (*Z<sub>M</sub>*) e um osciloscópio digital de alta taxa de aquisição (*OD*). Nas Figuras 5.2 e 5.3, são ilustrados o circuito montado em laboratório para a medição de descargas parciais, o conjunto de aquisição de dados e a bancada de controle do regulador de tensão, respectivamente.

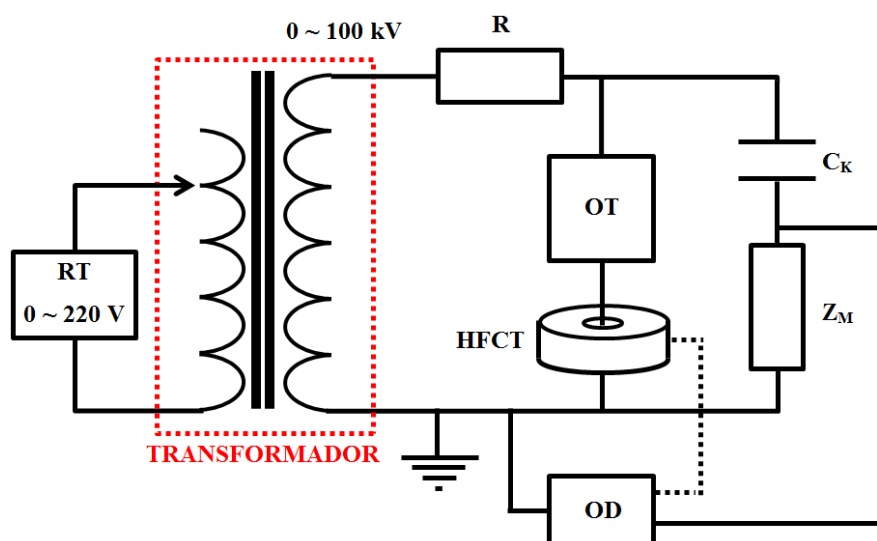


Figura 5. 1 - Esquema do circuito de medição.

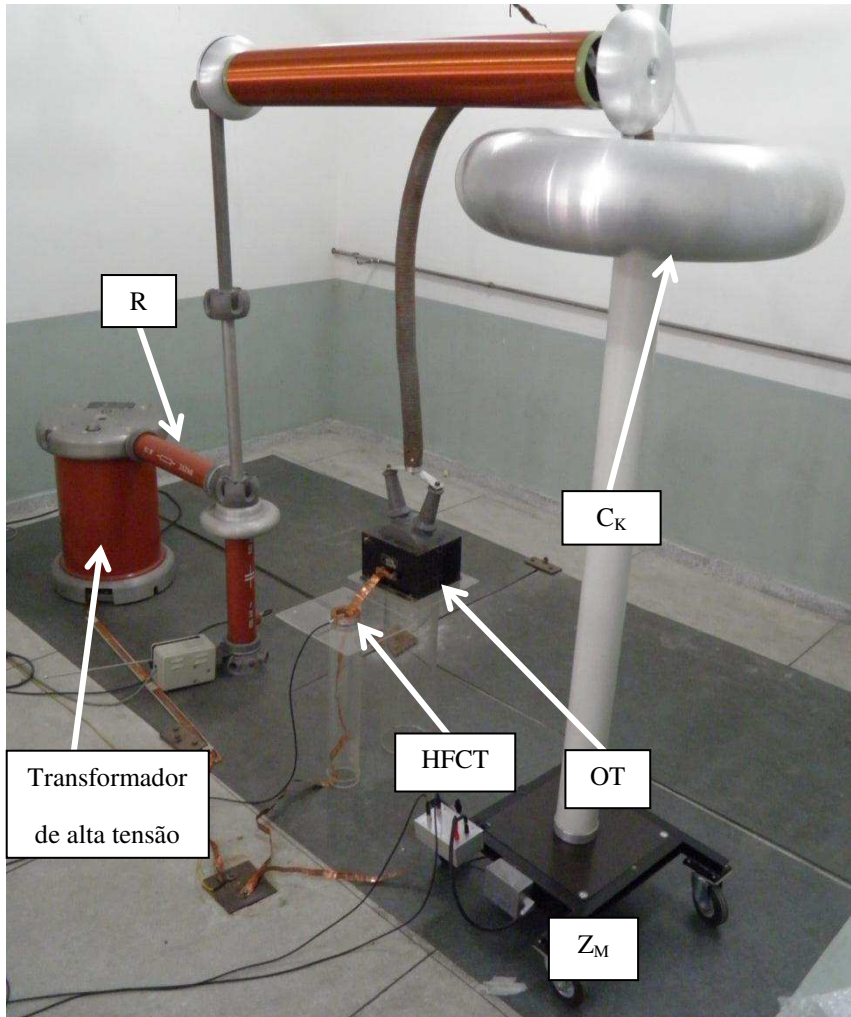


Figura 5. 2 - Circuito de medição montado em laboratório.

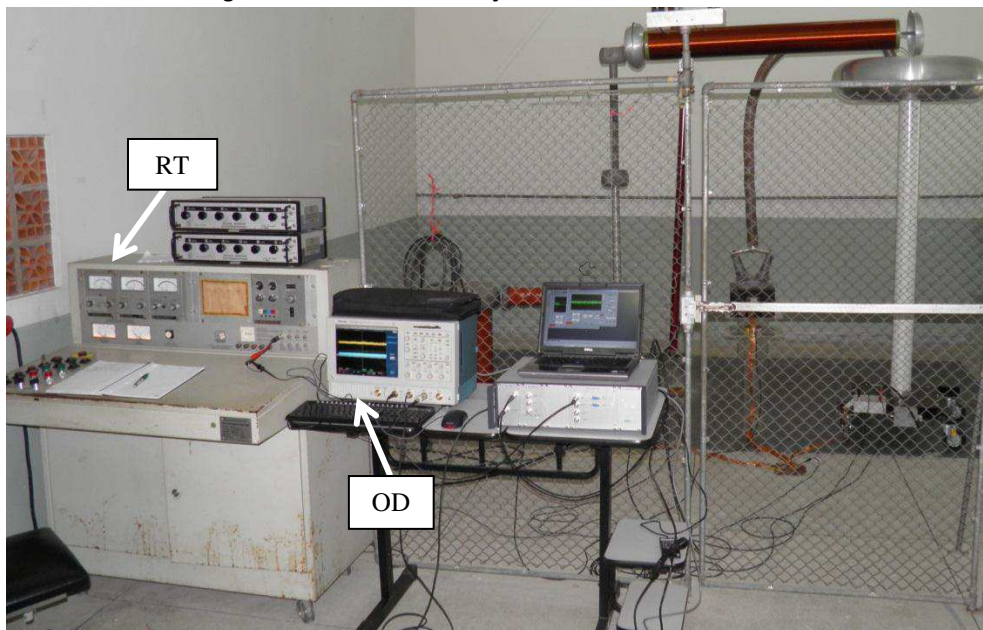


Figura 5. 3 - Bancada de controle do regulador de tensão e sistema de aquisição de dados.

### **5.1.1 Kit de Alta Tensão**

O kit de alta tensão utilizado é composto de um regulador de tensão senoidal (tensão de 0 a 220 V), um transformador elevador de tensão (0 a 100 kV – 60 Hz), um divisor capacitivo e um resistor de proteção de 282 k $\Omega$  para que no caso de falha do objeto de teste, a corrente de curto circuito proveniente da fonte seja limitada. A fonte de tensão utilizada atende aos requisitos do IEEE (IEEE, 1995) para ensaios em alta tensão, a qual determina que a distorção máxima da fonte corresponda à razão entre os valores de pico e o valor RMS da tensão, devendo ser de aproximadamente igual a  $\sqrt{2}$ , com tolerância de  $\pm 5\%$ . O objetivo destas restrições é de minimizar o efeito da inserção de componentes harmônicos externos nas medições.

### **5.1.2 Objeto de Teste**

O objeto de teste utilizado nos experimentos foi um transformador de potencial comercial monofásico, nível de tensão de 13,8 kV – 100 V, 60 Hz, modelo Var 503, fabricado pela SGC ITALIA. Este transformador foi selecionado para utilização devido ao fato que apresenta descargas parciais, as quais foram detectadas em diversas medições feitas anteriormente pelo Laboratório de Alta Tensão da UFCG.

A utilização do transformador descrito como objeto de teste foi de uma forma que se pudesse verificar a integridade do isolamento entre os enrolamentos de alta e baixa tensão, que pode ser realizado efetuando um curto circuito entre os terminais de alta tensão e também entre os terminais de baixa tensão. Desta forma, não há circulação de corrente elétrica pelos terminais de alta tensão do transformador e a medição das descargas entre os enrolamentos é feita através de um transformador de corrente acoplado aos terminais de baixa tensão do objeto de teste. É ilustrado na Figura 5.4 o transformador utilizado na medição assim como as ligações de curto circuito em seus terminais.



