

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**MESTRADO**

**DIGITALIZAÇÃO E ESTUDO DE DESCARGAS PARCIAIS**  
**UTILIZANDO TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA**

**Fabiano Fragoso Costa**

**Campina Grande – Paraíba – Brasil**

**Julho de 2001**

---

**DIGITALIZAÇÃO E ESTUDO DE DESCARGAS PARCIAIS  
UTILIZANDO TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA**

---

# **DIGITALIZAÇÃO E ESTUDO DE DESCARGAS PARCIAIS UTILIZANDO TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA**

*Dissertação apresentada à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

**Área de Concentração: Processamento da Energia**

**EDSON GUEDES DA COSTA, Dr., UFPB**  
**Orientador**

**SREERAMULU RAGHURAM NAIDU, Ph.D., UFPB**  
**Orientador**

**Campina Grande – Paraíba – Brasil**

**Julho de 2001**



C837d Costa, Fabiano Fragoso  
Digitalizacao e estudo de descargas parciais utilizando tranformada wavelet discreta / Fabiano Fragoso Costa. - Campina Grande, 2001.  
101 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

1. Wavelet 2. Processamento de Sinais 3. Descargas Parciais 4. Dissertacao - Engenharia Eletrica I. Costa, Edson Guedes da II. Naidu, Sreeramulu Raghuram III. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) IV. Título

CDU 621.3.015.3(043)


**DIGITALIZAÇÃO E ESTUDO DE DESCARGAS PARCIAIS UTILIZANDO  
TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA**

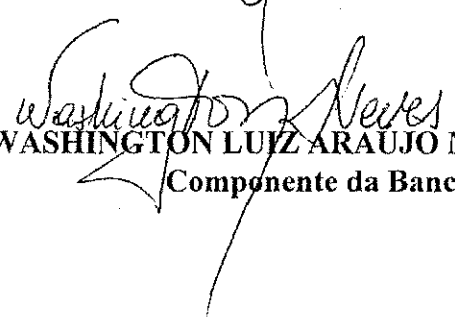
**FABIANO FRAGOSO COSTA**

Dissertação Aprovada em 24.08.2001

  
**PROF. EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFPB**  
Orientador

**PROF. SREERAMULU RAGHURAM NAIDU, Ph.D., UFPB**  
Orientador

  
**PROF. ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA, Dr., UFPB**  
Componente da Banca

  
**PROF. WASHINGTON LUIZ ARAUJO NEVES, Ph.D., UFPB**  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
Agosto - 2001

*Ao meu avô, Paulo Martins, (in memoriam),*  
**DEDICO.**

## Agradecimentos

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro dado para este projeto de pesquisa.

À Coordenação de Pós-graduação de Engenharia Elétrica (COPELE) pela oportunidade dada à realização deste trabalho.

Ao meu pai, Adriano, por me ensinar a pensar com independência e por, sempre, me incentivar a estudar.

À minha amada mãe, Flora, por sempre estar ao meu lado nos momentos difíceis.

À toda minha família, meu irmão, Giordano e Túlio.

Aos extraordinários amigos Marcelo e Mateus, que mesmo distantes sempre me deram a maior força.

À Larrice, pelo carinho e compreensão, que me foram fundamentais.

Ao grande amigo e companheiro de guerra, J.A.M.

Ao grande amigo trezeano, Alexandre, por sempre me apoiar quando precisei.

Aos novos e já grandes amigos da Hell's gate., Andrei, mestre da informática, o professor de economia, Lenildo, e ao Márcio.

Aos grandes amigos Luiz Alberto e Ivan, por seus grandes ensinamentos.

À minha extraordinária amiga Diana por sempre me escutar.

Aos amigos Damásio, Alcício, Hélvio, Luciano e a todos os funcionários do LAY e da COPELE.

Ao meu orientador e amigo Edson Guedes por acreditar em mim e simplesmente tornar possível este trabalho.

Ao meu professor e orientador Naidu pela idéia deste trabalho.

Ao grande professor Marcos Barbosa, por sempre me incentivar a estudar.

Aos professores Antônio Marcus, Benemar e Freire por sempre estarem dispostos a me ajudar.

Ao professor Washington Neves pelas ponderações sempre relevantes ao meu trabalho.

# SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	vi
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	ix
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	xv
<b>RESUMO.....</b>	xvi
<b>ABSTRACT.....</b>	xvii
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.</b>	1
<b>CAPÍTULO 2 – TRANSFORMADAS WAVELETS E DESCARGAS PARCIAIS.</b>	4
2.1 Introdução às Wavelets.	4
2.1.1 Sistema Wavelet – Uma Breve Revisão.	7
2.2 Descargas Parciais.	12
2.3 Aplicação da Transformada Wavelet para o Estudo das Descargas parciais.	29
<b>CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.</b>	37
3.1 Introdução.	37
3.2 Materiais.	37
3.3 Método.	43
3.3.1 Detecção de Descargas Parciais e Digitalização dos Sinais.	43
3.3.2 Procedimentos de Ensaios.	51



---

3.3.4 Procedimento Para Análise dos Sinais.	52
<b>CAPÍTULO 4 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.</b>	<b>54</b>
4.1 Introdução	54
4.2 Configuração 1.	55
4.3 Configuração 2.	58
4.4 Configuração 3.	68
4.5 Configuração 4.	72
4.6 Configuração 5.	75
4.7 Simulação.	78
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.</b>	<b>94</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.</b>	<b>96</b>
<b>ANEXO.</b>	<b>99</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Sinais no domínio do tempo e seus espectros de frequência.	6
Figura 2.2 Representação esquemática do <i>down-sampling</i> de um sinal.	10
Figura 2.3 Representação esquemática da convolução de um sinal.	10
Figura 2.4 Estrutura de Banco de Filtros com dois estágios para análise do sinal.	10
Figura 2.5 Estrutura de Banco de Filtros com dois estágios para síntese do sinal.	11
Figura 2.6 (a) Material sob ensaio; (b) Diagrama do circuito equivalente.	13
Figura 2.7 Processo de descargas parciais em um dielétrico.	14
Figura 2.8 Arranjo convencional para medição de descarga parcial.	15
Figura 2.9 Esquema de detecção em VHF em turbogeradores (ZODERVAN et al, 2000).	18
Figura 2.10 Exemplo de espectro de frequência obtido com um analisador de espectro (ZODERVAN et al 2000)	19
Figura 2.11 Representação de um amplificador com faixa de passagem limitada.	20
Figura 2.12 Defeito originário de descarga parcial (a) e seu padrão associado (b) para análise tradicional (NATRASS, 1988)	22

<b>Figura 2.13</b> Distribuição do número de descargas por janela (KREUGER, 1993) .	22
<b>Figura 2.14</b> Distribuição da magnitude média das descargas parciais por janela (KREUGER et al, 1993).	23
<b>Figura 2.15</b> Valores médios e distribuições de 15 operadores estatísticos (GULSKI, 1993).	25
<b>Figura 2.16</b> Pulsos esporádicos em eletrodos ponta-plano metálicos submersos em óleo mineral. Tensão entre os eletrodos de 8 kV e separação de 3 mm, (POMPILI et al, 1995).	27
<b>Figura 2.17</b> Seqüência de pulsos em eletrodos ponta-plano metálicos submersos em óleo mineral. Tensão entre os eletrodos de 13 kV e separação de 8 mm, (POMPILI et al, 1995).	28
<b>Figura 2.18</b> Padrão de uma seqüência de pulsos em eletrodos ponta metálica-plano formada pela superfície de óleo sobre plano metálico aterrado. Tensão entre eletrodos de 8 kV e separação entre o óleo e a ponta com valor de 5 mm, (POMPILI et al, 1995).	28
<b>Figura 2.19</b> Técnica de <i>hard-thresholding</i> : (a) Sinal original, (b) Sinal após o <i>hard-thresholding</i> .	30
<b>Figura 2.20</b> (a) Sinal original, (b) aproximação na escala 6 (SHIM et al, 1999).	30
<b>Figura 2.21</b> Sinal reconstruído pela transformada wavelet inversa (SHIM et al, 1999).	31
<b>Figura 2.22</b> (a) Sinal original (b) sinal após passar pelo <i>hard-thresholding</i> .	32

<b>Figura 2.23</b>	<b>Decomposição de um sinal até a nona escala (SHIM et al, 2000).</b>	<b>33</b>
<b>Figura 2.24</b>	<b>Wavelet do tipo Daubechies-2 (SHIM et al, 2000).</b>	<b>34</b>
<b>Figura 2.25</b>	<b>(a) Sinal original, (b) Sinal após a supressão de ruído (SHIM et al, 2000).</b>	<b>34</b>
<b>Figura 2.26</b>	<b>(a) Pulso de descarga parcial, (b) pulso de ruído (KRANZ, 2000).</b>	<b>35</b>
<b>Figura 2.27</b>	<b>(a) Representação do sinal no domínio do tempo, (b) Representação do sinal usando o plano tempo-frequência (KAWADA et al, 2000).</b>	<b>36</b>
<b>Figura 3.1</b>	<b>Configuração do arranjo experimental para produzir corona.</b>	<b>38</b>
<b>Figura 3.2</b>	<b>Configuração para simular descargas parciais em um cubo de polietileno.</b>	<b>39</b>
<b>Figura 3.3</b>	<b>Variação da configuração para simular descargas parciais em cubo de polielileno.</b>	<b>39</b>
<b>Figura 3.4</b>	<b>Configuração para simulação de cavidades gasosas para discos de acrílico.</b>	<b>40</b>
<b>Figura 3.5</b>	<b>Configuração para testes dos cilindros de resina epóxi.</b>	<b>41</b>
<b>Figura 3.6</b>	<b>Fotografia de três transformadores de corrente.</b>	<b>42</b>
<b>Figura 3.7</b>	<b>Arranjo geral para geração de detecção e digitalização.</b>	<b>44</b>
<b>Figura 3.8</b>	<b>Fotografia do arranjo para detecção de descargas parciais em um transformador de corrente.</b>	<b>45</b>
<b>Figura 3.9</b>	<b>Circuito de detecção de descargas parciais em um transformador de corrente.</b>	<b>46</b>

<b>Figura 3.10 Fotografia do detector de descargas parciais, do osciloscópio e do computador pessoal</b>	48
<b>Figura 3.11 Transferência dos dados de 10 bits para o computador .</b>	49
<b>Figura 3.12 Formato dos arquivos transferidos do digitalizador para o computador.</b>	50
<b>Figura 4.1 Sinal de corona registrado para 32 K amostras.</b>	55
<b>Figura 4.2 Sinal de corona registrado para 16 K amostras</b>	56
<b>Figura 4.3 Representação Z do sinal C1.</b>	57
<b>Figura 4.4 Representação Z do sinal C2.</b>	57
<b>Figura 4.5 Sinal Pt1 no domínio do tempo.</b>	59
<b>Figura 4.6 Sinal Pt2 no domínio do tempo.</b>	59
<b>Figura 4.7 Sinal Pt3 no domínio do tempo.</b>	60
<b>Figura 4.8 Sinal Pt4 no domínio do tempo.</b>	60
<b>Figura 4.9 Sinal Pt5 no domínio do tempo.</b>	61
<b>Figura 4.10 Representação através do gráfico Z do sinal Pt1</b>	62
<b>Figura 4.11 Representação através do gráfico Z do sinal dPT1</b>	62
<b>Figura 4.12 Comparação entre o sinal original e o sinal com ruído reduzido dPt1.</b>	63
<b>Figura 4.13 (a) Sinal Poli 1 , (b) Poli 2, Poli 3 no domínio do tempo.</b>	65
<b>Figura 4.14 Representação Z do sinal Poli 1.</b>	66

<b>Figura 4.15 Representação Z do sinal Poli 3 .</b>	<b>66</b>
<b>Figura 4.16 Sinal dPoli3 no domínio do tempo.</b>	<b>67</b>
<b>Figura 4.17 Representação Z do sinal dPoli 3</b>	<b>67</b>
<b>Figura 4.18 Sinal Epox 1 no domínio do tempo.</b>	<b>69</b>
<b>Figura 4.19 Sinal Epox 4 no domínio do tempo.</b>	<b>69</b>
<b>Figura 4.20 Representação Z do sinal Epox1.</b>	<b>70</b>
<b>Figura 4.21 Representação Z do sinal Epox4.</b>	<b>70</b>
<b>Figura 4.22 Sinal dEpox 4 no domínio do tempo.</b>	<b>71</b>
<b>Figura 4.23 Representação Z do sinal dEpx4.</b>	<b>71</b>
<b>Figura 4.24 Sinal Acri 1 no domínio do tempo.</b>	<b>73</b>
<b>Figura 4.25 Sinal Acri 2 no domínio do tempo.</b>	<b>73</b>
<b>Figura 4.26 Sinal Acri 3 no domínio do tempo.</b>	<b>74</b>
<b>Figura 4.27 Representação Z do sinal Acri 2.</b>	<b>74</b>
<b>Figura 4.28 Representação Z do sinal Acri 3.</b>	<b>75</b>
<b>Figura 4.29 Sinal TC168.2 no domínio do tempo.</b>	<b>77</b>
<b>Figura 4.30 Representação Z do sinal TC168.2</b>	<b>77</b>
<b>Figura 4.31 Detalhe do pulsol de corona C1.</b>	<b>78</b>
<b>Figura 4.32 Detalhe do pulso de descarga parcial.</b>	<b>78</b>

<b>Figura 4.33 Pulso de descarga parcial</b>	79
<b>Figura 4.34 Pulso de corona.</b>	80
<b>Figura 4.35 Pulsos de descargas parciais superpostos a senóide de 60 Hz</b>	80
<b>Figura. 4.36 Decomposição wavelet para os sinais de descargas parciais.</b>	81
<b>Figura 4.37 Pulsos de corona (ponta na baixa tensão).</b>	82
<b>Figura 4.38 Decomposição da wavelet para pulsos de corona (ponta na baixa tensão).</b>	83
<b>Figura 4.39 Pulsos de corona (ponta na baixa tensão).</b>	84
<b>Figura 4.40 Pulsos de descarga parcial e de corona superpostos a uma senóide.</b>	85
<b>Figura 4.41 Decomposição wavelet para pulsos de corona e de descargas parciais</b>	86
<b>Figura 4.42 Processo de redução de corona.</b>	87
<b>Figura 4.43 Pulso de ruído idealizado.</b>	88
<b>Figura 4.44 Pulsos de ruído e de descargas parciais ocorrendo em regiões distintas</b>	89
<b>Figura 4.45 Decomposição wavelet para os pulsos de ruído e de descargas parciais ocorrendo em regiões distintas.</b>	90
<b>Figura 4.46 Processo de <i>hard thresholding</i> no MATLAB.</b>	91
<b>Figura 4.47 Pulsos de descargas parciais cobertos pelos pulsos de ruído.</b>	92
<b>Figura 4.48 Sinal após o processo de <i>hard thresholding</i>.</b>	93

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1 Características do transformador de corrente.</b>	<b>42</b>
<b>Tabela 3.2 Especificações do detector de descargas.</b>	<b>48</b>
<b>Tabela 3.3 Resumo dos ensaios para o transformador de corrente.</b>	<b>52</b>
<b>Tabela 4.1 Resumo dos ensaios da configuração 2 – Tempo de aplicação como variável.</b>	<b>58</b>
<b>Tabela 4.2 Resumo dos ensaios da configuração 2 – Nível de tensão como variável.</b>	<b>64</b>
<b>Tabela 4.3 Resumo dos ensaios da configuração 3 – Nível de tensão como variável.</b>	<b>68</b>
<b>Tabela 4.4 Resumo dos ensaios dos discos de acrílico.</b>	<b>72</b>
<b>Tabela 4.5 Resumo dos ensaios para transformador de corrente.</b>	<b>76</b>



## RESUMO

Descargas parciais são descargas elétricas que curto-circuitam parcialmente o isolamento de equipamentos de alta tensão. Elas podem, em excesso, danificar determinados materiais isolantes. O ensaio de descargas parciais é um método não destrutivo para avaliação das condições de operação desses equipamentos. Neste trabalho, ensaios de descargas parciais foram realizados através de um sistema de aquisição de dados formado por um circuito de detecção, um detector de descargas parciais comercial e de um digitalizador. As descargas parciais foram analisadas utilizando a transformada wavelet discreta para decompor e representar os sinais de descargas em suas diferentes resoluções. É mostrado que a representação proposta é uma alternativa viável para a caracterização dos sinais de descargas parciais.