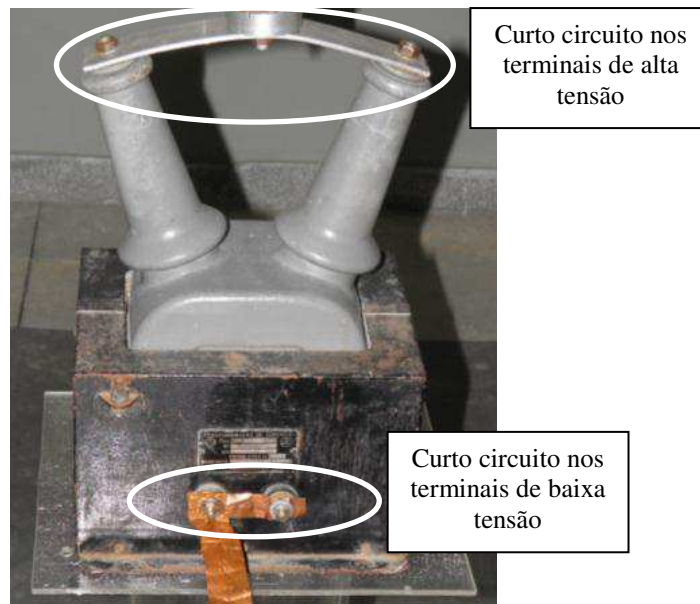


Figura 5.4 - Transformador de potencial utilizado como objeto de teste.

Foram aplicadas ao objeto de teste valores de tensão desde a tensão nominal do equipamento e também tensões acima deste valor para que se garantisse a presença de descargas parciais no equipamento, uma vez que o seu isolamento estaria submetido à campos elétricos mais intensos que o da tensão nominal. Os valores de tensão aplicada foram 8 kV (tensão nominal fase-terra), 10 kV, 12 kV e 15 kV.

### 5.1.3 Capacitor de Acoplamento e Impedância de Medição

O capacitor de acoplamento ( $C_K$ ) é utilizado para a transferência do espectro de alta frequência do sinal de DP que surge entre os terminais do objeto de teste para a impedância de medição, também fazendo com que o nível de tensão na impedância de medição seja menor para que o circuito de medição não fique sujeito à alta tensão. Para que não ocorram oscilações na transferência do pulso de DP, o capacitor de acoplamento deve ser isento de descargas parciais e também deve possuir baixa indutância. A capacitância de  $C_K$ , que no caso foi de 1000 pF  $\pm$  5%, deve ser alta o suficiente para minimizar o efeito das capacitâncias parasitas do sistema de medição na redução da amplitude das descargas. A condição  $C_K/C_T > 0,1$  deve ser satisfeita para se obter uma boa sensibilidade de medição (Lemke, Berlijn, *et al.*, 2008).

### 5.1.4 Transformador de Corrente de Altas Frequências

O transformador de corrente utilizado é o modelo FCT-055-20:1-WB, fabricado pela Bergoz, ilustrado na Figura 5.5, cujas características são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características do Transformador de Corrente de Altas Frequências

Relação de espiras	20:1
Sensibilidade	1,25 V/A
Frequência de corte superior	1750 MHz
Frequência de corte inferior	< 9,5 kHz



Figura 5.5 - Transformador de corrente de altas frequências.

### 5.1.5 Osciloscópio Digital de Alta Taxa de Aquisição

Um osciloscópio digital cuja taxa de aquisição é de  $5 \times 10^9$  amostras por segundo (5 GSa/s) foi utilizado para realizar a aquisição dos sinais de descargas parciais provenientes do HFCT. O equipamento possui um sistema operacional Windows®, o qual permite instalação do software Matlab®, o qual foi utilizado para realizar o processamento digital dos sinais adquiridos.

### 5.1.6 Software para Processamento de Sinais

O processamento dos sinais adquiridos foram realizados com o *Wavelet ToolBox* do Matlab®, o qual permite a utilização de funções da Transformada Wavelet para a realização da decomposição por meio de diversos tipos diferentes de Wavelets-mãe em

diversos níveis e também a recomposição do sinal após a submissão do sinal ao limiar de rejeição.

### 5.1.6.1 Função de decomposição Wavelet: *wavedec*( )

A função do Matlab© que realiza a decomposição Wavelet de um sinal é chamada *wavedec*, cuja sintaxe é:

$$[C, L] = \text{wavedec}(\text{input}, \text{lvl}, \text{mw}), \quad (15)$$

em que *input* é o sinal que se deseja realizar a decomposição Wavelet, *lvl* é o nível da decomposição desejada e *mw* é a função Wavelet-mãe utilizada na decomposição. Todos os coeficientes da decomposição Wavelet são salvos no vetor *C* enquanto que os tamanhos dos coeficientes de aproximação e detalhe de cada nível são salvos no vetor *L*. É ilustrada na Figura 5.6 uma decomposição Wavelet nível quatro (4) de um sinal, em que  $A_N$  e  $D_N$  são os coeficientes de aproximação e detalhe do nível *N* da transformada, e *P* representa o comprimento de cada vetor proveniente da transformada.

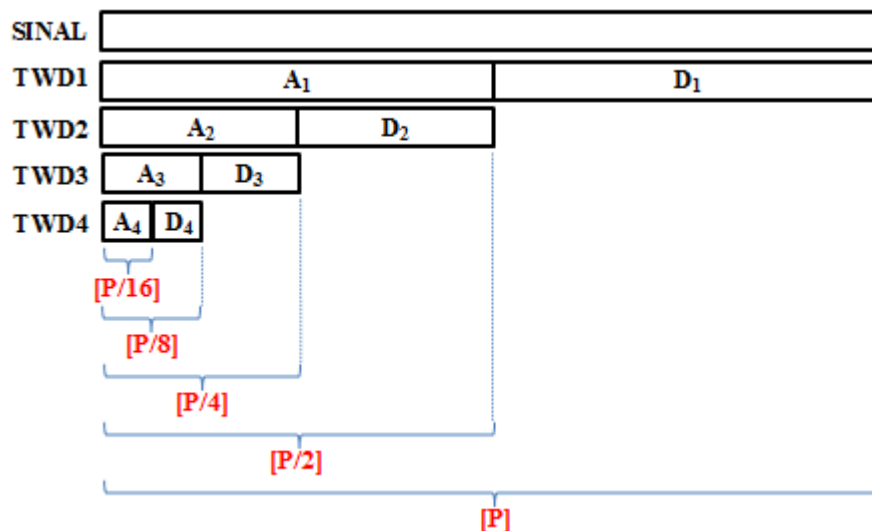


Figura 5. 6 - Decomposição Wavelet nível quatro de um sinal.

A variável *C* contém todos os coeficientes de aproximação e detalhe da decomposição, conforme ilustrado na Figura 5.7 enquanto que a variável *L* contém a quantidade de pontos de cada conjunto de coeficientes de aproximação e detalhe da decomposição, conforme (16).

$$C = \begin{bmatrix} A_4 & D_4 & D_3 & D_2 & D_1 \end{bmatrix}$$

Figura 5.7 - Sinal resultante da decomposição Wavelet nível quatro de um sinal.

$$L = \left[ \frac{P}{16}; \frac{P}{16}; \frac{P}{8}; \frac{P}{4}; \frac{P}{2} \right] \quad (16)$$

### 5.1.6.2 Função de recomposição Wavelet: *waverec()*

A função do Matlab© que realiza a recomposição Wavelet de um sinal é chamada *waverec*, cuja sintaxe é:

$$\text{waverec}(C, L, lvl), \quad (17)$$

em que *C* e *L* são os mesmos parâmetros de expressão (15).

## 5.2 Cálculo do Limiar de Rejeição

Os valores dos limiares de tensão foram determinados por meio da análise dos histogramas das distribuições de probabilidade dos coeficientes de detalhe, que possuem uma distribuição aproximadamente gaussiana, caracterizando uma predominância de ruído branco, cujo espectro de potência possui componentes em todas as frequências. O ruído branco possui uma função densidade de probabilidade com distribuição gaussiana com média (*m*) zero e desvio padrão  $\sigma$ , conforme ilustrado na Figura 5.8, em que *A* é o valor da variável e a probabilidade de ocorrência do evento é a área sob a curva.

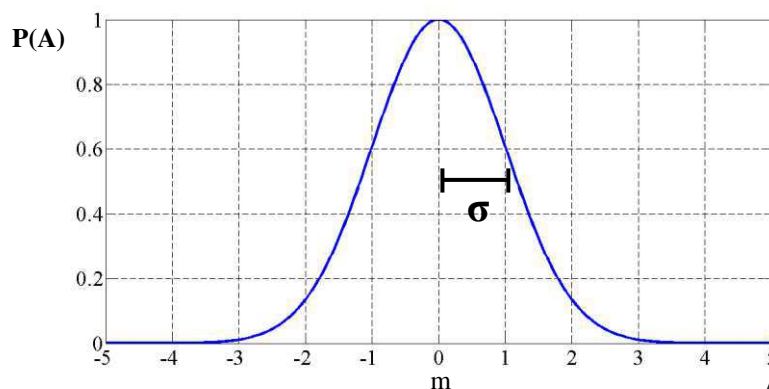


Figura 5.8 - Função Densidade de Probabilidade de uma variável com distribuição Gaussiana.

Para funções cuja distribuição é gaussiana, aproximadamente 95,45% dos eventos ocorrem com amplitudes compreendidas entre  $m \pm 2\sigma$ . Em outras palavras, quando da ocorrência de um evento, a amplitude deste tem 95,45% de probabilidade de ter valores

compreendidos no intervalo  $m \pm 2\sigma$ . Por ser um valor de probabilidade bastante alto, optou-se pelo valor absoluto do limiar como sendo  $m + 2\sigma$ . São ilustrados na Figura 5.9 (a), (b), (c) e (d), os histogramas obtidos pelo Matlab© dos coeficientes de detalhe  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ , e  $d_4$  da decomposição Wavelet nível quatro do sinal de entrada, respectivamente, em que se pode notar que as formas são semelhantes à distribuição gaussiana.

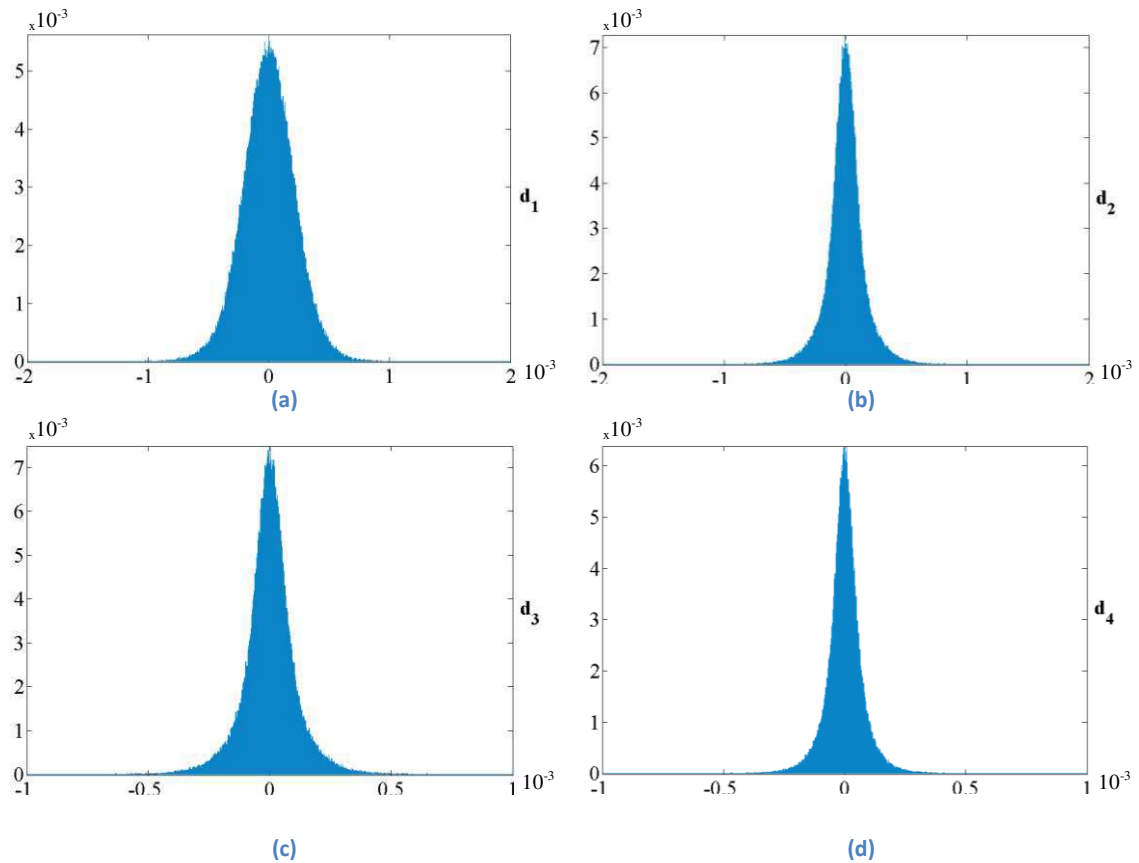


Figura 5. 9 - Distribuição dos coeficientes de detalhe para tensão aplicada de 8 kV; (a)  $d_1$ ; (b)  $d_2$ ; (c)  $d_3$ ; (d)  $d_4$ .

## Capítulo 6

### Análise de Dados e Resultados

Neste capítulo são apresentadas as análises dos dados provenientes dos testes realizados, bem como os resultados da filtragem de sinais de descargas parciais utilizando a Transformada Wavelet. Inicialmente serão mostrados os sinais obtidos pelo sistema de aquisição, a partir dos quais a filtragem foi aplicada. Em seguida, são mostrados os sinais filtrados para que uma comparação entre os sinais originais de DP e os sinais filtrados possa ser realizada e uma verificação da funcionalidade do método possa ser feita.

#### 6.1 Sinais de Descargas Parciais

Os sinais medidos possuem um tempo de 20 ms para que pelo menos um período completo da tensão senoidal aplicada de 60 Hz pudesse ser visualizada. A maior taxa de aquisição possível do osciloscópio para esta janela de tempo foi de 5 MSa/s, o que resultou em sinais representados por  $10^6$  amostras. Inicialmente uma tensão de 8 kV foi aplicada ao objeto de teste. Os dados obtidos pelo sistema de aquisição foram gravados e as formas de onda dos sinais de descargas parciais e da tensão de referência<sup>7</sup> podem ser visualizadas na Figura 6.1. Nota-se a presença de descargas nos instantes de tempo em torno dos valores que a tensão passa pelo zero, que são os momentos em que o campo elétrico é máximo, proporcionando as descargas parciais. Os máximos níveis de tensão das descargas são da ordem de 7 mV nos semiciclos positivos.

---

<sup>7</sup> As tensões de referência ilustradas nos resultados são atenuadas para que a visualização gráfica seja melhor devido à grande diferença das amplitudes das descargas com a da tensão aplicada. Com isto, é mais fácil ter uma noção de fase da tensão quando da ocorrência das descargas.

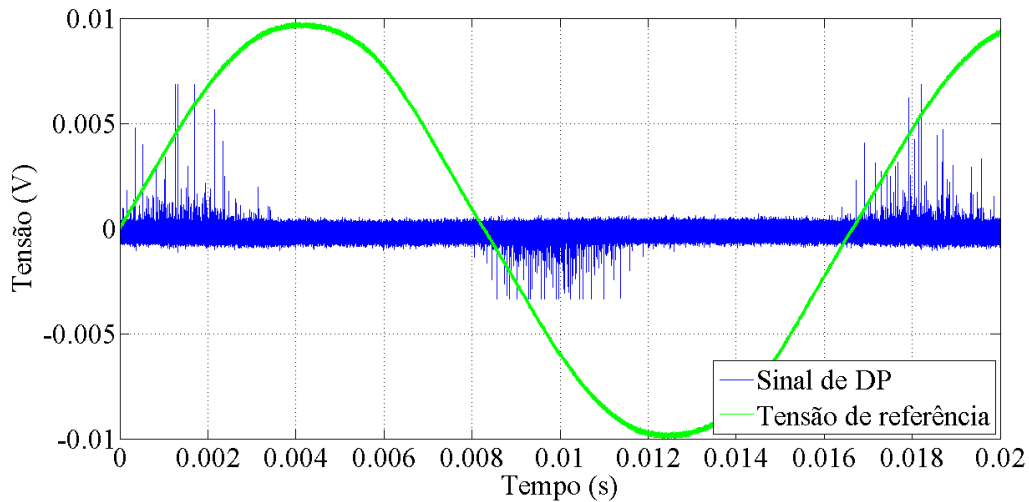


Figura 6. 1 - Sinal de DP e tensão de referência com tensão aplicada de 8 kV.

Uma vez realizada a aquisição dos dados com a tensão nominal aplicada ao objeto, realizou-se o aumento da tensão aplicada para 10 kV, cujas formas de onda dos pulsos de descargas parciais e da tensão de referência podem ser vistos na Figura 6.2. Percebe-se que as localizações dos pulsos de descargas são semelhantes ao caso anterior e os níveis máximos de tensão das descargas foram da ordem de 7,5 mV.

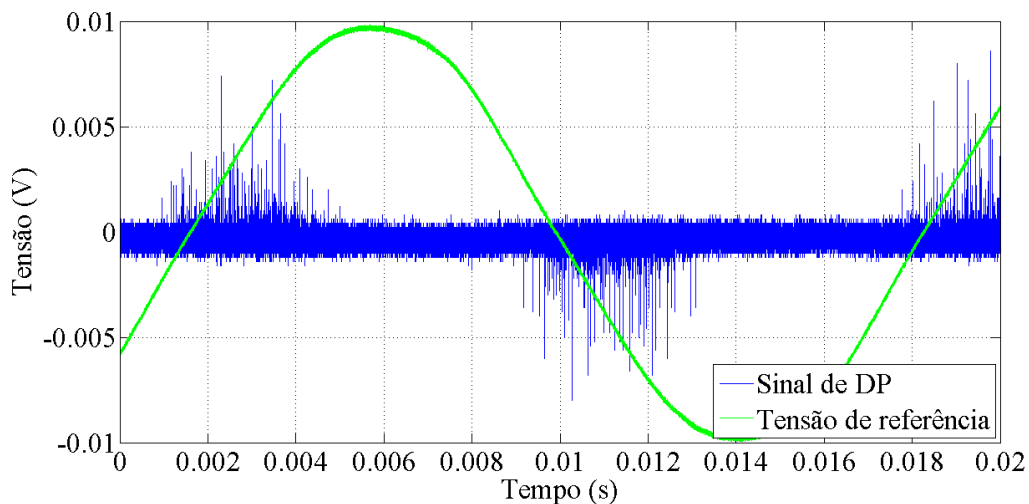


Figura 6. 2 - Sinal de DP e tensão de referência com tensão aplicada de 10 kV.