## **ABSTRACT**

Partial discharges are electrical discharges that partially bridges the insulation of high voltage apparatus. If their amplitudes are high, they may lead to insulation failures in some materials. Partial discharge measurements are nondestructive tests used for the evaluation of the operating conditions of high voltage equipments. In this work, measurements were carried out by using a data acquisition system comprising a partial discharge detecting circuit, a commercial discharge detector and a digitizer. The partial discharges were analyzed by means of the discrete wavelet transform method used to decompose and represent the partial discharge signals in their different resolutions. It is shown that the proposed representation is a viable alternative to characterize partial discharge signals.

# CAPÍTULO I

## Introdução

Um sistema de isolamento elétrico é uma estrutura contendo um ou mais materiais isolantes em contato ou não com partes condutoras associadas. A qualidade de um sistema de isolamento é geralmente estimada por diferentes ensaios desde a seleção dos materiais. Os ensaios de monitoramento de equipamentos no campo vêm sendo cada vez mais utilizados, pois fornecem informações referentes à expectativa de vida e à estabilidade. Tais ensaios possuem grande importância econômica, pois permitem diagnosticar com antecedência falhas que podem conduzir à ruptura nos isolamentos que causam grandes prejuízos.

Ensaio de descargas parciais são aceitos como um método sensível e realista de identificar defeitos em isolamentos de equipamentos de alta tensão, já que possibilitam a identificação de descargas de valores muito baixos (dezenas de picocoulomb). Para registrar sinais de descargas parciais, diferentes métodos de aquisição foram desenvolvidos. O mais usual deles, é o método de aquisição elétrica, que foi o utilizado nesse trabalho, principalmente porque possibilita uma calibração mais confiável das medidas das descargas parciais.

No diagnóstico de equipamentos de alta-tensão, sinais de descargas parciais podem ser comparados com padrões de sinais originários de defeitos conhecidos. O diagnóstico pode ser feito por um especialista ou por um sistema autônomo de reconhecimento de padrões de descargas parciais. O especialista utiliza ferramentas de visualização para, a partir de experiências anteriores, avaliar qual tipo de defeito o sinal adquirido representa. Os sistemas autônomos são desenvolvidos para reconhecer características que não estão destacadas em uma determinada maneira de representação do sinal.

Sinais são tradicionalmente representados através de sua magnitude em função do tempo. A representação dos sinais de descargas parciais de maneira alternativa à tradicional

objetiva incrementar os estudos para desenvolver características que possam ser reconhecidas por sistemas autônomos. Por exemplo, os componentes de frequência de um sinal não podem ser observados pela sua representação tradicional. Contudo através do cálculo da transformada de Fourier os componentes de frequência são determinados e podem servir como entrada para um sistema autônomo de reconhecimento.

A transformada wavelet discreta é uma ferramenta de processamento de sinais que pode ser útil para a elaboração de uma representação alternativa de sinais de descargas parciais. Neste trabalho, ela servirá para representar os sinais de descargas parciais em diferentes resoluções. As resoluções serão visualizadas em um gráfico tridimensional.

O sistema de detecção de descargas parciais utilizado possui banda de passagem de centenas de kHz, ou seja a faixa de frequência do sinal que o detector pode medir possui a largura de centenas de kHz. Sistemas com esta característica são os mais usados comercialmente. A digitalização dos sinais de descargas parciais será feita por um digitalizador, acoplado ao detector, com intervalo de amostragem que pode atingir 10 ns.

Cinco configurações experimentais serão idealizadas para gerarem diferentes tipos de sinais de descargas parciais. Os sinais para cada configuração serão analisados utilizando a transformada wavelet discreta. Com o objetivo de proceder à digitalização e ao estudo de descargas parciais utilizando transformada wavelet discreta, vários ensaios foram realizados. Os ensaios apresentam como variáveis: o tempo de aplicação da tensão elétrica, o nível de tensão aplicado ao objeto de ensaio e a localização das cavidades onde as descargas ocorrem. Diferentes resoluções dos sinais analisados serão decompostas através da transformada wavelet discreta. A decomposição permite que se utilize uma técnica para reduzir os níveis de ruídos dos sinais captados. Para alguns dos sinais captados no trabalho, a técnica será utilizada.

Para alcançar os objetivos, o desenvolvimento deste trabalho está organizado em cinco capítulos cujos conteúdos estão apresentados a seguir:

No Capítulo II, apresenta-se uma introdução à teoria da transformada wavelet e os principais conceitos sobre descargas parciais e sua detecção. Uma breve revisão bibliográfica da transformada wavelet aplicada a descargas parciais é descrita.

Os materiais e métodos utilizados nos ensaios, na digitalização e tratamento dos sinais são apresentados no Capítulo III. O capítulo também mostra as configurações físicas adotadas e os arranjos elétricos utilizados.

No Capítulo IV são mostradas as análises e discussões dos resultados obtidos experimentalmente. A visualização dos sinais através das suas amplitudes em função do tempo e de suas respectivas representações Z é apresentada. Também é apresentada a análise de alguns sinais simulados computacionalmente.

Finalizando, no Capítulo V, são descritas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros na área.

## CAPÍTULO II

### Transformadas Wavelets e Descargas Parciais

#### 2.1 – Introdução às Wavelets

A transformada wavelet é uma ferramenta de análise de sinais. É uma operação linear que permite uma representação alternativa dos sinais analisados. Tradicionalmente, um sinal é representado através de suas amplitudes em função do tempo. As transformadas são operações, geralmente lineares, que agem sobre os sinais e permitem que eles sejam manipulados mais facilmente ou permitam realçar características dos sinais que, na representação tradicional, não são aparentes. A transformada de Fourier, por exemplo, realça as características do espectro de frequência do sinal analisado.

Uma wavelet (onda pequena) é um sinal que tem sua energia concentrada no tempo e pode se tornar uma ferramenta de análise de fenômenos transitórios, não-estacionários ou variantes no tempo. Ela permite a análise dos sinais no domínio do tempo e no domínio da frequência, com fundamentação matemática flexível, pois o algoritmo é de fácil implementação além de possuir um reduzido número de operações em comparação à análise de Fourier.

A transformada wavelet tem sido usada durante muitos anos nas áreas de compressão de imagens, acústicas, sísmicas e computação visual. Recentemente, muitos artigos têm sido apresentados propondo o uso das wavelets para análises de sistemas de potência (SANTOSO, 1996).

A teoria matemática em direção às transformada wavelets remontam a Joseph Fourier (1807), e sua descoberta que um sinal pode ser representado ou decomposto através da soma de senos e co-senos. Os senos e co-senos são as bases da decomposição. A transformada wavelet pode decompor os sinais através de bases bem localizadas no domínio do tempo. Isto significa

que os sinais base são limitados no domínio do tempo, ao contrário dos senos e co-senos que são sinais infinitos.

A transformada de Fourier clássica e sua inversa fornecem uma relação biunívoca entre o domínio do tempo  $[x(t)]$  e o domínio da frequência  $[X(\omega)]$ .

$$x(t) \leftrightarrow X(\omega). \quad (2.1)$$

O espectro de frequência de um sinal é obtido através da transformada de Fourier. Na Figura 2.1, exemplifica-se a maneira pela qual os espectros são visualizados. Embora o conteúdo de espectro do sinal seja facilmente obtido usando a transformada de Fourier, nenhuma informação sobre a localização dos componentes de frequência no domínio do tempo é visualizada. Para sinais estacionários como os apresentados nas Figuras 1(a) e 1(b), todos os componentes de frequência perduram durante todo o sinal. Enquanto para o sinal não estacionário, mostrado na Figura 1(c), os componentes de frequência mudam no decorrer do tempo. Comparando as Figuras 1(b) e 1(c), verifica-se que o módulo da transformada de Fourier de ambos os sinais fornece espectros de frequência similares, embora oriundos de sinais diferentes no domínio do tempo. O módulo da transformada de Fourier mostra somente o espectro de frequência de um sinal e não fornece informações sobre as mudanças dos componentes de frequência no domínio do tempo. A diferenciação entre os sinais das figuras 1(b) e 1(c) é evidenciada pela fase da transformada de Fourier. Porém a mudança dos componentes de frequência dos sinais em relação ao tempo ainda fica pouco evidente.

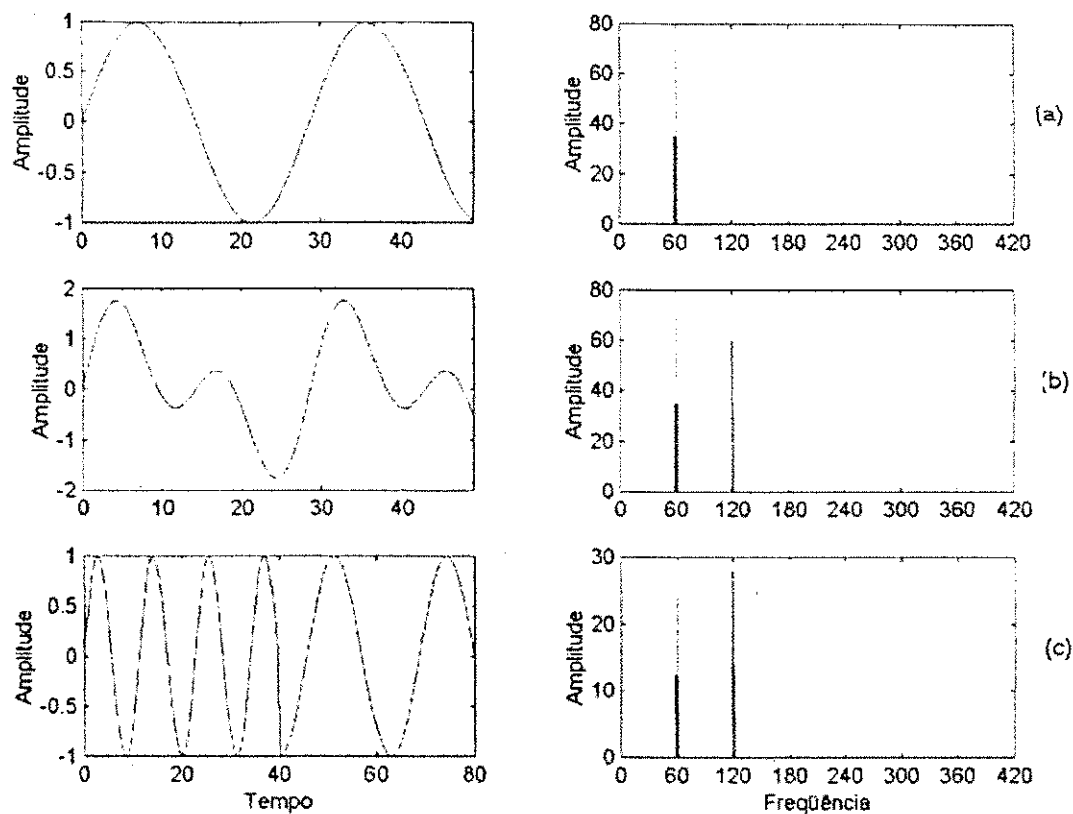


Figura 2.1 – Sinais no domínio do tempo e seus espectros de freqüência

A transformada de Fourier de Tempo-Curto (STFT - *Short-Time Fourier Transform*) foi introduzida por Dennis Gabor em 1946, permitindo que se extraíam tanto informações no domínio do tempo como no domínio da freqüência. O sinal analisado é segmentado, através de uma função janela  $w(t-\tau)$ , que o multiplica. As segmentações são consideradas estacionárias e a transformada de Fourier de cada segmento do sinal é realizada. A Equação 2.2 ilustra a maneira que a transformada Gabor de um sinal é obtida.

$$STFT(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot w(t-\tau) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt. \quad (2.2)$$

A Equação 2.2 mede a similaridade entre o sinal e a janela moduladora. A parametrização é feita por ' $\tau$ ' e por ' $\omega$ ', que fornecem as informações no domínio do tempo e da freqüência respectivamente. Apesar disto, o fato da janela  $w(t-\tau)$  ser de tamanho constante, representa uma limitação da STFT. Para superar a limitação, a transformada wavelet (TW) foi



desenvolvida. A TW usa uma técnica de janelamento similar a STFT. A diferença é que a janela varia de tamanho, permitindo assim que o sinal seja analisado ou “comparado” com diferentes escalas da janela. Então, dessa maneira, a análise do sinal pode ser feita em diferentes resoluções. A função janela  $\psi(t)$  é chamada wavelet mãe. Na próxima seção, a formulação matemática da transformada wavelet será abordada.

### 2.1.1 – Sistema Wavelet – Uma Breve Revisão

Diferentemente da transformada de Fourier, onde o sinal é decomposto em bases senoidais, na transformada wavelet as bases de decomposição são sinais que podem ter diversas formas, porém todas oriundas de translações e escalonamentos de uma base mãe  $\psi(t)$ , chamada função wavelet (BURRUS, 1998). Assim, a decomposição é dada por:

$$f(t) = \sum_k \sum_j a_{j,k} \cdot \psi_{j,k}(t), \quad (2.3)$$

sendo,  $a_{j,k}$  é a Transformada Wavelet Discreta (TWD). A transformada é dita discreta porque as funções  $\psi_{j,k}(t)$  são obtidas por escalonamentos e translações discretas de  $\psi(t)$ . Dessa forma,

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \cdot \psi(2^j \cdot t - k), \quad (2.4)$$

e os coeficientes  $a_{j,k}$  são obtidos pelo produto interno:

$$a_{j,k} = \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = \int f(t) \cdot \psi_{j,k}(t) dt. \quad (2.5)$$

O produto interno nada mais é do que uma comparação entre as funções  $f(t)$  e  $\psi_{j,k}(t)$ . Na função  $\psi_{j,k}(t)$ , o parâmetro  $j$  escala a função  $\psi(t)$ . Conseqüentemente, determina o conteúdo de frequência do sinal, obedecendo, assim, à uma das propriedades de Fourier:

$$f(t/a) \Leftrightarrow F(a \cdot w), \quad (2.6)$$

ou seja, a resolução de um sinal é inversamente proporcional ao tamanho do seu espectro de frequência.

Observando-se a Equação 2.4, conclui-se que variando  $j$ , varia-se o espectro de frequência em que o sinal é decomposto. Assim, o coeficiente  $a_{j,k}$  caracteriza, de maneira satisfatória, o sinal  $f(t)$  em relação ao espectro. O parâmetro  $k$  desloca o sinal  $\psi_{j,k}(t)$  no domínio do tempo, permitindo que o sinal seja decomposto em toda sua extensão temporal.

BURRUS (1998) afirma que uma maneira mais eficiente, em termos de algoritmo, para caracterizar um sinal é desmembrar a Equação (2.3), em:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c(k) \cdot \varphi_k(t) + \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d(j,k) \cdot \psi_{j,k}(t), \quad (2.6)$$

sendo,

$$\varphi_k(t) = \varphi(t-k). \quad (2.7)$$

A função  $\varphi(t)$  é conhecida como função escalonamento. A função escalonamento serve inicialmente para uma caracterização mais grosseira do sinal, enquanto as funções wavelets  $\psi_{j,k}(t)$  refinam a caracterização. Os coeficientes  $c(k)$  e  $d(j,k)$  são determinados pelos produtos internos:

$$c(k) = \int f(t) \cdot \varphi_k(t) dt \quad e \quad (2.8)$$

$$d(j,k) = \int g(t) \cdot \psi_{j,k}(t) dt. \quad (2.9)$$

As funções escalonamento e wavelet possuem uma relação biunívoca, ou seja, quando se determina uma delas, a outra também será definida.

Até o presente, toda análise matemática foi feita considerando a transformada wavelet discreta. A TWD é computacionalmente mais eficiente do que a transformada wavelet contínua. Ela gera um número muito menor de coeficientes (SHIM, 2000). A representação matemática da transformada wavelet contínua de uma função  $f(t)$  é dada por

$$F(a,b) = \int f(t) \cdot \psi\left(\frac{t-a}{b}\right) dt. \quad (2.10)$$

Vale salientar que  $j$  e  $k$  na Equação 2.3 são discretizações de 'b' e 'a', respectivamente.