De forma similar aos procedimentos anteriores, a tensão aplicada ao objeto de teste foi incrementada para 12 kV, cujas formas de onda podem ser observadas na Figura 6.3. As localizações dos pulsos de descargas ocorrem de forma semelhante aos casos anteriores e os níveis máximos de tensão das descargas aumentam para valores em torno de 10 mV.

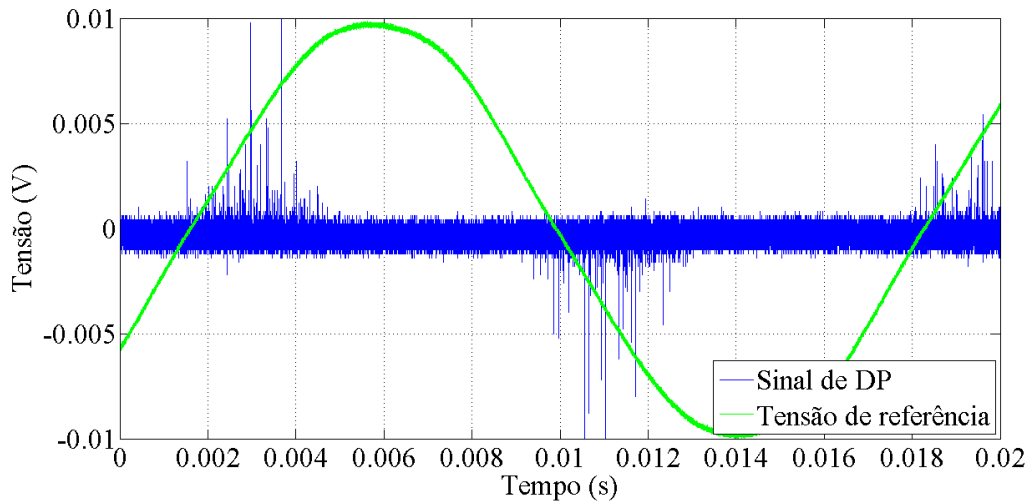


Figura 6.3 - Sinal de DP e tensão de referência com tensão aplicada de 12 kV.

O último procedimento foi elevar a tensão aplicada para 15 kV, por ser uma tensão próxima ao dobro da nominal. As formas de onda podem ser observadas na Figura 6.4, onde se pode notar a ocorrência dos pulsos semelhante aos demais casos e também o aumento do nível máximo de tensão das descargas para valores da ordem de 15 mV.

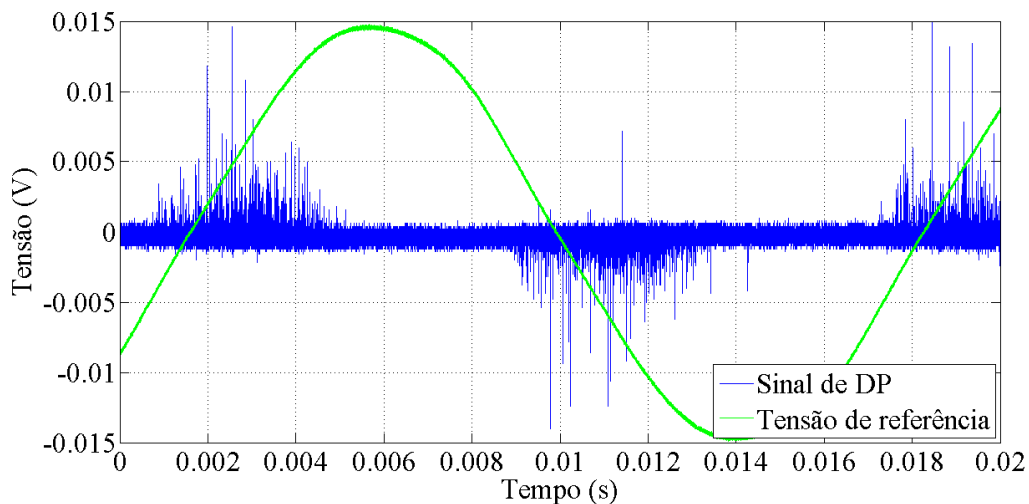


Figura 6.4 - Sinal de DP e tensão de referência com tensão aplicada de 15 kV.

## 6.2 Filtragem dos Sinais de Descargas Parciais

Os sinais adquiridos pelo sistema de aquisição foram transferidos para um computador onde foi realizado o processo de filtragem por meio da Transformada Wavelet. O processo de filtragem dos sinais adquiridos foi realizado da seguinte forma:



- Realização da decomposição Wavelet de cada sinal;
- Análise das distribuições de probabilidade dos os coeficientes de detalhe de cada sinal;
- A partir desta análise, calcular e submeter os coeficientes ao limiar.

São apresentados na Tabela 4 os valores de limiar calculados  $m \pm 2\sigma$  para cada conjunto de coeficientes da Transformada Wavelet relativos a cada nível de tensão aplicada ao objeto de teste, em que  $T4$ ,  $T3$ ,  $T2$  e  $T1$  são os valores de limiar para os coeficientes de detalhe  $d_4$ ,  $d_3$ ,  $d_2$  e  $d_1$ , respectivamente. Valores de limiar superiores como  $m \pm 3\sigma$  e  $m \pm 4\sigma$  não apresentaram muitas diferenças visuais em relação à diminuição do ruído do sinal.

**Tabela 4 - Valores de limiar para cada conjunto de coeficientes de detalhe nas diferentes tensões aplicadas**

		Limiar de tensão			
		T4	T3	T2	T1
Tensão Aplicada	8 kV	12,0e-3	9,85e-4	12,0e-3	12,0e-3
	10 kV	12,0e-3	9,85e-4	12,0e-3	12,0e-3
	12 kV	12,0e-3	10,0e-3	13,0e-3	13,0e-3
	15 kV	15,0e-3	12,0e-3	14,0e-3	15,0e-3

As formas de onda dos coeficientes de detalhe provenientes da decomposição Wavelet antes e após serem submetidos ao limiar de rejeição são ilustradas nas Figuras 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8. Nota-se a diferença entre os sinais submetidos ao limiar, em que as amplitudes de diversas componentes de frequência são removidas do sinal.

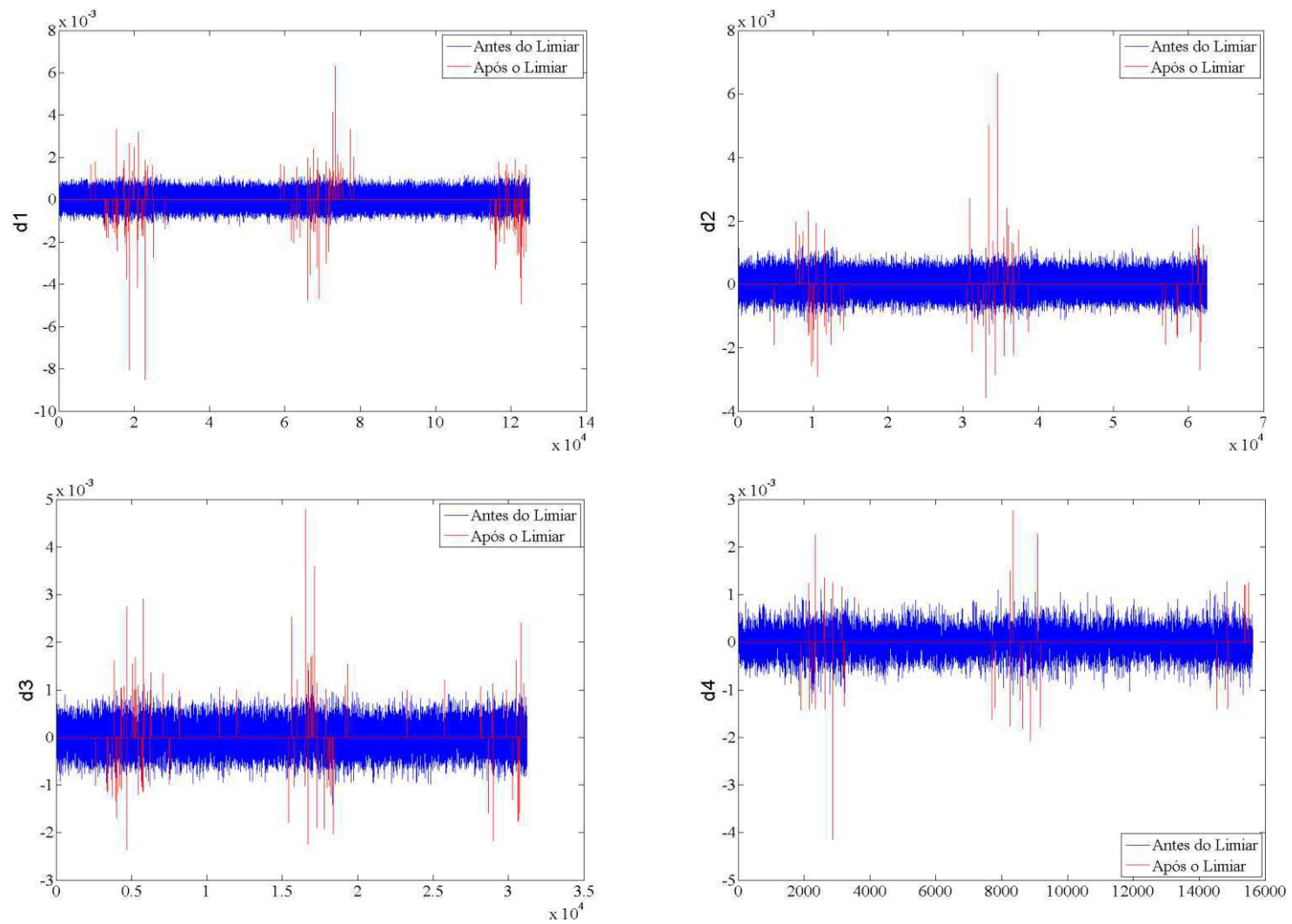


Figura 6. 5 - Coeficientes antes e após a submissão ao limiar de rejeição quando aplicados 8 kV no objeto de teste.

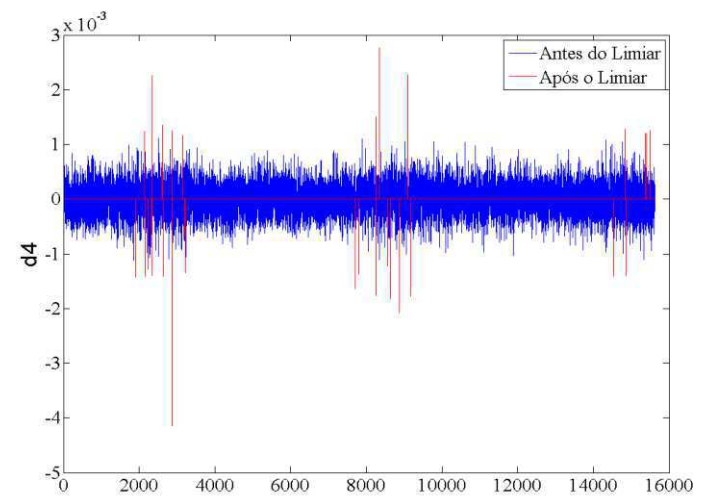
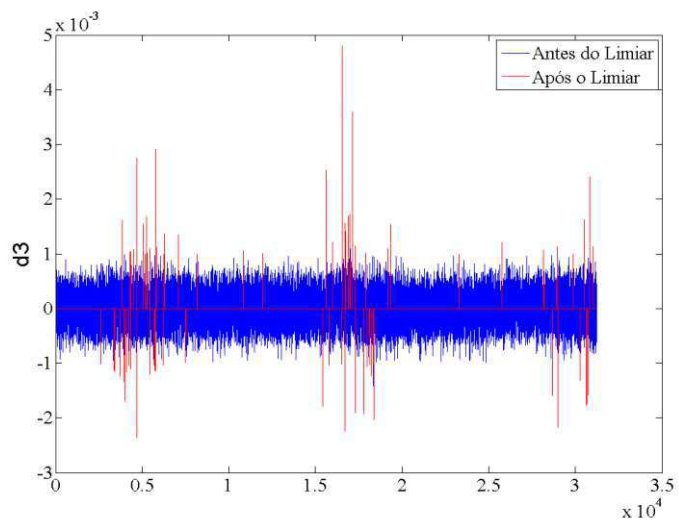
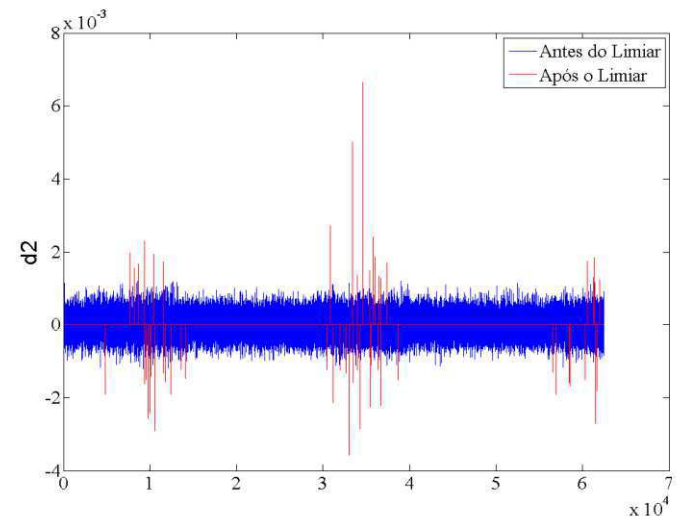
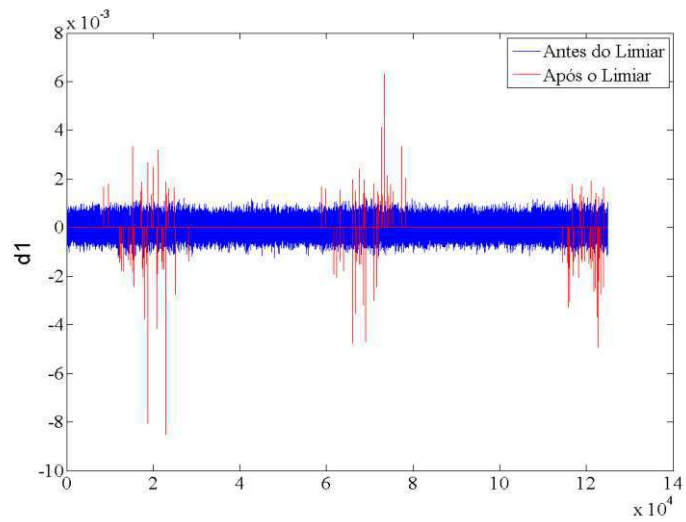


Figura 6. 6 - Coeficientes antes e após a submissão ao limiar de rejeição quando aplicados 10 kV no objeto de teste.

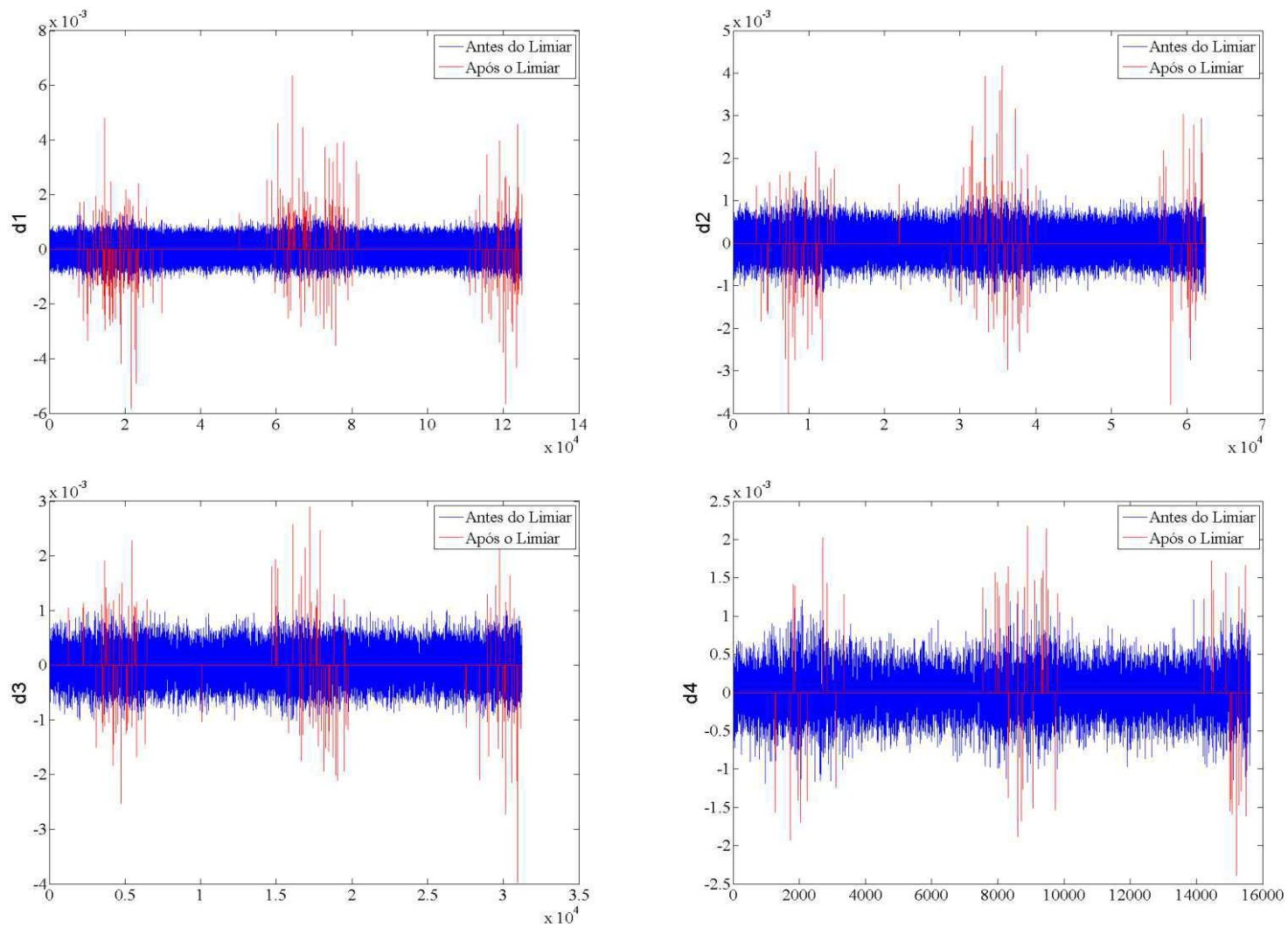


Figura 6. 7 - Coeficientes antes e após a submissão ao limiar de rejeição quando aplicados 12 kV no objeto de teste.