O cálculo dos coeficientes  $c(k)$  e  $d(j,k)$  da Equação 2.6 é uma das grandes vantagens da Transformada Wavelet Discreta, pois existe similaridade entre a teoria de Banco de Filtros e a decomposição do sinal através da transformada wavelet discreta (VETTERLI et al 1995)

A função escalonamento é obtida recursivamente através de combinação linear de suas escalas mais finas, ou seja,

$$\phi(t) = \sum h(n) \sqrt{2} \cdot \phi(2t-n) \quad n \in Z, \quad (2.11)$$

e  $h(n)$  é uma seqüência de números reais ou complexos que são chamados de coeficientes da função escala. Similarmente, a função wavelet pode ser expressa por:

$$\psi(t) = \sum_n h_1(n) \sqrt{2} \phi(2t-n) \quad n \in Z, \quad (2.12)$$

em que  $h_1(n)$  e  $h(n)$  estão biunivocamente ligados pela relação:

$$h_1(n) = (-1)^n h(N-1-n) \quad (2.13)$$

Onde,  $n \in Z$  e  $N$  é um número par. Manipulando as Equações (2.8) e (2.11), obtém-se:

$$c_j(k) = \sum_m h(m-2k) c_{j+1}(m), \quad (2.14)$$

em que  $c_j(k)$  e  $c_{j+1}(m)$  são os coeficientes das resoluções mais finas e grosseiras do sinal, respectivamente (BURRUS,1998). A expressão equivalente para os coeficientes da função wavelet é:

$$d_j(k) = \sum_m h_1(m-2k) c_{j+1}(m). \quad (2.15)$$

As expressões (2.14) e (2.15) são na realidade cada uma, uma compactação de duas operações: convolução e *down-sampling*. A convolução é uma operação linear de processamento de sinais. A operação de *down-sampling* consiste na seleção e transformação de uma seqüência de

números. A nova seleção será composta dos números da seqüência anterior excetuando-se os números das posições pares. O *down-sampling* de uma seqüência pode ser esquematizado por:

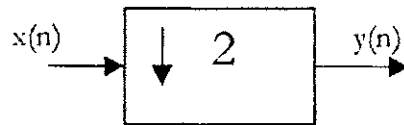


Figura 2.2 - Representação esquemática do *down-sampling* de um sinal.

A convolução ( $\otimes$ ) de um sinal discreto  $x(n)$  por um filtro  $h(n)$  pode ser representada pelo esquema da Figura 2.3.

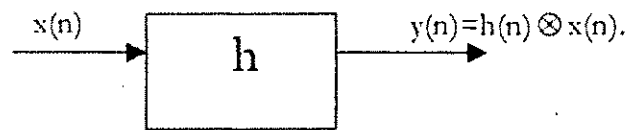


Figura 2.3 - Representação esquemática da convolução de um sinal.

Uma grande virtude da transformada wavelet discreta, é o fato dos coeficientes  $c_j$  e  $d_j$  das equações 2.14 e 2.15 puderem ser facilmente calculados pela estrutura de banco de filtros mostrada na figura 2.4.

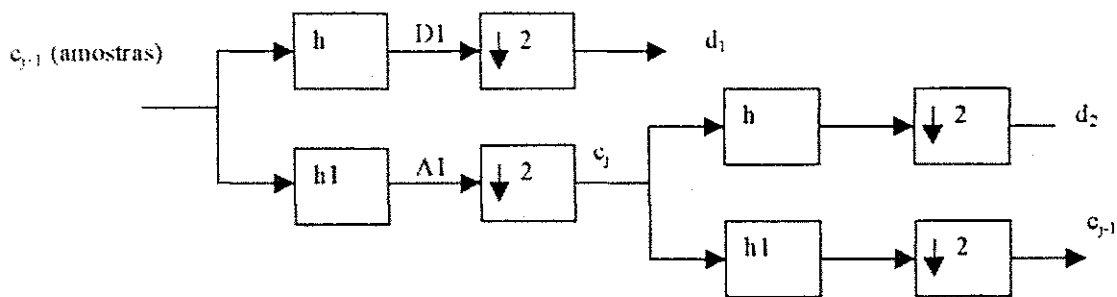


Figura 2.4 - Estrutura de Banco de Filtros com 2 estágios para análise do sinal.

Pela teoria da transformada wavelet discreta, os coeficientes contidos no vetor  $c_{j+1}$  podem ser obtidos a partir da amostragem do sinal a ser analisado. A partir dos coeficientes do vetor  $c_{j+1}$ , os coeficientes wavelets da família 'dj' podem ser calculados através estrutura mostrada na Figura 2.4. Na Figura 2.4, apresentam-se dois estágios de um banco de filtros. Cada estágio tem como entrada os coeficientes da função escala e como saída os coeficientes da função wavelet e escala, em uma resolução menor. A estrutura é um banco de filtro porque  $h$  e

$h_1$  são respectivamente filtros digitais passa-alta e passa-baixa. Ou seja, tomando-se a Fig 2.4,  $A_1$  é vetor que contém a aproximação do sinal  $c_{j-1}$ , no primeiro nível de resolução e  $D_1$  é um vetor que representa os detalhes no primeiro nível de resolução. O *down-sampling* possibilita que a saída formada pela soma dos vetores  $c_j$  e  $d_j$  tenha o mesmo tamanho do sinal amostrado. Esta estrutura de banco de filtros facilita o cálculo dos coeficientes wavelet e permite que se analisem os detalhes do sinal em diferentes níveis de resolução.

Para a recuperação do sinal, a transformada wavelet discreta inversa (IWDI) é usada. O processo de recuperação envolve a operação *up-sampling*. *Up-sampling* é o processo inverso de *down-sampling*. Numa seqüência de números, entre dois números consecutivos, insere-se o número zero. Na Figura 2.5, ilustra-se o processo. Os filtros  $h'_1$  e  $h'_2$  são calculados a partir dos filtros  $h_1$  e  $h_2$ .

$$\begin{cases} h'_1(n) = h(N-n) \\ h'_2(n) = h(N-n) \end{cases} \quad (2.16)$$

sendo  $N$  o tamanho do filtro e  $n$  um inteiro menor que  $N$ .

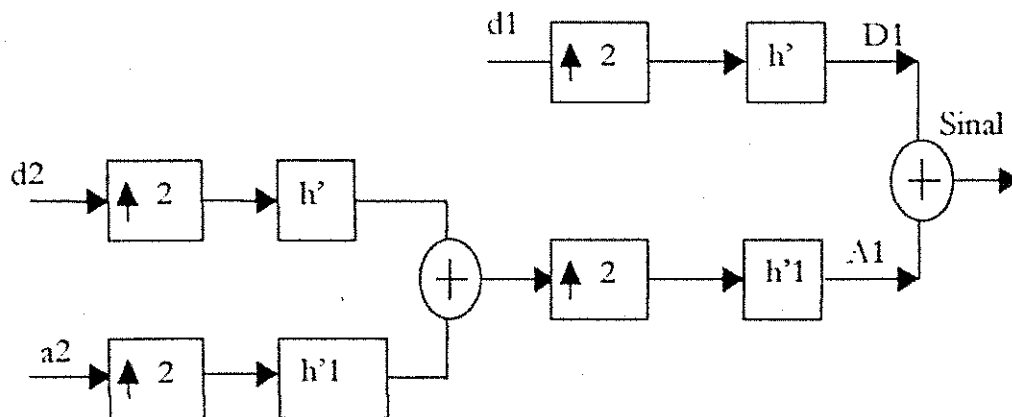


Figura 2.5 - Estrutura de Banco de Filtros com dois estágios para síntese do sinal

## 2.2 – Descargas Parciais

Descargas parciais são descargas elétricas que curto-circuitam parcialmente a isolação de um equipamento. Estas descargas podem aparecer em cavidades gasosas, em meio isolante sólido ou líquido, ou ao longo de uma superfície ao redor de pontas. As descargas parciais em gases, em torno de um condutor, são conhecidas como “corona”.

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

Sinais de Descargas Parciais (DPs) foram estudados na década de 20 por Germant Philippoff. A partir da década de 50, com o advento de novos materiais isolantes como os polímeros e as resinas de epóxi em equipamentos de alta tensão, os estudos passaram a ter mais relevância, pois tais materiais são mais suscetíveis a descargas parciais apesar de possuírem melhores qualidades elétricas em relação aos materiais que antes eram usados. (borracha, cerâmica) (BORSI, 2000).

As descargas parciais causam a deterioração do isolamento dos equipamentos de alta tensão. O processo de deterioração pode ser muito lento (MOTA, 2001) podendo durar meses ou até anos para que o dano se torne visível. As opções para lidar com o problema são a manutenção ou a troca do equipamento danificado. A manutenção é baseada na análise dos sinais de descargas parciais. A análise é feita por técnicos que adquiriram seus conhecimentos através de anos de experiência. Por isso, o desenvolvimento de técnicas padronizadas de captação e análise dos sinais, como também técnicas que reconheçam as diferentes origens dos diferentes tipos de descargas parciais de forma sistematizada são importantes.

As descargas parciais podem ser estudadas através do circuito elétrico equivalente da Figura 2.6 ( GUEDES, 1996).

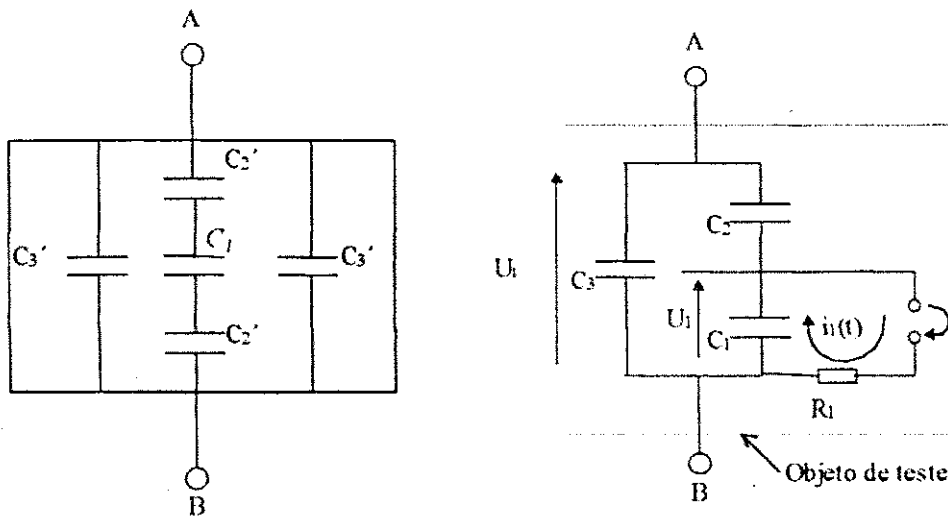


Figura 2.6 – (a) Material sob ensaio; (b) Diagrama do circuito equivalente.

No circuito equivalente,  $C_1$  representa a capacitância da cavidade do dielétrico,  $C_2$  a capacitância em série com a cavidade e  $C_3$  a capacitância restante da amostra.

A Figura 2.7 ilustra as formas de onda aplicadas ao material sob ensaio. A tensão da fonte de alimentação é representada por  $U_i(t)$ .  $U_1(t)$  é a forma de onda da tensão aparente na cavidade (isto, se ela não existisse) e  $U_+$  ( $U$ ) a tensão disruptiva da cavidade.  $V_+$  ( $V$ ) é a tensão residual na cavidade após a descarga.

Quando a tensão  $U_1(t)$  atinge o valor de  $U_+$ , ocorre uma descarga na cavidade reduzindo a tensão para  $V_+$ . O fenômeno pode se repetir várias vezes durante cada ciclo. A duração da descarga é da ordem de  $10^{-7}$ s, sendo um tempo curto comparado com o período da onda de 60 Hz.

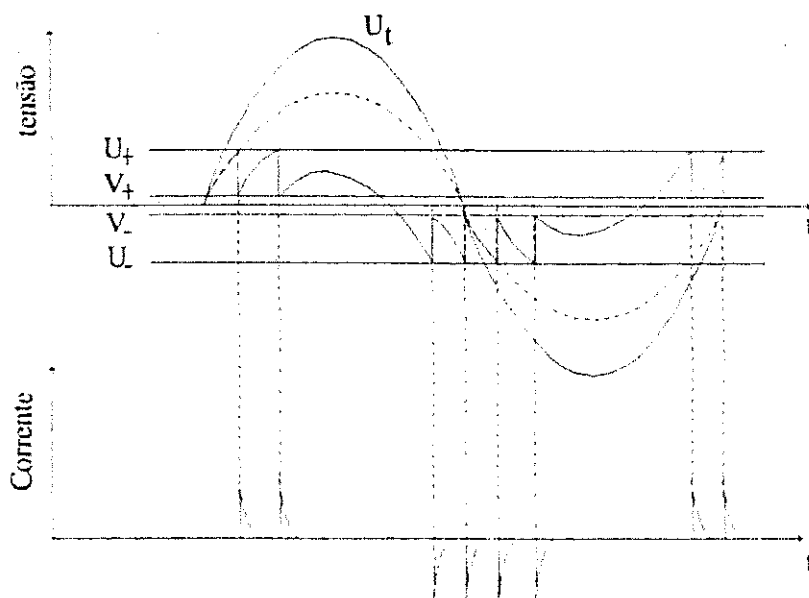


Figura 2.7 Processo de descargas parciais em um dielétrico.

Praticamente todos equipamentos de alta tensão estão sujeitos a processos de descargas parciais. As sensibilidades das medições são muito diferentes e dependem do tipo de equipamento que está sendo utilizado. Nos detectores de descarga parciais, a medida da descarga é feita em pico coulombs (pC). Ela não pode ser medida diretamente, pois ocorre em lugares onde os terminais dos sensores não têm acesso. Então, utiliza-se um capacitor em paralelo ao objeto de ensaio onde as descargas parciais ocorrem, e assim, um impedor de medição, associado ao detector, mede a corrente do capacitor de acoplamento, que é diretamente relacionada à descarga parcial. A carga medida pelo detector é denominada carga aparente. Este esquema está mostrado na Figura 2.8. A carga aparente medida pelos detectores de descarga parcial pode variar desde 1 pC, em cabos de polietileno de alta tensão, a mais de 50 pC em transformadores de óleo (BORSI, 2000) ou milhares de pC em geradores. As formas dos pulsos de descarga parcial também são muito diferentes dependendo do equipamento em questão. Podem ter duração de 10 ns a 10  $\mu$ s. Conseqüentemente, o espectro de freqüência das descargas parciais é de diversos tamanhos. A estratégia para as medições adequadas deve



considerar o tipo de equipamento, seu tamanho e o tipo de análise que se quer fazer das descargas parciais.

A classificação dos tipos de medições depende basicamente do tipo de fenômeno físico associado à descarga parcial que está sendo analisado na detecção. As descargas parciais, embora de rápida duração, emitem energia acústica, ótica e de rádio frequência., além de obviamente originar um pulso de corrente. Os métodos de detecção que usam sensores (circuitos RLC) que captam diretamente o pulso de corrente são os mais usados. Um circuito básico de detecção é mostrado na Figura 2.6.

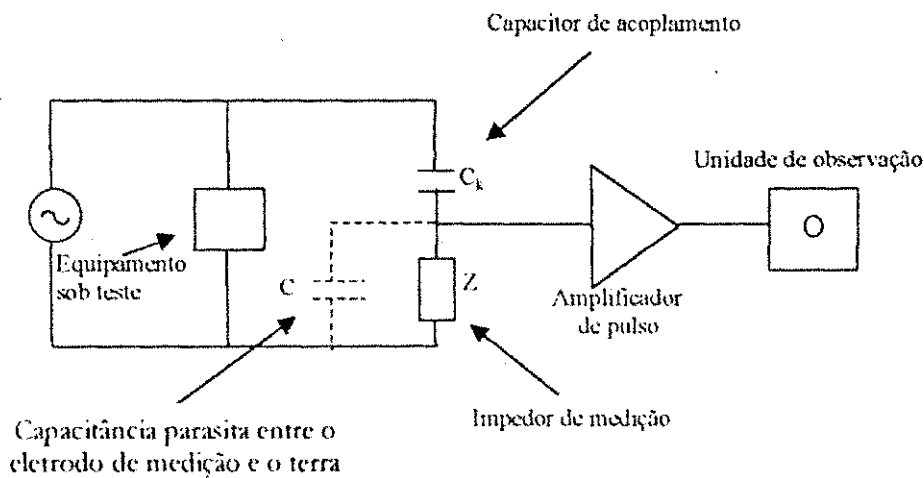


Figura 2.8 - Arranjo convencional para medição de descarga parcial.