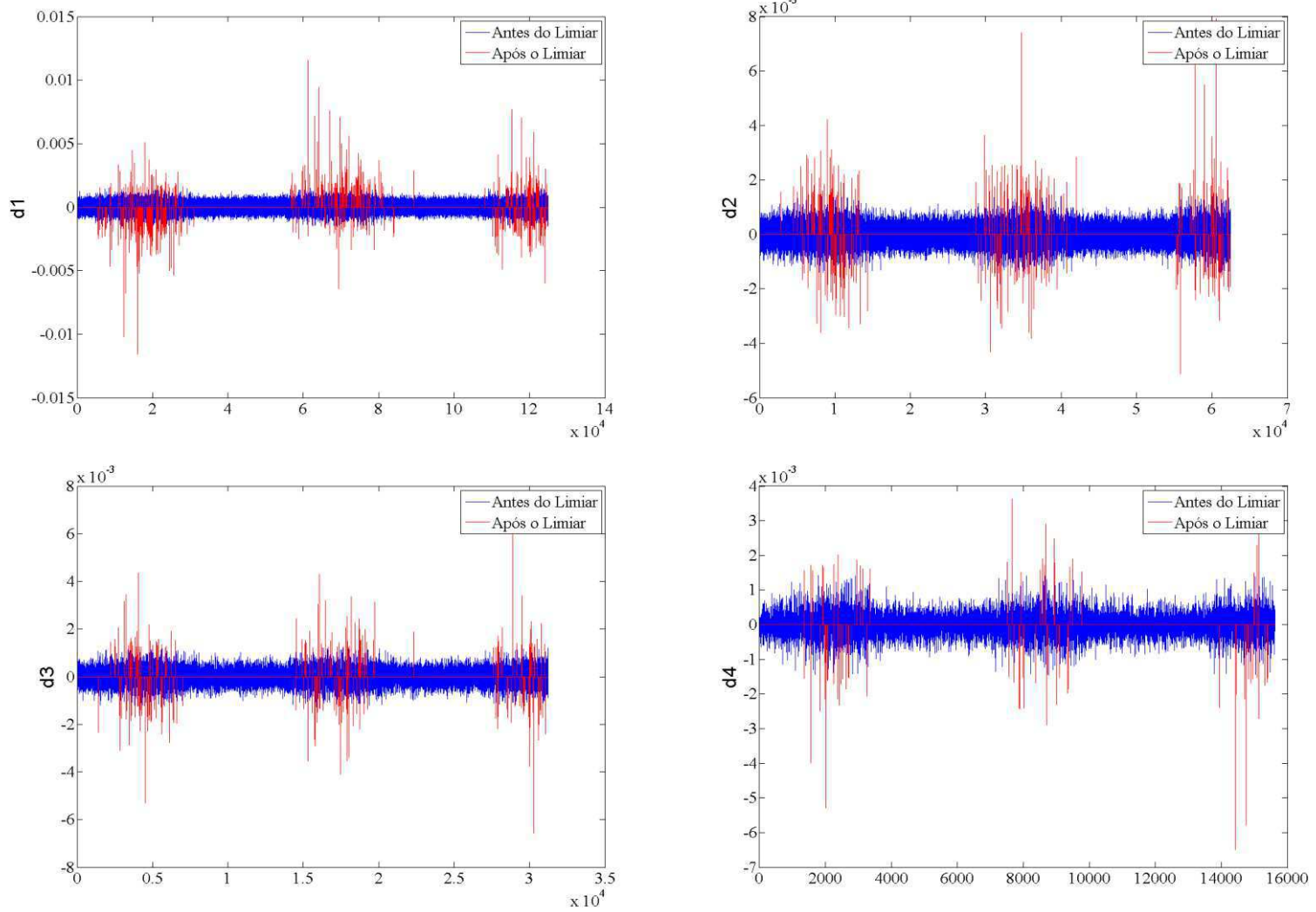


Figura 6. 8 - Coeficientes antes e após a submissão ao limiar de rejeição quando aplicados 15 kV no objeto de teste.

Após a aplicação do limiar, as componentes de frequência referentes aos ruídos presentes do sinal são suprimidas. Em seguida, a recomposição Wavelet do sinal foi realizada para que a forma de onda do sinal filtrado seja observada. Na Figura 6.9 são ilustradas as formas de onda recompostas do sinal original e do sinal filtrado, após a aplicação de uma tensão de 8 kV. Observa-se que houve uma eliminação significativa do ruído no sinal, e que os instantes de tempo da ocorrência dos pulsos são os mesmos. Em alguns pulsos filtrados, ocorreu uma pequena diminuição da amplitude em virtude do ruído, que foi eliminado nas faixas de frequência dos coeficientes de detalhe da decomposição Wavelet.

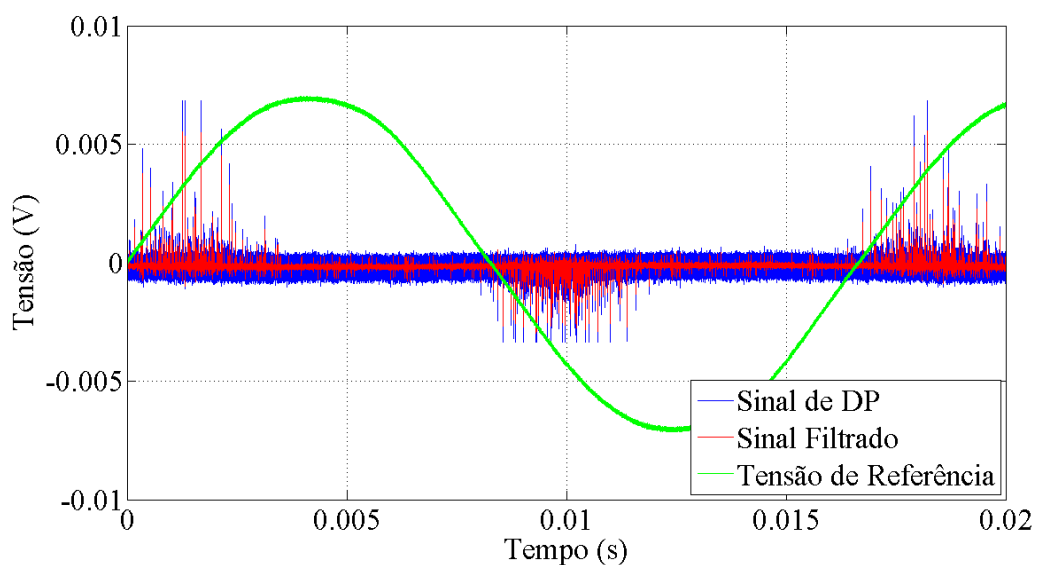


Figura 6. 9 - Sinal de DP, sinal filtrado e tensão de referência com tensão aplicada de 8 kV.

Nas Figuras 6.10 e 6.11, são ilustradas as formas de onda recompostas do sinal original e do sinal filtrado, após a aplicação de tensões de 10 kV e 12 kV ao objeto de teste, respectivamente. Observa-se que, assim como no caso em que foram aplicados 8 kV ao objeto de teste, também houve eliminações significativas do ruído nos sinais. Nota-se também que não há atrasos nem deslocamentos no tempo dos pulsos de descargas e que, pelas pequenas diferenças de amplitudes no gráfico, alguns pulsos diminuiram devido à eliminação de algumas componentes de frequência do ruído por meio da decomposição Wavelet.

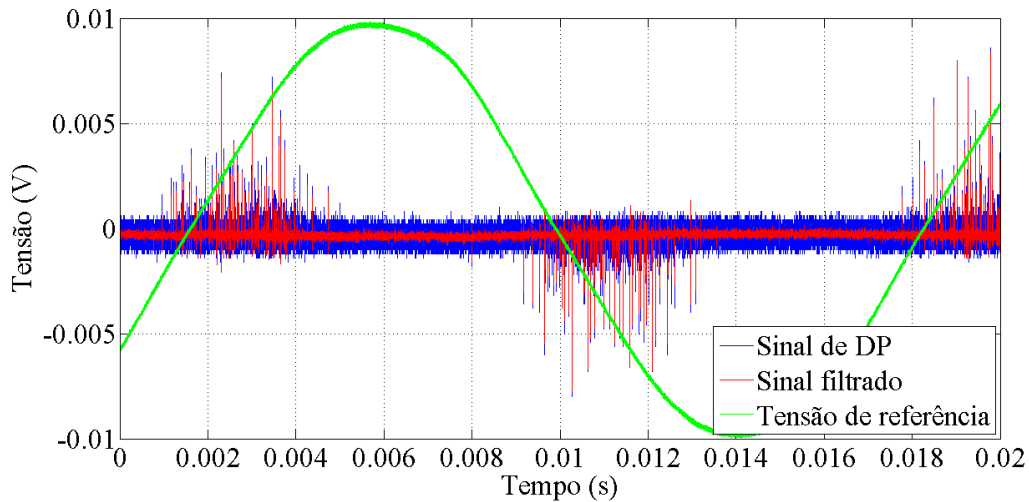


Figura 6. 10 - Sinal de DP, sinal filtrado e tensão de referência com tensão aplicada de 10 kV.

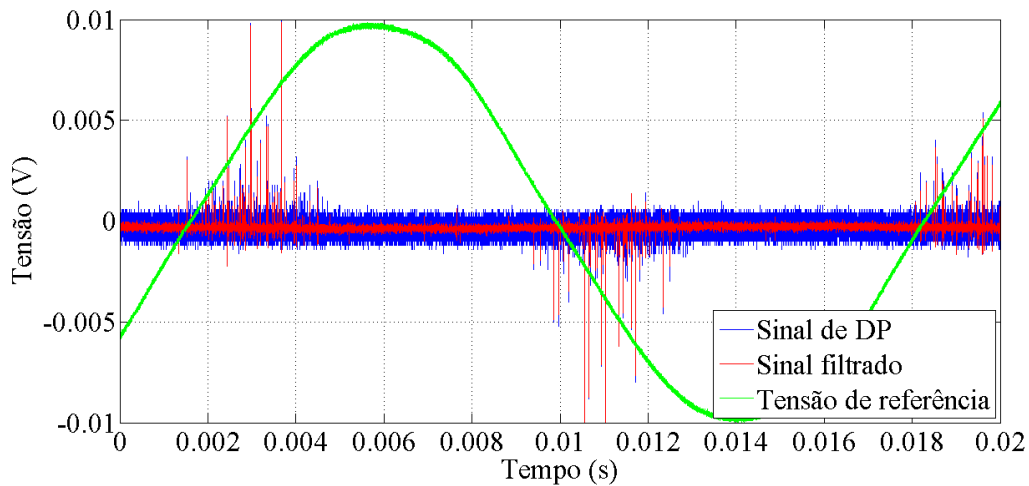


Figura 6. 11 - Sinal de DP, sinal filtrado e tensão de referência com tensão aplicada de 12 kV.

As formas de onda do sinal de DP e da filtragem após a aplicação de 15 kV ao objeto de teste são ilustrados na Figura 6.12. A localização dos pulsos de descargas no tempo é a mesma, e a amplitude de alguns pulsos são menores devido à extração de componentes de frequência do ruído por meio da decomposição Wavelet. Nota-se a presença de descargas corona no semiciclo negativo da tensão, na região que a tensão é mínima.

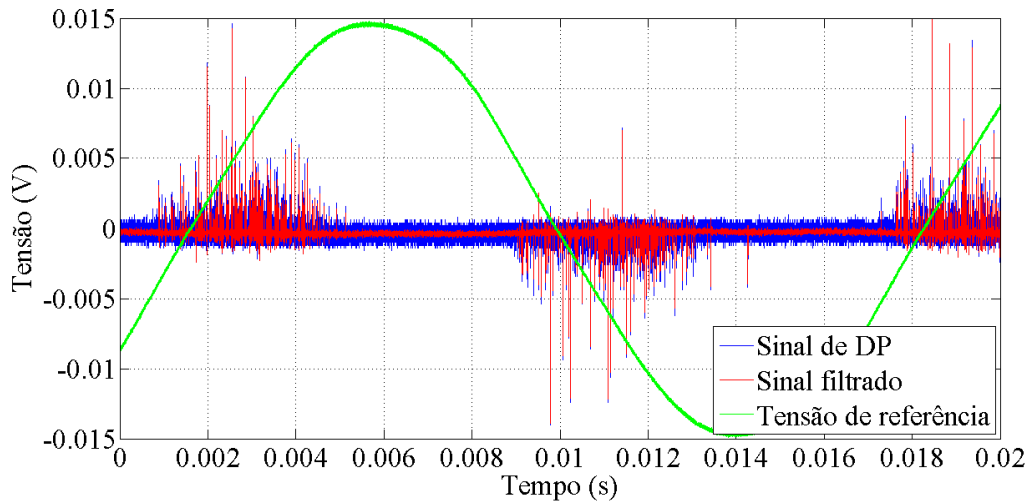


Figura 6. 12 - Sinal de DP, sinal filtrado e tensão de referência com tensão aplicada de 15 kV.

É ilustrado na Figura 6.13 um zoom em um trecho do sinal em que não ocorrem descargas parciais. A forma de onda em azul presente na ilustração é referente ao ruído do ambiente de medição enquanto que a forma de onda em vermelho é o resultado da filtragem deste ruído. Em todos os casos da filtragem, ocorreu uma redução de pelo menos 33,33% da energia do ruído nos intervalos em que não ocorrem DP.

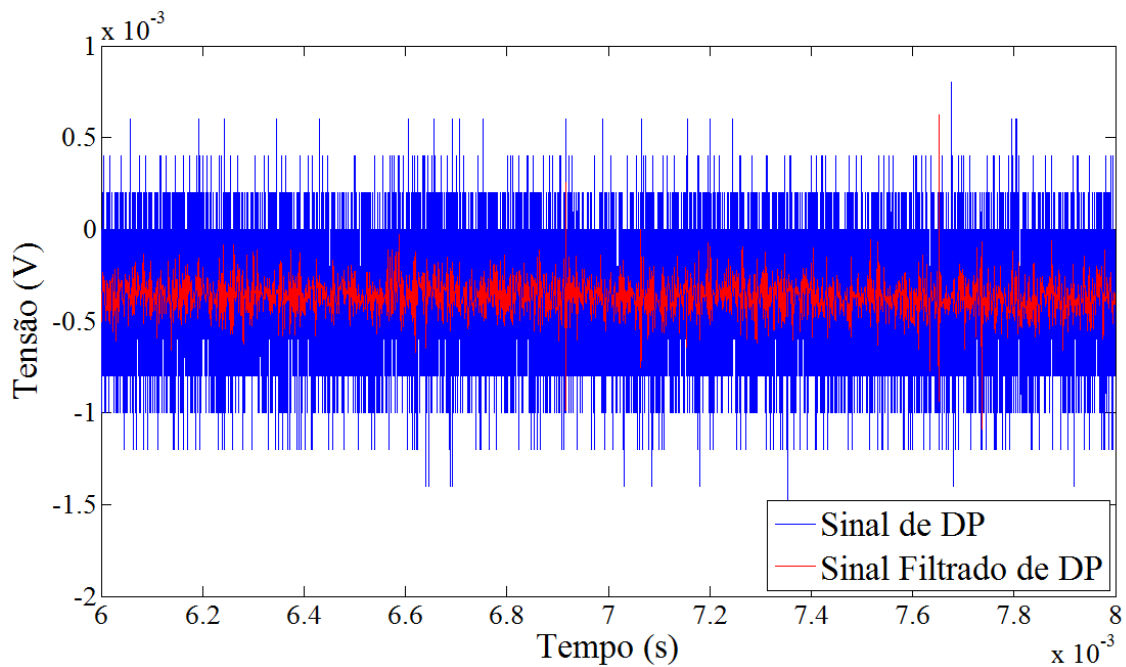


Figura 6.13 - Zoom em um trecho do sinal que não há ocorrência de DP.



## Capítulo 7

### Conclusões e Perspectivas

Este trabalho teve como finalidade a filtragem de sinais de descargas parciais com a utilização da Transformada Wavelet. Diversos métodos de filtragem de sinais de descargas parciais foram identificados e classificados de acordo com o tipo de técnica utilizada para a filtragem. O método que se destacou de forma mais positiva foi a Transformada Wavelet, devido à sua praticidade na localização tempo-frequência por meio de uma análise multiresolução.

Observou-se ainda a dificuldade encontrada na filtragem de sinais reais de descargas parciais, os quais não possuem bases para comparação, diferente de simulações de filtrações computacionais nas quais os sinais de descargas parciais e de ruído são produzidos artificialmente. Apesar de sua grande importância, a simulação computacional das interferências não é capaz de apresentar total verossimilhança às interferências reais, fator este pelo qual se optou por realizar a filtragem de sinais reais.

Foi realizada a aquisição de diversos sinais de descargas parciais provenientes da variação da tensão aplicada a um transformador de potencial indutivo para que fossem filtrados. De posse dos sinais, realizou-se a decomposição Wavelet destes e a partir da análise dos histogramas dos coeficientes de detalhe, executou-se a aplicação destes sinais a limiares de rejeição para eliminar as componentes de frequência indesejadas (ruído).

Acerca do trabalho desenvolvido, conclui-se que:

- Os valores dos limiares de rejeição de cada nível da decomposição podem ser calculados segundo o histograma de distribuição dos coeficientes de detalhe para uma filtragem satisfatória. Para funções com distribuição gaussiana, aproximadamente 95% dos valores do sinal estão compreendidos no intervalo  $m \pm 2\sigma$ , em que  $m$  é a média do sinal e  $\sigma$ , o desvio padrão;
- A reconstituição do sinal filtrado apresentou uma redução significativa do ruído, fazendo com que o sinal se aproxime do sinal de descargas parciais;

- Os instantes de tempo das ocorrências dos pulsos do sinal original e do sinal filtrado são os mesmos, fazendo com que as informações de fase da ocorrência dos pulsos não apresentassem discrepâncias;
- As amplitudes máximas de alguns dos pulsos filtrados apresentam uma pequena discrepância na sua amplitude (no máximo de 10% em alguns pulsos) em virtude da eliminação de componentes do ruído aditivas ou subtrativas, quando no instante de tempo da ocorrência do pulso.