Muitos trabalhos sobre descargas parciais usam o método convencional para a medição. BOGGS et al (1982) afirmam que existem duas maneiras de medição de descargas parciais utilizando o método convencional. A primeira maneira de medição utiliza uma "faixa estreita" de frequência, geralmente de 10 kHz, centrada em 20 ou 30 kHz. A outra, é realizada com um detetor de "faixa larga". A banda de frequência do detetor de faixa larga é, geralmente, de 100 kHz com o centro em 200 a 300 kHz. A constante de tempo dos detectores é geralmente grande em relação à duração dos pulsos de descargas parciais, por isso, os detectores convencionais possuem gráficos do módulo de sua transformada de Fourier semelhantes ao gráfico do módulo da transformada de Fourier de circuitos integradores. Ou seja, o detector

promove uma ação integradora aos pulsos de corrente. Desse modo, a magnitude dos pulsos se torna uma medida de carga elétrica. Mas como a deterioração é aproximadamente proporcional ao número de íons e elétrons envolvidos na descarga parcial, a medição é considerada adequada. O sistema de aquisição convencional para objetos de grande porte pode levar a dois tipos de erros na interpretação das descargas parciais. Nos detetores de faixa estreita, dois pulsos sucessivos podem interferir tanto construtivamente como destrutivamente fornecendo uma impressão incorreta da medição. Em alguns sistemas com isolamento à base de termoplásticos, tais como cabos de potência, um pulso gerado num determinado lugar pode sofrer grande atenuação até chegar onde os sensores estão situados. Para casos assim, os sistemas de faixa estreita são recomendáveis, pois a atenuação cresce com a frequência. BOGGS et al (1982), também, relatam os sistemas de aquisição com banda de frequência muito larga (*Ultra-Wide Band*). As bandas de passagem variam de 100 kHz a 1 GHz. O sistema pode ser implementado também através do esquema da Figura 2.8. A diferença básica está no impedor de medição  $Z$  e no capacitor de acoplamento  $C_1$  que devem se comportar como uma linha de transmissão perfeita. O arranjo garante que grande parte do espectro de frequência do sinal seja detectada sem distorção.

Outros métodos para medição das descargas parciais são muitos pesquisados atualmente. KOCK et al (1996) comparam, através da sensibilidade (menor carga mensurável), o método de detecção convencional normalizado pela IEC-270 – 1981, com o método de medição UHF. A detecção foi feita em um disjuntor isolado a gás SF<sub>6</sub> (*Gas-Insulated Switchgear – GIS*) utilizados em sistemas de 550 kV. Os autores também explanam sobre a detecção UHF. As frequências UHF estão na faixa de 300 MHz até 3 GHz. Os sistemas de medição se estendem até 1,5 GHz. O método é particularmente interessante para sistemas GIS, pois as descargas parciais produzem ondas eletromagnéticas que se propagam através da linha formada por condutores coaxiais metálicos que constituem um guia de onda coaxial. Graças ao diâmetro relativamente grande das câmaras de um típico sistema GIS, as ondas eletromagnéticas podem

se propagar não somente no modo transversal eletromagnético (*Transversal Eletromagnetic Mode*) TEM, mas, também, em modos de grau maior. Como resultado de seções T (*T-sections*), isolantes de suporte, etc. o sistema GIS não é um condutor de onda ideal. Câmaras de ressonância de vários tamanhos são formadas pelas seções GIS particionadas por dois espaçadores vizinhos, mudanças no diâmetro do condutor, etc. Por esta razão, os sinais de descarga parcial em GIS tendem a ter picos ressonantes. Os picos podem ser captados pela medição UHF. O centro do espectro de frequência e sua amplitude dependem do tipo de defeito e de sua localização física. A amplitude do sinal de descarga parcial depende fortemente do número de seções T e do número e da separação entre os isoladores de suporte. Como resultado, a calibração através do método convencional, que representa uma grandeza relativa (carga aparente), é prejudicada devido às sucessivas reflexões. Por este motivo, o método UHF pode ser considerado somente um método de detecção e não de medição propriamente dita.

Existem dois métodos de detecção UHF. São chamados de detecção em banda larga (*broadband*) e detecção em banda estreita (*narrow-band*). Na detecção em banda estreita, a típica faixa de passagem de frequência é de apenas alguns MHz. O método é usualmente implementado com um analisador de espectro. Primeiramente, o sinal é medido numa faixa de frequência bastante larga, tipicamente de centenas de MHz. Então, o centro do espectro das frequências que o analisador permite passar é alinhado aos picos de ressonância causados pelas descargas parciais e depois operado no modo *zero-span*. Neste modo, o analisador de frequência funciona como um filtro passa-faixa com o centro do espectro de frequência selecionável. Logo após, o resultado da filtragem do sinal é demodulado (geralmente na banda usual de um medidor de descarga parcial convencional) para depois ser analisado em suas características de fase. A vantagem do método de banda estreita é a supressão dos ruídos externos de alta frequência. No método de banda larga, o sinal é detectado numa banda frequência típica de 300 MHz até 1500 MHz. A desvantagem do método é que todo sinal, dentro da faixa de frequência, é detectado, incluindo os ruídos externos.

Detecções de sinais de descargas parciais na faixa de frequência VHF estão se tornando mais frequentes. Tal qual a detecção UHF, não é possível realizar a calibração do sistema. Também a exemplo da técnica UHF, pode-se obter a medição em faixa larga ou faixa estreita utilizando um analisador de espectro como filtro passa-faixa com centro do espectro de frequência  $f_0$  ajustável. ZODERVAN et al (2000) discutiram medições de descargas parciais em turbogeradores usando a técnica de medição VHF. Com a técnica foi possível realizar as medições sem interromper a operação da máquina. No sinal captado de uma determinada fase, podem se encontrar descargas parciais oriundas da própria fase, de outras fases (*crosstalk*) e distúrbios. No trabalho, a relação entre os centros de frequência escolhidos, para o analisador de espectro, e os padrões obtidos pela medição é discutida. O sistema de medição pode ser compreendido melhor com o auxílio da Figura 2.9.

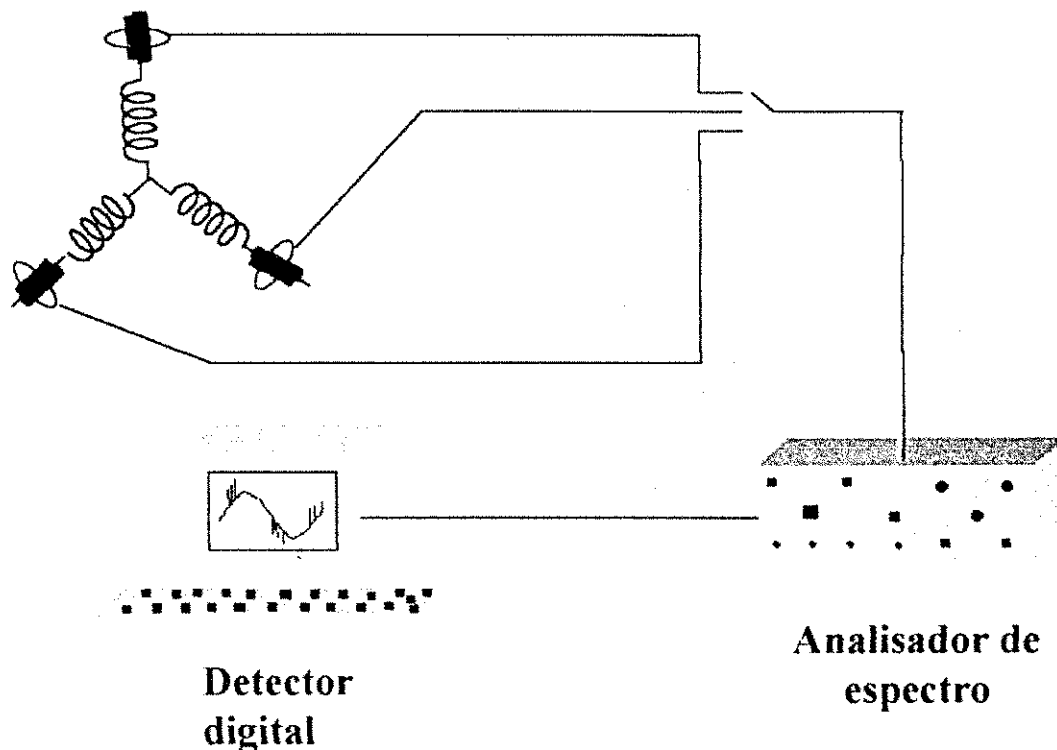


Figura 2.9 - Esquema de detecção em VHF em turbogeradores, ZODERVAN et al (2000).

Os desacopladores do sinal são as bobinas Rogowski, localizadas ao redor nas buchas de alta tensão. Um exemplo de espectro de frequência obtido pelo analisador de frequência numa das fases do turbogerador é mostrado na Figura 2.10.

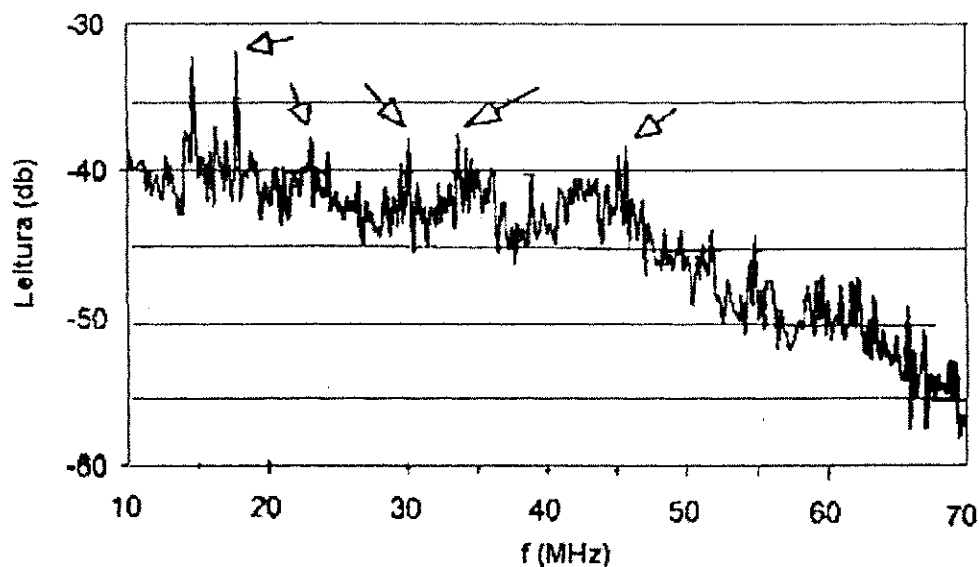


Figura 2.10 – Exemplo de espectro de frequência obtido com um analisador de espectro, ZORDERVAN et al (2000).

Na Figura 2.10, as setas indicam os picos onde as frequências  $f_c$  do analisador serão centradas. O sinal é então captado para cada uma das frequências. Logo em seguida, o sinal é demodulado para aproximadamente 200 kHz. O sinal é, então, capturado pelo detector digital TE571 da Haefely Trench.

Além das faixas de passagem dos detectores, outro parâmetro fundamental para a medição é a sensibilidade. A sensibilidade da medição é definida como a menor carga que pode ser captada, na presença de ruído. A sensibilidade é determinada comparando-se o pulso de descarga parcial com o nível de ruído do amplificador. O pulso de descarga parcial alimenta o amplificador que possui uma banda de passagem para frequência limitada. A limitação pode ser representada pelo circuito RC, sendo **C** a capacitância parasita entre o ponto de aquisição do sinal de DP, seguido de um amplificador ideal como se mostra na Figura 2.11.

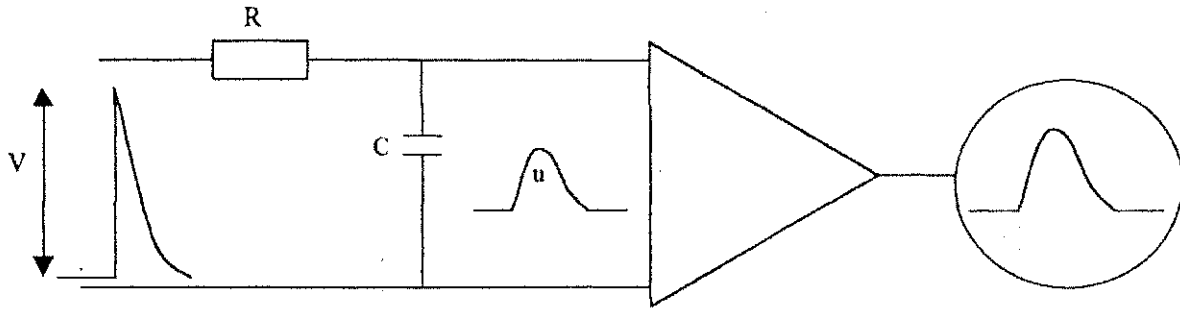


Figura 2.11 - Representação de um amplificador com faixa de passagem limitada.

KREUGER (1989) expressa a sensibilidade teórica da seguinte maneira:

$$q_{sens} = \frac{2}{\xi} \cdot U_n \cdot C_{tot} , \quad (2.16)$$

onde  $C_{tot}$  é:

$$C_{tot} = C_a + C \cdot \left(1 + \frac{C_a}{C_k}\right), \quad (2.17)$$

$C_a$  é a capacitância que representa o objeto de ensaio e  $C_k$  é a capacitância de acoplamento. O parâmetro  $\xi$ , na Equação 2.16, é um fator que atenua o pulso de descarga parcial na entrada do amplificador. Ele é função da razão entre a constante de tempo, ( $\tau$ ), do pulso de descarga parcial e a constante de tempo, ( $\alpha$ ), do amplificador.  $U_n$  é o ruído térmico do amplificador expresso em volts. Ele aparece como uma faixa luminosa no osciloscópio (KREUGER, 1989). Para que a sensibilidade seja máxima,  $\alpha$  deve ser igual a  $\tau$ . A sensibilidade ótima da medição de descargas parciais, considerando um amplificador com banda de passagem  $B$ , é obtida quando:

$$B = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau} \quad (2.18)$$

A sensibilidade ótima é obtida pela equação:

$$q_{sens} = 4 \cdot U_n \cdot C_{tot} \quad (2.19)$$

Tomando-se a Equação 2.19, observa-se que a sensibilidade é diretamente proporcional à capacitância  $C_{total}$ , que é obtido pela Equação 2.17. Assim, pode-se chegar a três conclusões:

1. Para se obter a sensibilidade ótima a capacitância de acoplamento deve o maior possível. Porém, não se pode aumentá-lo indefinidamente, pois isso aumentaria a demanda de corrente da fonte;
2. A sensibilidade decresce linearmente para  $C_{total} \equiv C_a$ ;
3. A grande imperfeição no método de medição convencional é a capacitância parasita.

BOGGS et al (1982) discutem teoricamente a sensibilidade das medições de descargas parciais comparando os métodos de banda muito larga (UWF) com o método convencional. Foram consideradas: uma linha de transmissão isolada a gás (*Gas-Insulated Transmission Line - GITL*) de 500 kV e um cabo de distribuição de 28 kV. BOGGS et al afirmam que a tecnologia UWF pode ser implementada de maneira eficiente para sistemas e aplicações em que o método tradicional de detecção não é adequado. Para se aproximar dos níveis de sensibilidade teórica fundamental em sistemas de elementos concentrados e linhas de transmissão isoladas com materiais termoplásticos, a tecnologia UWB é uma necessidade, já que os pulsos de descargas parciais são estreitos. O aumento de sensibilidade é considerável especialmente para sistemas isolados a gás.

A simples medição de descargas parciais de forma isolada não é conclusiva. O objetivo final é avaliar as condições do isolamento. A avaliação passa pela classificação dos diferentes tipos de descargas parciais. As primeiras tentativas para classificar as descargas parciais foram feitas através de oscilogramas (KELEN, 1995). Os pulsos de descargas parciais eram superpostos em elipses de Lissajous no osciloscópio. Na Figura 2.12, mostra-se a avaliação. O método foi publicado pela CIGRÉ em 1969.

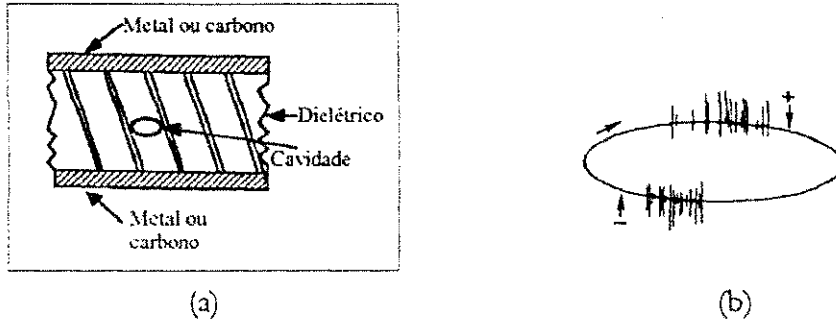


Figura 2.12 - Defeito originário de descarga parcial (a) e seu padrão associado (b) para a análise tradicional (NATRASS, 1988).

Atualmente a avaliação dos sinais segue duas linhas: a análise de fase (AF) e a análise no tempo (AT). Na primeira delas, os sinais de descargas parciais são superpostos em uma senoíde em fase com a onda de frequência industrial, que é dividida em 4000 ou 3333 (KREUGER et al, 1993) partes, para 50 ou 60 Hz, respectivamente. Cada parte forma uma janela. O método procura fazer um reconhecimento dos padrões das descargas parciais através de uma análise estatística da distribuição do número de descargas por janela,  $H_n(\varphi)$ , e da distribuição da intensidade média das descargas por janela,  $H_{qn}(\varphi)$ . Nas Figuras 2.13 e 2.14, exemplificam-se como são as distribuições. Na parte inferior de cada figura está representada a tensão aplicada ao objeto de teste.

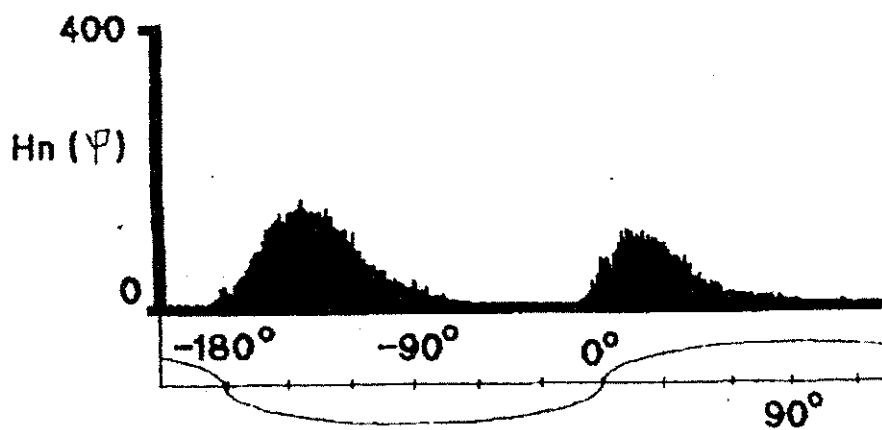


Figura 2.13 - Distribuição do número de descargas por janela (KREUGER et al, 1993).



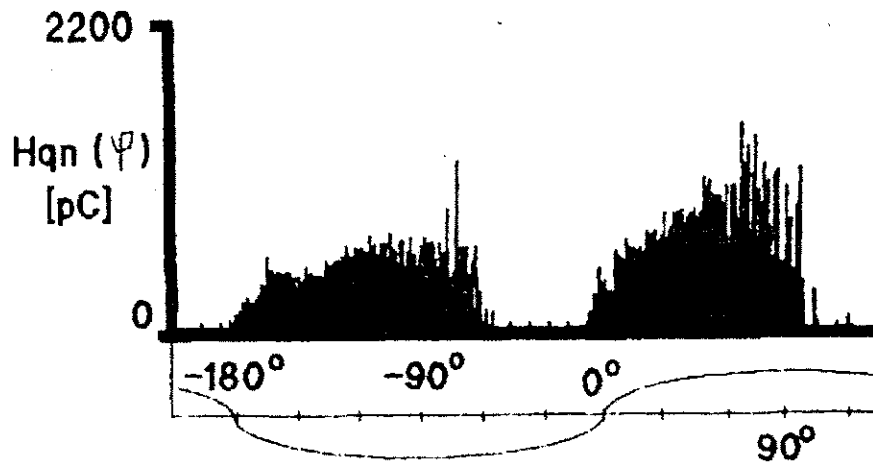


Figura 2.14 - Distribuição da magnitude média das descargas por janela (KREUGER et al, 1993).

A experiência mostra que as formas das distribuições diferem muito entre as polaridades da senóide, ou seja, na verdade pode-se estudar quatro distribuições ( $H^+_{qn}(\varphi)$ ,  $H^-_{qn}(\varphi)$ ,  $H^+_n(\varphi)$  e  $H^-_n(\varphi)$ ). Neste texto, este tipo de análise estatística será chamado de análise de fase (AF). A análise de fase é independente do caminho entre o local da ocorrência da descarga parcial e de onde ela é captada. Pois, só a intensidade e o número dos pulsos interessam. A forma do pulso não interessa.

GULSKI (1993) exemplifica como a análise de fase pode ser implementada. A análise de fase foi usada para o reconhecimento de descargas parciais em um cabo de alta tensão PE de 6/10 kV de 1 metro, e em um compartimento de um sistema de uma subestação isolada a gás SF<sub>6</sub> de 400 kV. Operadores estatísticos foram usados para avaliar as distribuições em função da fase das seguintes quantidades:

1. Distribuição  $H_n(\varphi)$  do número de pulsos de descargas por janela de fase;
2. A média  $H_{qn}(\varphi)$  da magnitude dos pulsos (em pC) por janela de fase. O operador representa a soma de todas as cargas dos pulsos na janela dividido pelo número de pulsos.

Os operadores estatísticos usados foram:

1. Assimetria (*Skewness*),  $Sk$ , que descreve a assimetria das distribuições  $H^+_{qn}(\varphi)$ ,  $H^-_{qn}(\varphi)$ ,  $H^+_n(\varphi)$  e  $H^-_n(\varphi)$  em relação à distribuição normal. ( $Sk = 0$  significa simetria,  $Sk > 0$  significa assimetria com o lado esquerdo maior e  $Sk < 0$  significa assimetria com o lado direito maior);
2. Kurtosis,  $Ku$ , que descreve a agudeza das distribuições  $H^+_{qn}(\varphi)$ ,  $H^-_{qn}(\varphi)$ ,  $H^+_n(\varphi)$  e  $H^-_n(\varphi)$  em relação à distribuição normal ( $Ku = 0$  significa que a distribuição normal,  $Ku > 0$  significa uma distribuição com forma aguda e  $Ku < 0$  significa uma distribuição mais plana);
3. O número de picos,  $Pe$ , com o intuito de distinguir entre as distribuições de  $H^+_{qn}(\varphi)$ ,  $H^-_{qn}(\varphi)$ ,  $H^+_n(\varphi)$  e  $H^-_n(\varphi)$  com um único máximo e com muitos máximos (distribuições misturadas);
4. O fator de correlação cruzada,  $cc$ , que descreve a diferença entre a forma das distribuições de  $H^+_{qn}(\varphi)$  e  $H^-_{qn}(\varphi)$  na polaridade positiva e negativa. O valor de  $cc = 1$  significa 100 % de simetria nas formas,  $cc = 0$  significa assimetria total;
5. O fator de descarga,  $Q$ , que descreve a diferença no nível médio de descarga médio entre as distribuições de  $H^+_{qn}(\varphi)$  e  $H^-_{qn}(\varphi)$ . O valor  $Q = 1$  significa níveis médios de descargas iguais e o  $Q = 0$  significa diferença;
6. Fator modificado de correlação cruzada,  $mcc$ , é igual ao produto de  $Q$  por  $cc$ .

Com os operadores estatísticos descritos acima foi possível quantificar as características de diferentes padrões de descargas parciais. O procedimento para se ter uma ferramenta de reconhecimento estatístico de um determinado tipo de defeito foi o seguinte: uma série de 8 a 23 observações de sinais de descargas parciais foi realizada para um mesmo defeito. Para cada operador estatístico foram obtidos o valor médio das observações e seus quartis de 2,5 % e 97,5 %. Assim, um intervalo de confiança de 95 % cobrindo o valor médio de cada operador estatístico foi escolhido para servir como padrões de reconhecimento do defeito. Os padrões de reconhecimento (impressões digitais) são catalogados em gráficos, similares aos apresentados na Figura 2.15, onde a média e o intervalo de confiança para quinze

operadores estatísticos são visualizados. No exemplo da Figura 2.15, três tipos de defeitos em cabos de alta tensão PE (Polietileno) de 6/10 kV são considerados: (a) ramificações na ponta de agulhas, (b) cavidades planas e (c) ramificações em cavidades.

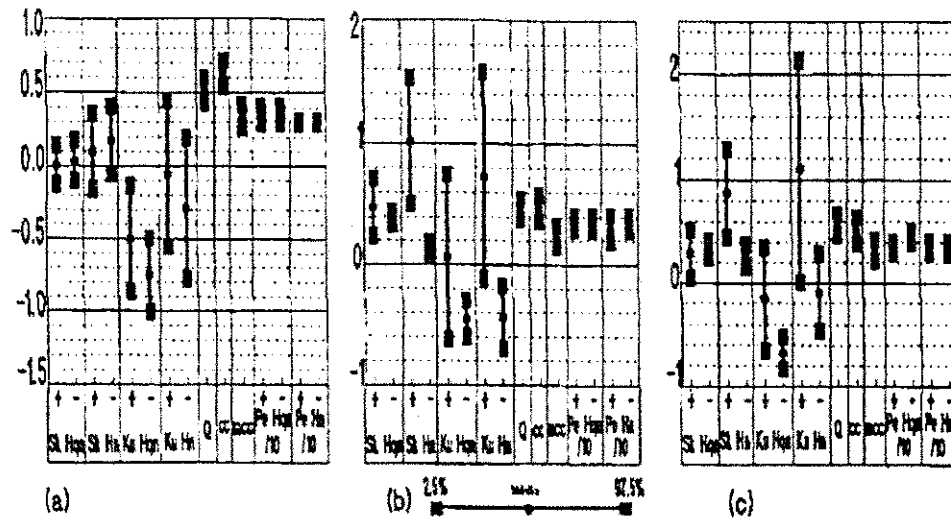


Figura 2.15 - Valores médios e distribuições de 15 operadores estatísticos, (GULSKI, 1993).

O reconhecimento de um sinal de descarga parcial de origem desconhecida necessita de várias observações e de cada uma delas são obtidos todos os quinze operadores. Logo após, as médias dos operadores são calculadas. Então, para cada defeito catalogado, as médias são comparadas com os intervalos de confiança dos operadores. Se a média do operador estiver dentro do intervalo, soma-se uma coincidência. O defeito catalogado em que se obtiver mais coincidências será considerado o gerador do sinal analisado. A taxa de reconhecimento será igual ao número de coincidências. O autor conclui que a análise de fase usando ferramentas estatísticas, para sinais de descargas parciais em dispositivos para alta tensão, é modesta, mas encorajadora. Contudo, fica demonstrado que mostrado que a AF provê informações adicionais sobre as descargas parciais, em relação a simples observação através de oscilogramas.

As impressões digitais podem ser usadas para auxiliar no reconhecimento de diversos tipos de defeitos. Uma tendência de análise para reconhecimento é o uso de redes neurais.

GULSKI & KRIVDA (1993) usam os resultados dos operadores estatísticos, explicados acima, como entradas para três tipos de redes neurais: BP (*Back-propagation network*), KOH (*Kobonen self-organizing map*), LVQ (*learning vector quantization network*). Os desempenhos das redes neurais em classificar vários defeitos foram comparados. A principal conclusão dos autores foi que para defeitos em que as redes foram treinadas, o reconhecimento foi satisfatório. Contudo, as redes podem classificar erroneamente defeitos para os quais não foram treinadas.

A análise no domínio do tempo (AT) é a segunda linha de avaliação das descargas parciais. Ela considera a forma do pulso de corrente originário da descarga parcial no domínio do tempo. A AT exige dos sistemas de aquisição uma grande banda de passagem de frequência. São sistemas de aquisição UWB. Geralmente com faixa de 500 a 1000 MHz (KREUGER et. al., 1993). Os pulsos são visualizados na escala de nanosegundos.

Uma das desvantagens da AT é que a forma do pulso de descarga é fortemente dependente do caminho entre o local da ocorrência da descarga parcial e onde o sinal é efetivamente capturado. Isto não se verifica na AF, pois o circuito de detecção revela apenas a altura relativa dos pulsos e o valor de suas cargas. Desta maneira, a AT não tem obtido bons resultados para objetos de ensaio grandes ou contendo muitos tipos de materiais.

Por outro lado, o método possui um grande atrativo. Existe uma relação direta entre a forma do pulso e a física do defeito que o origina. Foi verificado que estágios do envelhecimento de materiais dielétricos podem ser reconhecidos por AT. MORSHUIS & KREUGER (1992) apud KREUGER et al (1993) mostraram que a forma do pulso de descarga parcial muda distintivamente com o processo de envelhecimento numa cavidade. Outra vantagem é que, em muitos casos, ruídos externos são menos frequentes na faixa de passagem dos detetores para análise AT que na faixa dos detetores convencionais.

POMPILI et al (1995) estudaram os primeiros estágios de formação física das descargas parciais em dielétricos líquidos. As medições foram feitas utilizando um sistema de aquisição com faixa de passagem de 500 MHz. O artigo comparou os pulsos gerados em

eletrodos metálicos ponta-plano submersos em óleo mineral e os pulsos gerados em eletrodos de ponta metálica e plano formado pela superfície de óleo em cima de um plano aterrado. Todas as medidas foram realizadas aplicando valores de tensões 50 % abaixo das tensões de ruptura dos arranjos considerados e com a ponta no lado da tensão contínua negativa. As separações entre os eletrodos variaram entre 3 a 25 mm. Os autores concluíram que o comportamento da descarga no arranjo ponta-plano submersos em óleo é caracterizado por pulsos esporádicos ou uma seqüência de alguns pulsos de amplitude negativa crescente. Nas Figuras 2.16 e 2.17, mostram-se as respectivas situações. Para o arranjo ponta metálica-plano de óleo mineral separados por ar, as seqüências de pulsos foram mais densas, além de terem amplitude decrescente. Na Figura 2.18, ilustra-se a situação.

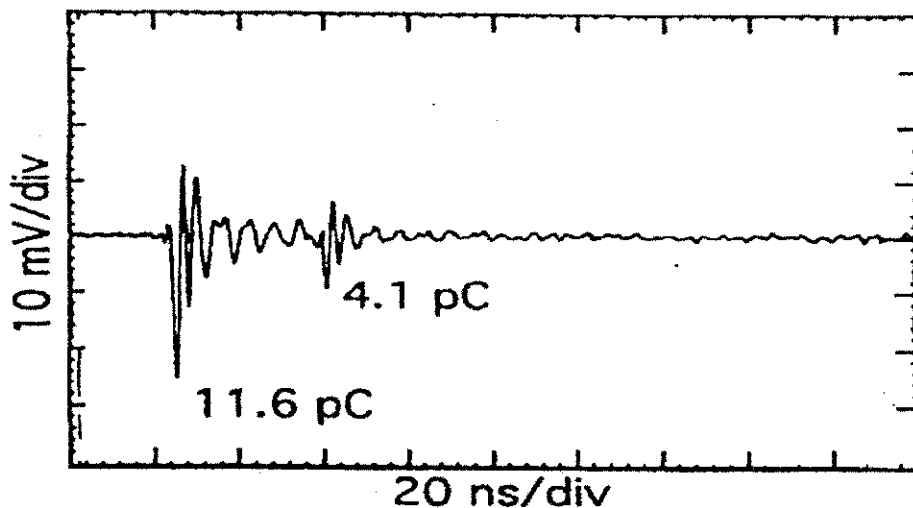


Figura 2.16 - Pulsos esporádicos em eletrodos ponta-plano metálicos submersos em óleo mineral. Tensão entre os eletrodos de 8 kV e separação de 3 mm, (POMPILI et al, 1995).