Visando melhorar a filtragem dos sinais de descargas parciais, é necessário que sistemas de aquisição de dados com taxas de amostragem superiores sejam utilizados, possibilitando uma representação mais fiel dos sinais medidos para minimizar a quantidade de informações que são perdidas no processo de filtragem, além de possibilitar a utilização de transformadas Wavelet de níveis superiores devido à quantidade maior de amostras que representam o sinal.

Com a filtragem dos sinais de DP, torna-se possível gerar diagnósticos de equipamentos elétricos em funcionamento. Outra possibilidade é a de se realizar um monitoramento *on-line* dos equipamentos, obtendo um histórico da evolução da ocorrência de suas descargas parciais, possibilitando tomadas de decisão acerca dos períodos de manutenção, melhorando a continuidade do funcionamento do sistema de energia elétrica.

## Referências Bibliográficas

ARLI, K.; SHIBAHARA, M.; FUJII, M. **Separation of Noise from Partial Discharge Signals by Wavelets**. IEEE 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Seoul: 1997. p. 232-235.

BOASHASH, B. **Livro - Time-Frequency Signal Analysis**. Brisbane, Australia, 1990.

BORSI, H.; GOCKENBACH, E.; SCHINCHLER, U. **PD Measurements Under Noisy Condition-Possibilities and Limits of Digital Noise Rejection**. 8th International Symposium of High Voltage Engineering. Yokohama, 1993. p. 17-20.

BORSI, H.; HARTJE, M. **New Methods to Reduce Disturbance Influences on the in situ-Partial Discharge (PD) Measurements and Monitoring**. 6th Intern. Sympos. HV Engineering. New Orleans, USA, 1989. p. .

BURRUS, C. S. **Livro - Introduction to Wavelets Transform**. ed.: Prentice-Hall, 1998.

COSTA, B. F. **Tese de Doutorado - Uma Técnica de Diagnóstico em Tempo Real de Distúrbios Transitórios Baseada na Transformada Wavelet para Uso em Registradores Digitais de Perturbação**. 2010.

COSTA, F. B. **Dissertação de Mestrado - Detecção e Classificação de Falhas em Linhas de Transmissão Baseadas na Transformada Wavelet**. 2006.

CUENCA, W. M. H. **Tese de Doutorado: Caracterização dos Sinais de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão a partir de Modelos Experimentais**. ed. Rio de Janeiro, 1995.

DAUBECHIES, I. **Livro - Ten Lectures on Wavelets**. . ed.: Siam, Philadelphia 1992.

DE MACEDO, E. C. T. et al. **Assessment of Dielectric Degradation by Measurement, Processing and Classification of Partial Discharges**. IEEE 2012 International Power Modulator and High Voltage Conference. 2012.

DE MACEDO, E. C. T. et al. **Partial discharge estimation based on radiometric and classical measurements.** Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), May 2012. 807-811.

DONOHO, D. L.; JOHNSTONE, I. M. **Ideal Spatial Adaptation via Wavelet Shrinkage.** Revista Biometrika, v. 81, p. 425-455, 1994.

DONOHO, D. L.; JOHNSTONE, I. M. **Adapting to Unknown Smoothness via Wavelet Shrinkage.** Journal of the American Statistical Association, v. 90, n. 432, p. 1200-1224, December 1995.

FECHINE, J. D. M. **A Transformada de Fourier e Suas Aplicações.** Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2010.

FESER, K. et al. **An Adaptive Filter Algorithm for On-Site Partial Discharge Measurements.** Artigo do IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Boston, 1988. p. 242-245.

FLANDRIN, P. **Some Aspects of Non-Stationary Signal Processing with Emphasis on Time-Frequency and Time-Scale Methods.** Proceedings of the International Conference. Marseille, 1987.

GORUR, R. S.; CHERNEY, E. A.; BURNHAM, J. T. **Livro - Outdoor Insulators.** Phoenix, 1999.

GRAPS, A. **An Introduction to Wavelets.** Revista IEEE Computational and Science Engineering - Signal and Image Processing, p. 50-61, 1995.

GROSSMAN, A.; MORLET, J. **Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape.** Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Mathematical Analysis, 1984. 155-166.

GULSKI, E. **Digital analysis of partial discharges.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 2, p. 822-837, October 1995.

HANG, W.; KEXIONG, T.; DEHENG, Z. **Extraction of Partial Discharge Signals Using Wavelet Transform.** 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Seoul, 1997. p. 322-325.

HAO, L.; LEWIN, P. L.; SWINGLER, S. G. **Identification of multiple partial discharge sources.** Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. CMD 2008. International Conference on , pp.118-121, 21-24 April 2008.

IEC 60270, 2. **High-Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements.** 2000.

IEEE. **IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing.** 1995.

KONIG, G.; FESER, K. **A New Digital Filter to Reduce Periodic Noise in Partial Discharge Measurements.** 6th Intern. Sympos. HV Engineering. New Orleans, 1989, p. 1-4.

KÖPF, U.; FESER, K. **Rejection of Narrow-band Noise and Repetitive Pulses in On-site PD Measurements.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 2, n. 6, p. 1180-1191, 1995.

KREUGER, F. H. **Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment.** Butterworth & Co (Publishers) Ltd, v. 1, 1989.

LEMKE, E. et al. **Guide for Partial Discharge Measurements in Compliance to IEC 60270.** 2008.

LIRA, J. G. A. et al. **ZnO Surge Arresters Diagnosis Using Microcontroller.** Instrumentation and Measurement Technology Conference - IMTC, Warsaw, Poland, May 2007.

MA, X.; ZHOU, C.; KEMP, I. J. **Automated Wavelet Selection and Thresholding for PD Detection.** IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 18, n. 2, p. 37-45, March/April 2002.

MACEDO, E. C. T. **Eliminação de Ruído de Sinais de Descargas Parciais Utilizando Transformada Wavelet Discreta.** Relatório de Projeto de Pesquisa, Campina Grande, 2012.

MALLAT, S. G. **A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation.** IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 11, n. 7, 1989.

MASSARONI, M. et al. **Study on application of Wavelet analysis for degradation diagnosis of partial discharge in void.** IEEE 5th Intern. Conf. on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics. Leicester, UK, 1995. p. 371-375.

MATSUMOTO, S.; SHIBUYA, Y.; OGURA, R. **Signal Processing for Partial Discharge Pulse Detection Using Wavelet Analysis.** XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, 22-26 August 2011.

MISITI, M. et al. **Wavelet Toolbox - For Use with MATLAB®.** 1996.

MOORE, P. J.; PORTUGUES, I. E.; GLOVER, I. A. **A nonintrusive partial discharge measurement system based on RF technology.** Power Engineering Society General Meeting. 2003.

MORSHUIS, P. **Assessment of Dielectric Degradation by Ultrawide-band PD Detection.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 2, n. 5, p. 744-760, 1995.

MUHR, M. et al. **Unconventional partial discharge measurement [electrical insulation evaluation].** Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2004. CEIDP '04. 2004 Annual Report Conference on. 2004. p. 430- 433.

NAGESH, V.; GURUAI, B. I. **Evaluation of Digital Filter for Rejecting Discrete Spectral Interferences in On-site PD Measurements.** IEEE Trans. Electrical Insulation, v. 28, p. 73-84, 1993.

NATTRASS, D. A. **Partial Discharge Measurement and Interpretation.** IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 4, n. 3, May/June 1988.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-time Signal Processing.** New Jersey: Prentice-Hall, 1989.

PERCIVAL, D. B.; WALDEN, A. T. **Wavelet Methods for Time Series Analysis.** New York: Cambridge University Press, 2000.

QUAN, Y. et al. **Wavelet Transform Applying in Partial Discharge Measurements.** IEEE Intern. Sympos. Electrical Insulation. Arlington, 1998. p. 428-431.

SATISH, L.; NAZNEENT, B. **Wavelet-based Denoising of Partial Discharge Signals Buried in Excessive Noise and Interference.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 10, n. 2, p. 354-367, 2003.

SHIM, I.; SORAGHAM, J. J.; SIEW, W. H. **Digital signal processing applied to the detection of partial discharge: an overview.** IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 16, n. 3, p. 6-12, 2000.

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, v. 17, n. 1, p. 6-11, 2001.

SODRÉ, U. **Transformada de Fourier.** 2003.

SRIRAM, S. et al. **Signal Denoising Techniques for Partial Discharge Measurements.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 12, n. 6, p. 1182-1191, December 2005.

SU, Q. **Application of Digital Signal Processing Techniques for Noise Suppression in PD Measurements.** IEEE 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Brisbane, 1994. p. 602-605.

VASEGHI, S. V. **Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction.** John Wiley and Sons Ltd, 2000.

WALKER, J. S. **A Primer on Wavelets and Their Scientific Applications.** Chapman & Hall/CRC, 1999.

WICKERHAUSER, M. V. **Adapted Wavelet Analysis: From Theory to Software.** CRC Press, 1996.

ZAMAN, S. et al. **An Adaptive Digital System to Reduce Periodical Noise in On-line Partial Discharge Monitoring.** 8th Intern. Sympos. HV Engineering. Yokohama, 1993. p. 77-80.

ZHOU, X.; ZHOU, C.; KEMP, I. J. **An improved methodology for application of Wavelet transform to partial discharge measurement denoising.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 12, n. 3, p. 586-594, 2005.