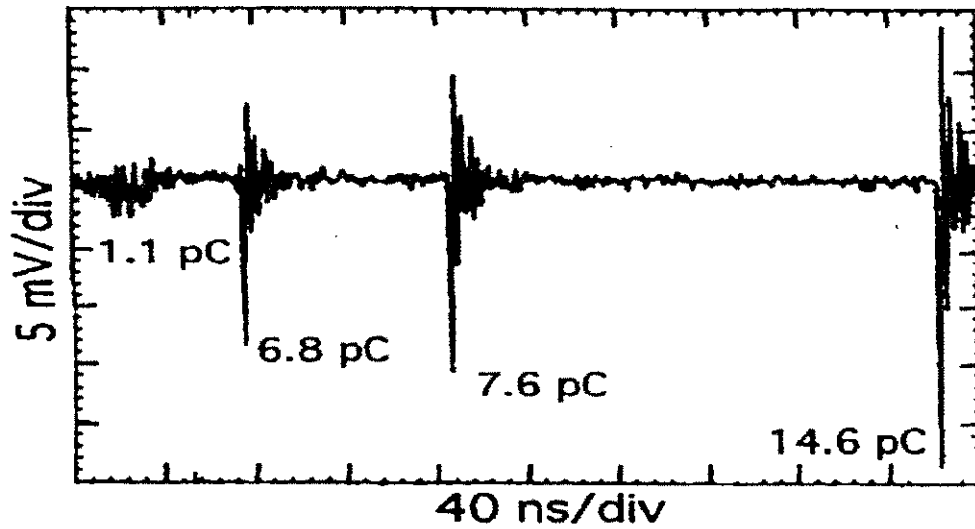


Figura 2.17 - Sequência de pulsos em eletrodos ponta-plano metálicos submersos em óleo mineral. Tensão entre os eletrodos de 13 kV e separação de 8 mm, (POMPILI et al, 1995).

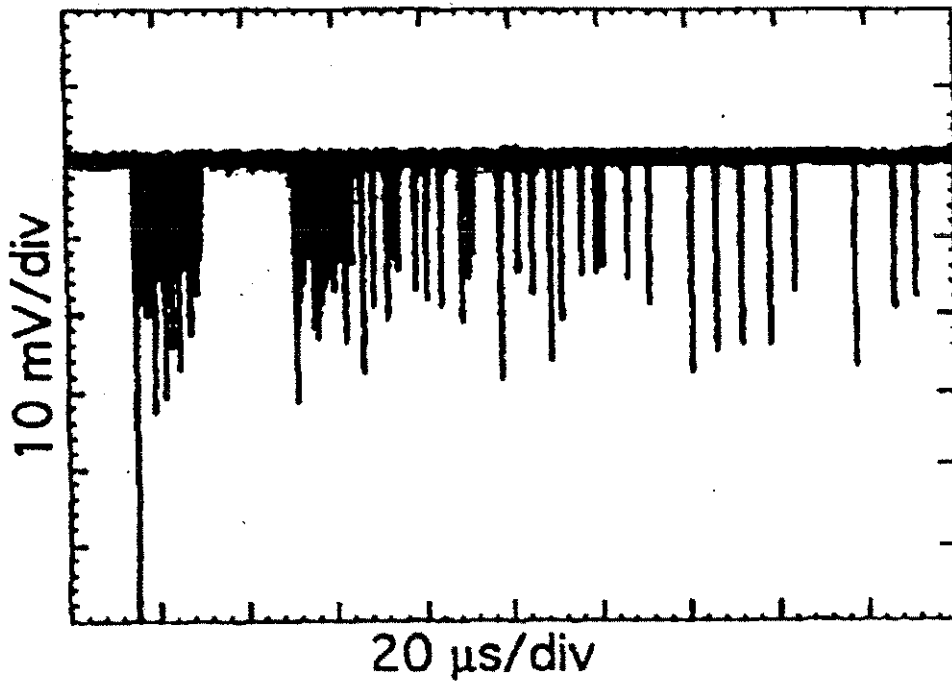


Figura 2.18 - Padrão de uma sequência de pulsos em eletrodos ponta metálica-plano formada pela superfície de óleo sobre plano metálico aterrado. Tensão entre os eletrodos de 8 kV e separação entre o óleo e a ponta com valor de 5 mm. (POMPILI et al, 1995).

### 2.3 - Aplicação da Transformada Wavelets para o Estudo das Descargas Parciais

Recentemente, muitos trabalhos procuraram aplicar a teoria wavelet no estudo dos sinais de descargas parciais. As aplicações são, principalmente, nas áreas do reconhecimento das descargas parciais e para a redução dos ruídos dos sinais de descargas parciais. Existe um determinado nível de ruído associado ao processo de aquisição dos sinais de descargas parciais. Principalmente se a aquisição se realizar no campo. Os ruídos induzem a erros na interpretação dos sinais de descargas parciais. Portanto, a supressão de ruídos também auxilia no reconhecimento das descargas parciais, pois aumentam a taxa S/R (razão entre a energia do sinal e a energia do ruído).

SHIM et al (1999) desenvolveram um algoritmo para localização de descargas parciais em cabos de alta tensão em operação. Antes da implementação do algoritmo, o sinal tem que ser processado devido à presença de ruídos em medições no campo. O artigo descreve um método de redução de ruídos. O método considera a decomposição do sinal através da estrutura de banco de filtros da Figura 2.4. Antes da reconstrução do sinal, em que se utiliza o banco de filtros da Figura 2.5, os valores das resoluções contidos nos vetores  $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2, \mathbf{d}_3, \dots, \mathbf{d}_j$  são processados de acordo com as Equação 2.20,

$$d_j = \begin{cases} d_j & \text{para } |d_j| \geq TH \\ 0 & \text{para } |d_j| \leq TH \end{cases} \quad (2.20)$$

ou seja, os valores dos vetores contendo as resoluções do sinal a ser analisado, que estiverem abaixo de um determinado valor  $TH$ , são igualados a zero. A técnica é conhecida por *hard-thresholding*. Supondo que os valores de um vetor  $d_j$  formem o sinal da Figura 2.19 (a), depois que a técnica de *hard thresholding* é aplicada a este sinal, o resultado é visualizado na Figura 2.19 (b). As medições foram feitas em um cabo de 11 kV, com o local da descarga parcial bem conhecido. Os dados são adquiridos quando o sinal obtido do sistema alcança um determinado

valor e o sistema inicia a gravação. O disparo (*trigger*) foi fixado em um nível acima do ruído. Na Figura 2.20 (a), mostra-se o sinal obtido na medição. Na Figura 2.20 (b), mostra-se a aproximação do sinal na resolução 6 do sinal original.

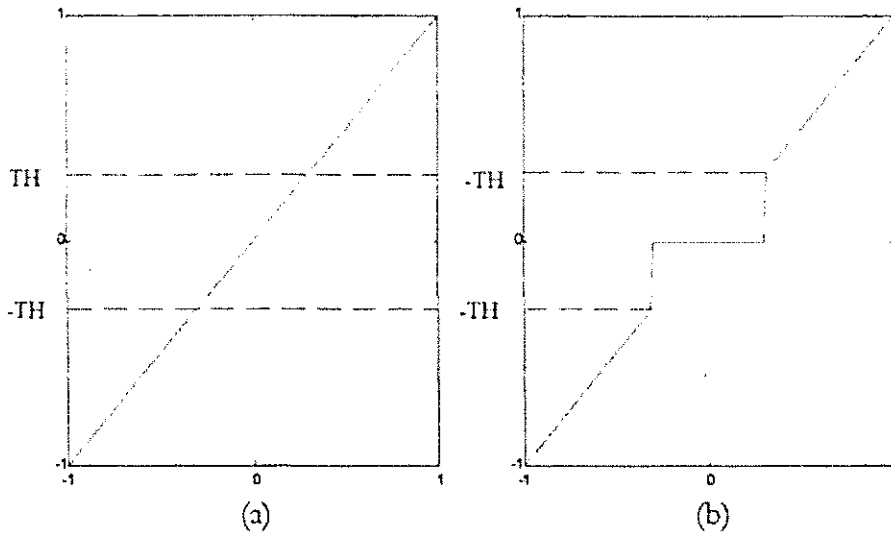


Figura 2.19 - Técnica de *hard-thresholding*. (a) Sinal original, (b) Sinal após o *hard-thresholding*.

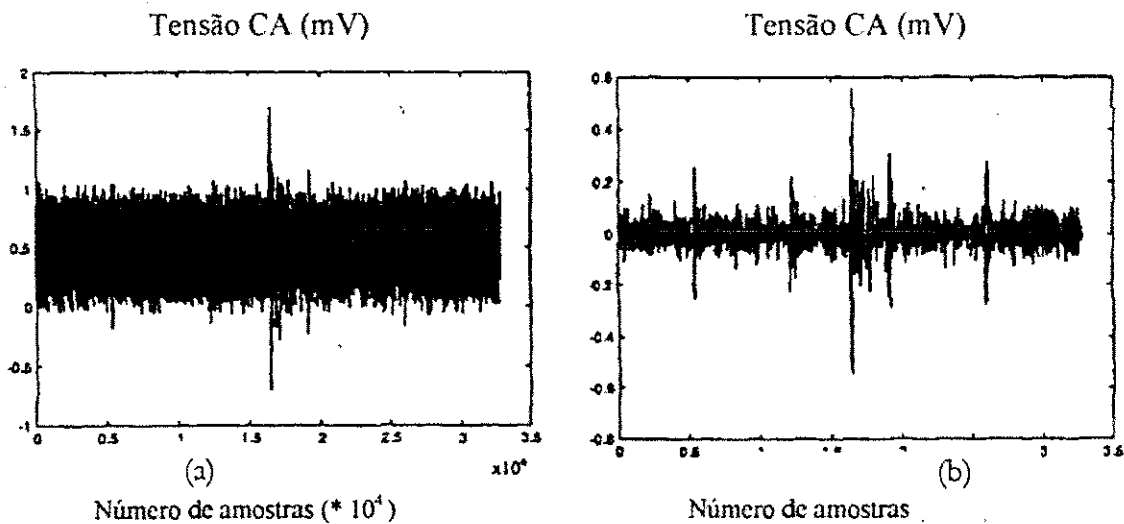


Figura 2.20 - (a) Sinal original, (b) Aproximação na escala 6 (SHIM et al, 1999).

Observando a Figura 2.20, nota-se que os sinais de descarga estão praticamente escondidos pelo nível de ruído. O sinal reconstruído é mostrado na Figura 2.21. A localização dos sinais de



descargas parciais já estava previamente estabelecida pelo método analítico desenvolvido no artigo.

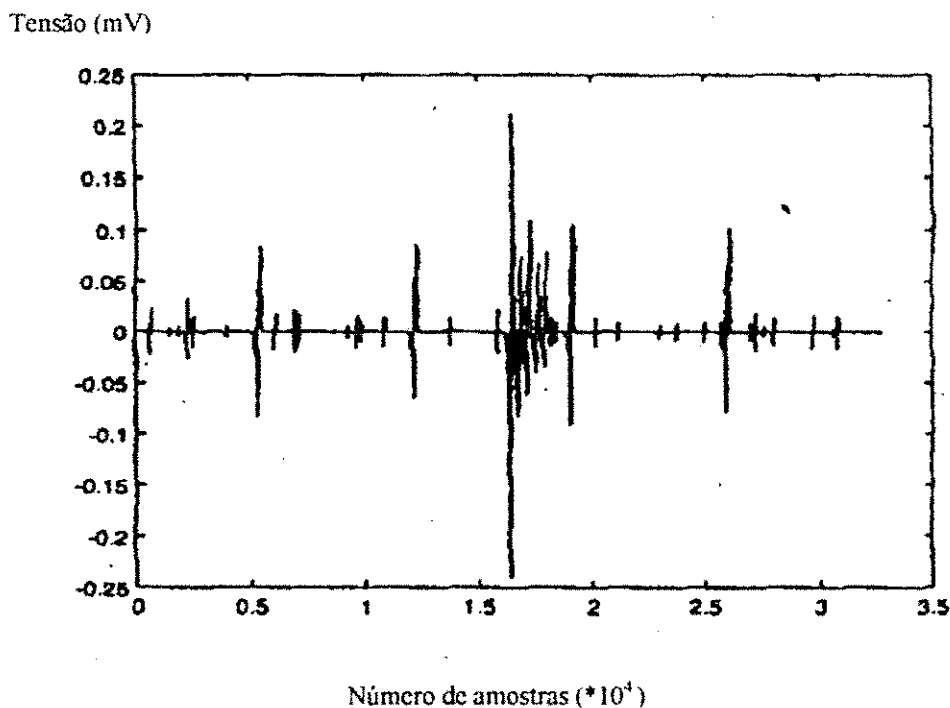


Figura 2.21 - Sinal reconstruído através da transformada wavelet discreta inversa (SHIM et al, 1999).

FLORKOWISK (1999) aplicou a técnica de *soft-thresholding* para imagens formadas pelas distribuições  $H_n(\varphi)$  e  $H_m(\varphi)$ . Neste caso, transformada wavelet discreta foi realizada em duas dimensões. A técnica de *soft-thresholding* é resumida pela Equação 2.21. Graficamente é mostrado na Figura 2.22. A técnica do *soft-thresholding* é uma suavização da técnica de *hard-thresholding*. Ela evita a descontinuidade do sinal, presente na primeira técnica. De acordo com o autor, o sucesso da supressão do ruído está intrinsecamente relacionada à escolha do valor de TH.

$$d_{\text{soft}} = \begin{cases} \text{sgn}(d)(|d| - TH) & \text{para } |d| \geq TH \\ 0 & \text{para } |d| < TH \end{cases} \quad (2.21)$$

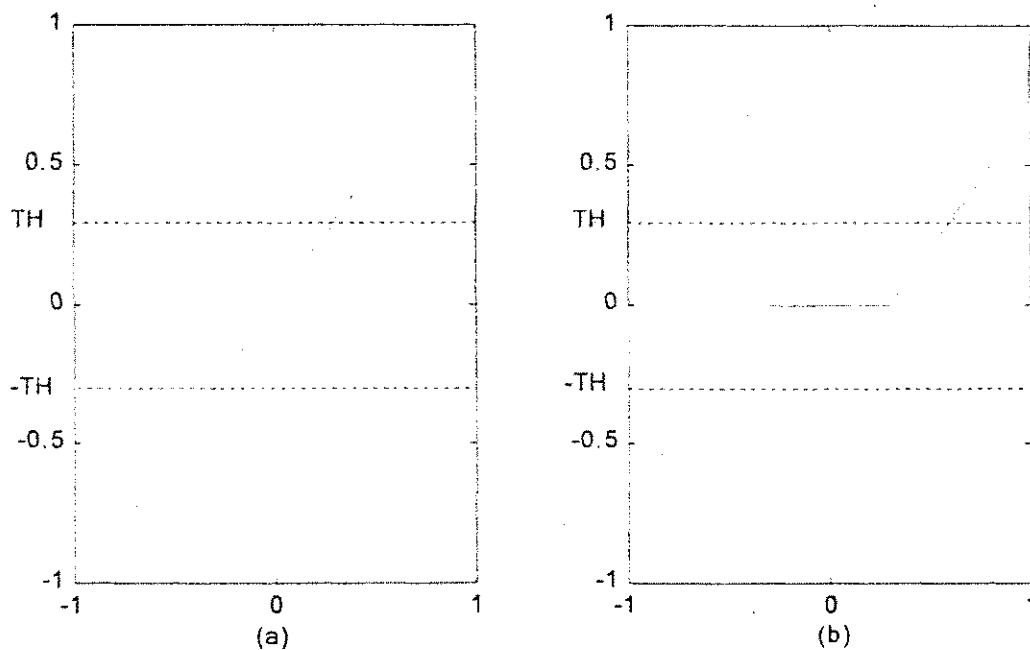


Figura 2.22 - (a) Sinal original, (b) Sinal após passar pelo *soft-thresholding*.

SHIM et. al. (2000) mediram sinais de descargas parciais em um cabo de três condutores isolado com papel impregnado a óleo de 1,8 km sob tensão de 33 kV. Foi feita a supressão de ruídos usando a técnica de *hard-thresholding*. O sinal foi decomposto até a nona escala, como se mostra na Figura 2.23. Utilizou-se para esta decomposição uma wavelet chamada Daubechies 2 mostrada na Figura 2.24. O método de *hard-thresholding* foi utilizado para as escalas 7, 8 e 9 pois os pulsos de descargas parciais estavam mais proeminentes. Então, o sinal foi reconstruído através da transformada wavelet discreta inversa. O resultado é mostrado na Figura 2.25.

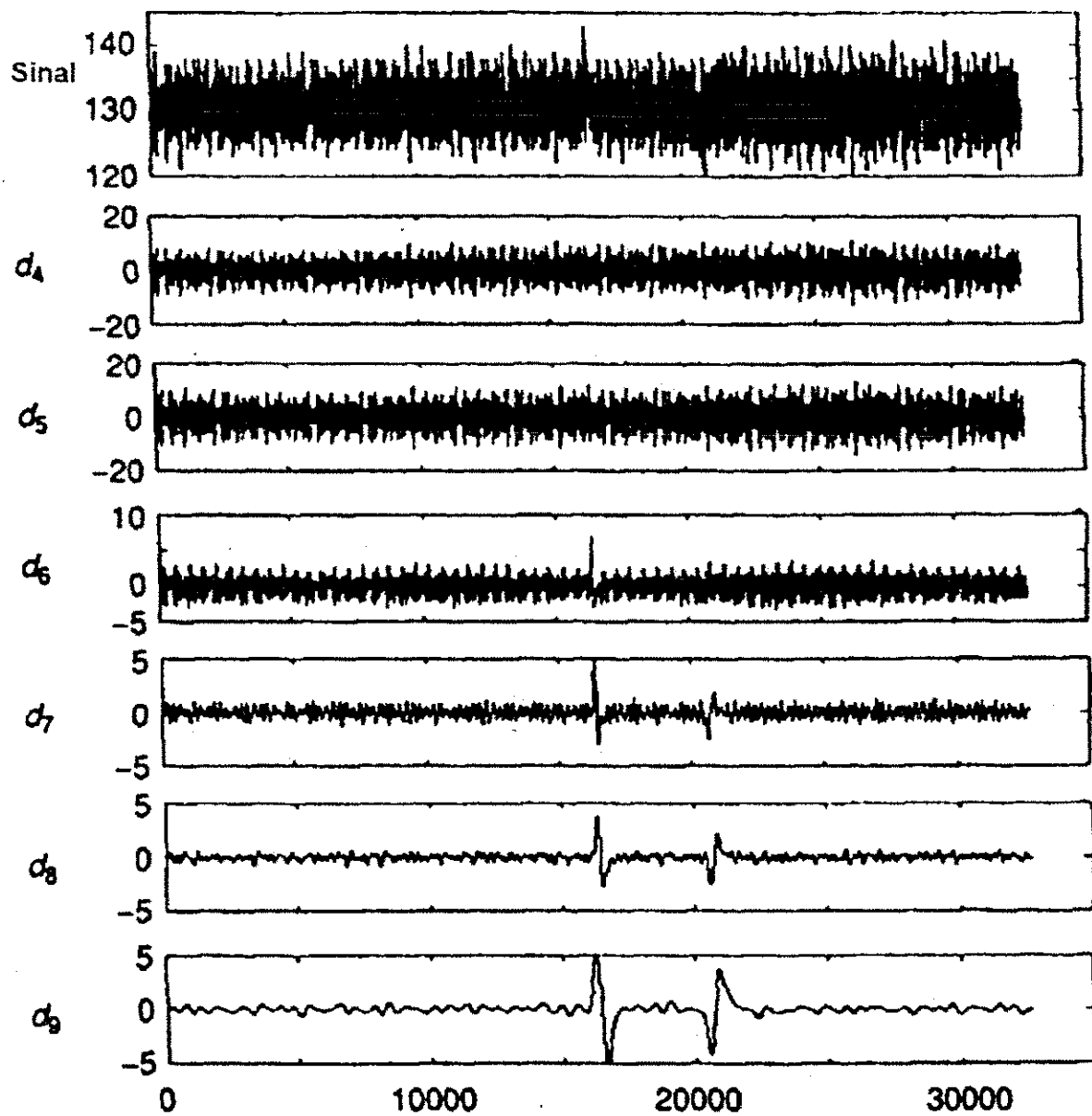


Figura 2.23 - Decomposição de um sinal até a nona escala (SHIM et al, 2000).

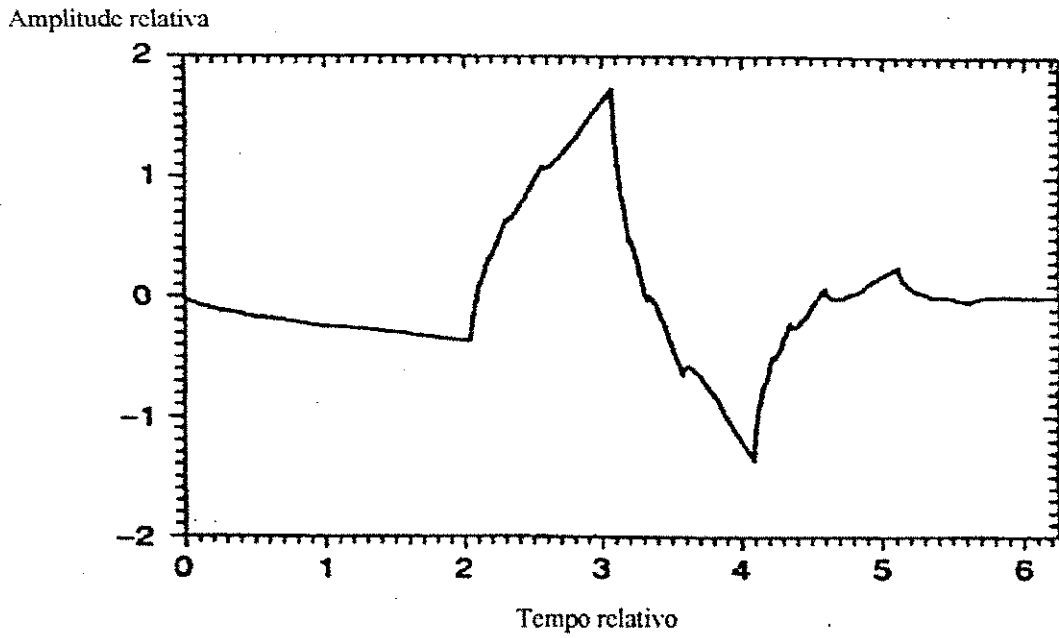


Figura 2.24 - Wavelet do tipo Daubechies-2 (SHIM et al, 2000).

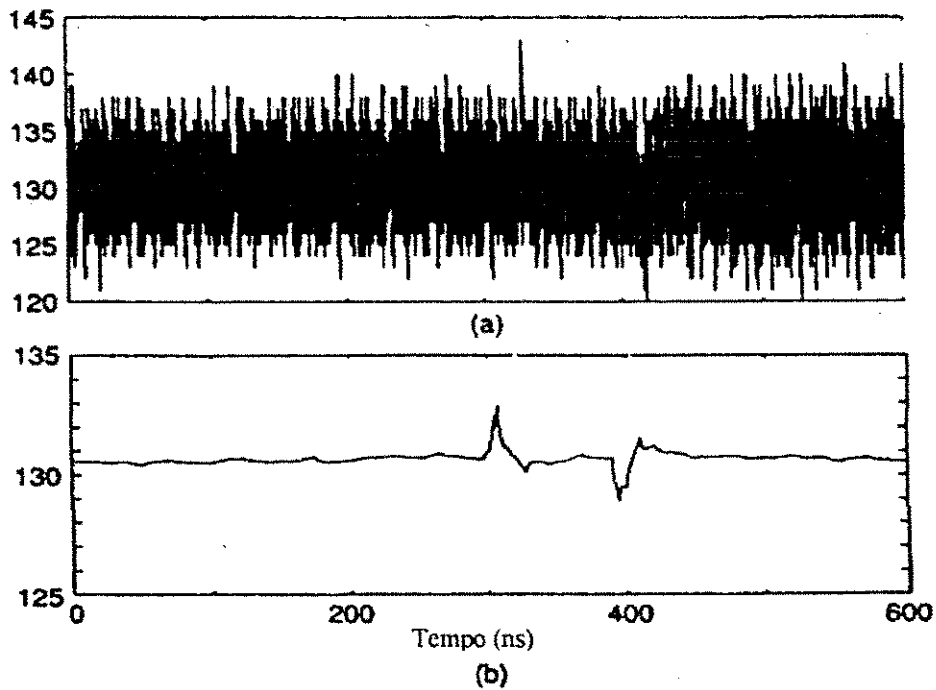


Figura 2.25 - (a) Sinal original, (b) Sinal após a supressão de ruído (SHIM et al, 2000).

KRANZ (2000) afirma que o método de detecção convencional não é adequado para a diferenciação entre os pulsos de descargas parciais e um pulso de ruído. Na Figura 2.26 mostra-

se um resultado obtido que corrobora a afirmação, pois apesar da diferença entre as amplitudes dos sinais, as suas formas são praticamente idênticas.

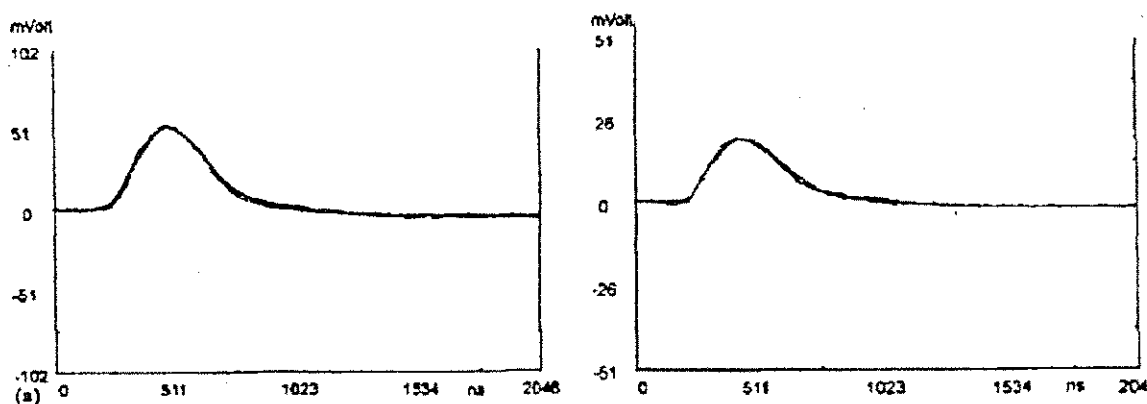
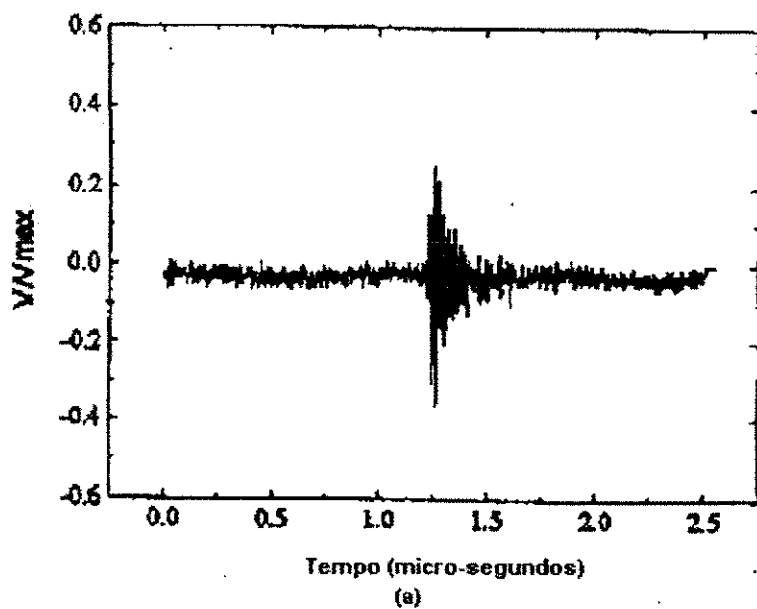


Figura 2.26 - (a) Pulso de descarga parcial, (b) Pulso de ruído (KRANZ, 2000)

Além da supressão de ruído, como já mencionado antes, as wavelets podem auxiliar no reconhecimento de descargas parciais através de uma representação alternativa. O sinal pode ser representado no domínio do tempo e no domínio da frequência. KAWADA et. al. (2000) investigaram sinais de descargas parciais oriundos de GIS. As medições foram feitas com uma antena com faixa de passagem de (20-200) MHz. Na Figura 2.27(a) mostra-se a representação do sinal no domínio do tempo, enquanto que na Figura 2.27(b) o sinal está representado tanto no domínio do tempo, como no domínio da frequência. O eixo das frequências representa as diferentes resoluções em que o sinal é decomposto, visto que um dado nível de resolução do sinal está associado à uma determinada faixa de frequência que o sinal possui, já que o tempo de resolução e a banda de frequência de um sinal são grandezas inversamente proporcionais. No gráfico da Figura 2.27 (b), é possível perceber como os componentes de frequência do sinal analisado variam com o tempo.



Valores dos coeficientes wavelets

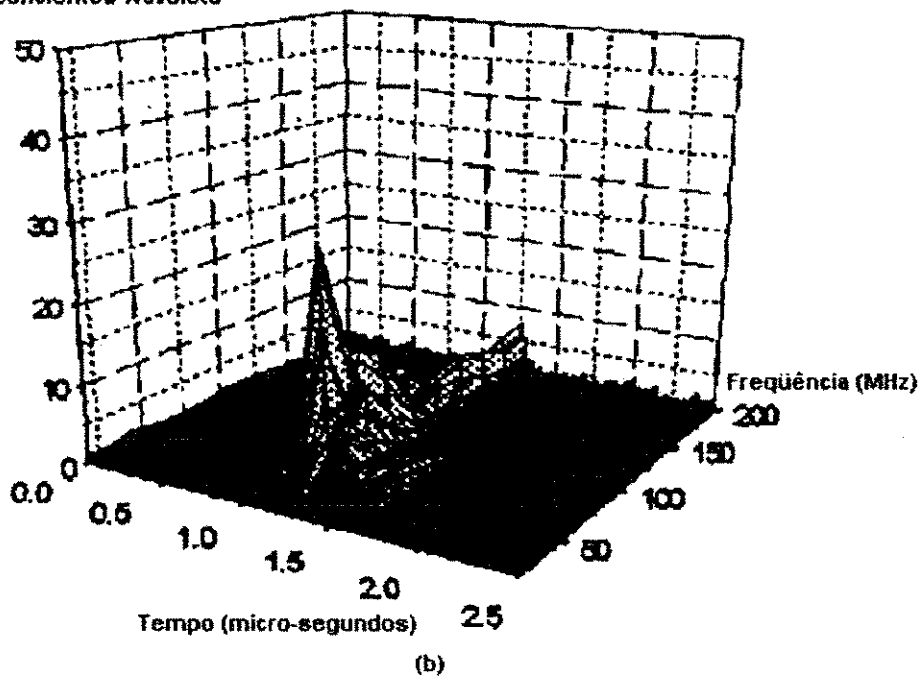


Figura 2.27 - (a) Representação do sinal no domínio do tempo, (b) Representação tridimensional do sinal, usando o plano tempo-frequência (KAWADA et al, 2000).

# CAPÍTULO III

## Materiais e Métodos

### 3.1 – Introdução

Este capítulo descreve os materiais e métodos utilizados na geração, detecção, digitalização e análise de sinais de descargas parciais. O funcionamento do detector de descargas parciais e do digitalizador utilizados é descrito. O trabalho está dividido em duas etapas. A primeira consiste nas montagens e realizações de ensaios experimentais em configurações típicas e apropriadas para produzir descargas parciais e corona. Ainda nesta etapa, um transformador de corrente para sistemas elétricos de 230 kV é utilizado como amostra de teste. Todos os ensaios foram realizados segundo os procedimentos ditados pela norma IEC- 270. Através da digitalização, obteve-se os sinais com tempo duração de pouco mais de um período da tensão aplicada ao objeto de ensaio. Utilizou-se a detecção convencional discutida no capítulo anterior. A segunda etapa consiste na análise e emprego de métodos de redução de ruídos utilizando Wavelet toolbox do programa MATLAB.

### 3.2 – Materiais

#### Configurações das amostras

##### Configuração 1

A configuração 1 é composta de eletrodos metálicos do tipo ponta-plano com a ponta conectada no terminal de alta-tensão. O meio dielétrico que envolve os eletrodos é o ar. Na Figura 3.1, mostra-se o desenho da configuração 1 para a geração de corona.

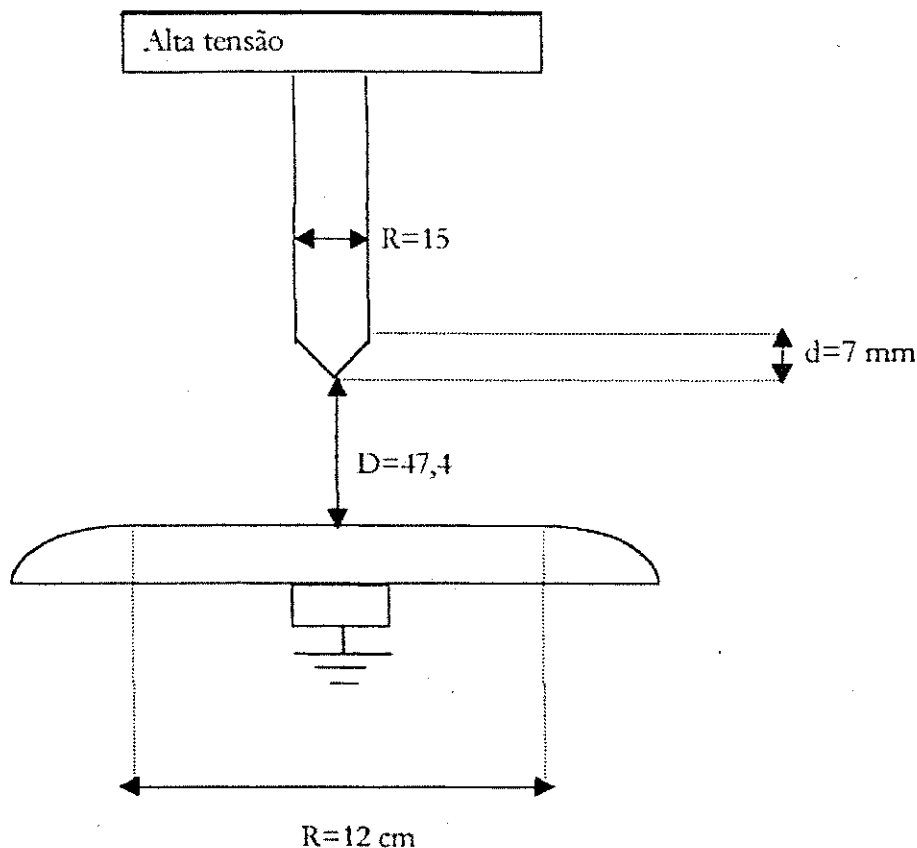


Figura 3.1 - Configuração do arranjo experimental para produzir corona.

### Configuração 2

A configuração 2 é composta de eletrodos metálicos do tipo ponta-plano com a ponta conectada no terminal de alta tensão. O eletrodo ponta é cravado em um cubo de polietileno. O eletrodo utilizado é uma agulha de máquina de costura n° 14 que possui raio de curvatura igual a aproximadamente 50 micrômetros. Na Figura 3.2, mostra-se o desenho da configuração 2. Uma variação dessa configuração é apresentada na Figura 3.3. Uma cavidade no interior do cubo de polietileno (extremidade da agulha) foi criada artificialmente para produzir descargas parciais. Ela é preenchida com ar e mede aproximadamente 0,8 mm de profundidade. Para minimizar o corona, uma esfera metálica foi colocada entre a agulha cravada no cubo de polietileno e o condutor no lado de alta tensão.



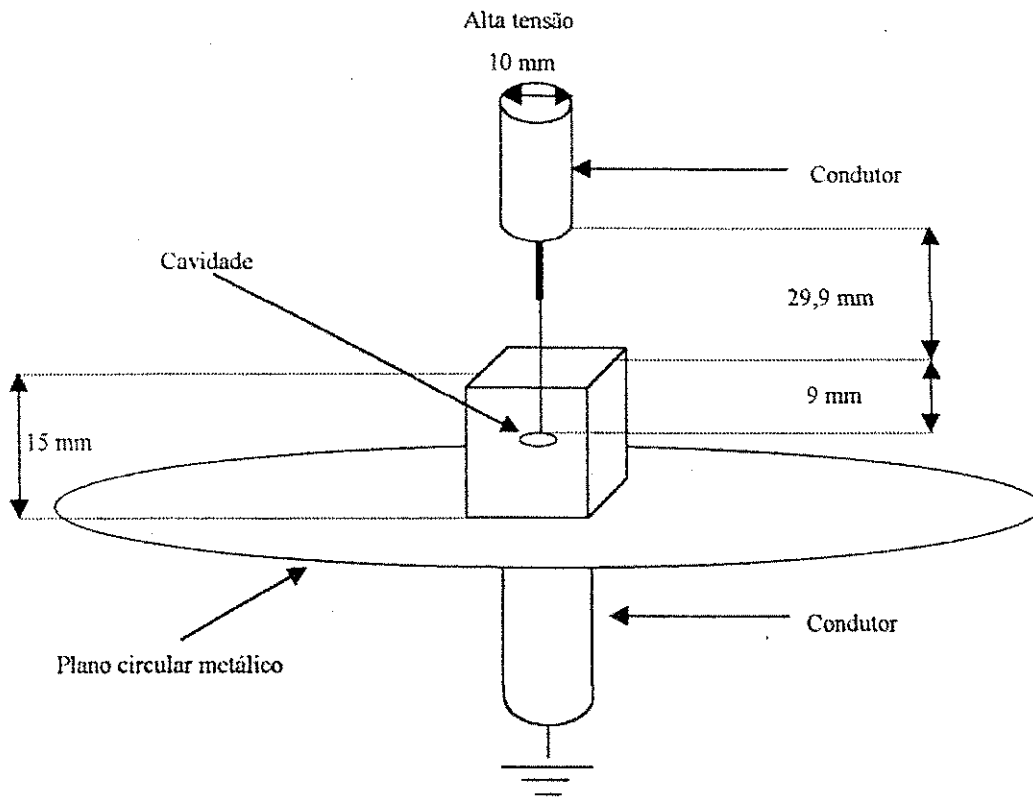


Figura 3.2 - Configuração para simular descargas parciais em um cubo de polietileno.

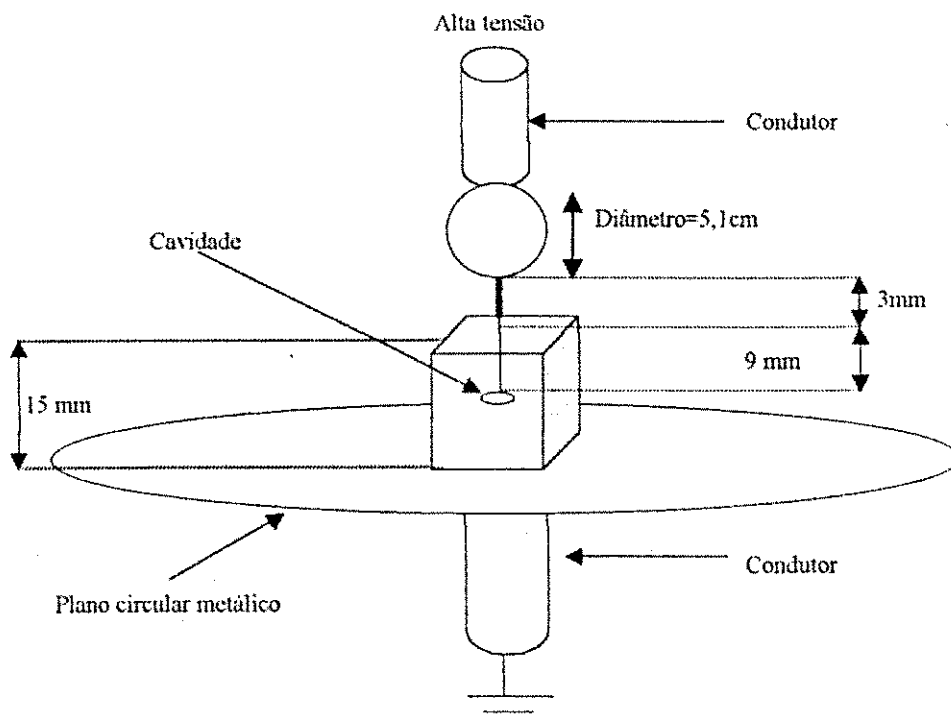


Figura 3.3 - Variação da configuração para simular descargas parciais em um cubo de polietileno.

### Configuração 3

A configuração 3 é composta de eletrodos metálicos do tipo bastão-plano com o bastão conectado no terminal de alta tensão. Entre os eletrodos existem três discos de acrílico com dimensões de 1,5 mm de espessura e 46,1 mm de diâmetro cada um. Os discos são colocados justapostos. Na Figura 3.4, mostra-se um exemplo da configuração. Contudo, um dos discos apresenta uma pequena cavidade. A cavidade foi introduzida artificialmente para produzir descargas parciais. Combinações da configuração 3 são utilizadas variando a posição do disco com cavidade (disco 1). O disco 1 está posicionado acima dos outros dois discos sem cavidade com a cavidade voltada para cima, ou seja, em contato com o eletrodo da alta tensão.

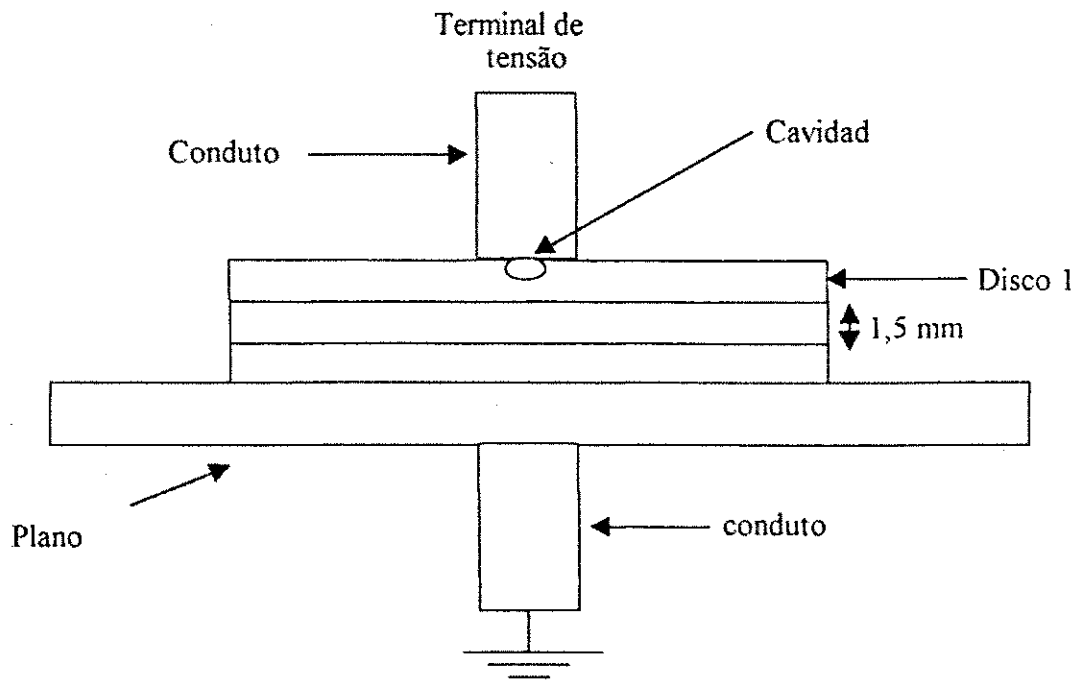


Figura 3.4 - Configuração para a simulação de cavidades gasosas para discos de acrílico.

### Configuração 4

A configuração 4 é composta de eletrodos metálicos do tipo ponta-plano, com a ponta conectada no terminal de alta tensão. O cilindro de epóxi moldado envolvendo o eletrodo ponta (agulha de máquina). Na Figuras 3.5, mostra-se o desenho da configuração. O processamento de fabricação do cilindro de epóxi foi conduzido para evitar a ocorrência bolhas ou cavidades entre os eletrodos.

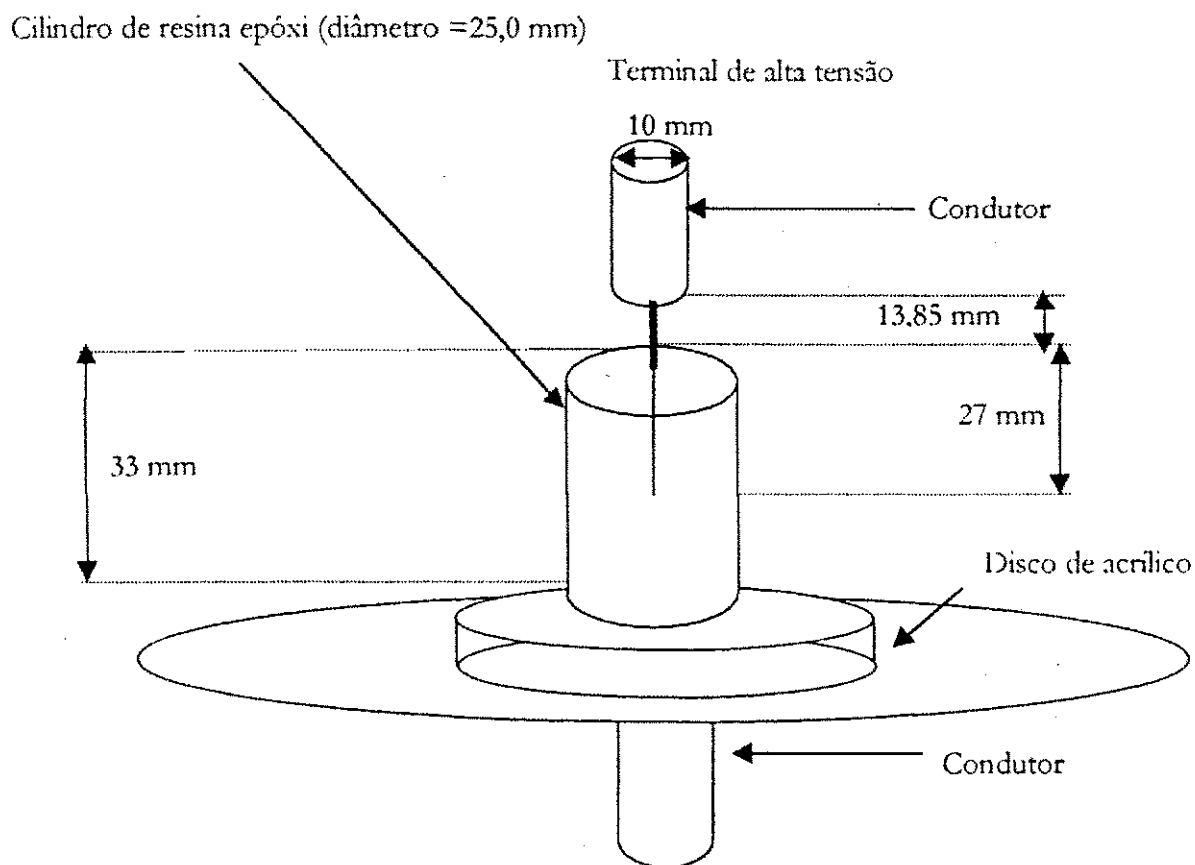


Figura 3.5 - Configuração para testes dos cilindros de resina epóxi.

### Configuração 5

A configuração 5 é composta por um transformador de corrente (TC). Alguns dados de placa do TC estão colocados na Tabela 3.1. O valor do nível básico de isolamento (NBI) do TC é 1050 kV. Na Figura 3.6, mostra-se a fotografia de três transformadores de corrente utilizados em sistemas elétricos de 230 kV.

Tabela 3.1 - Características do transformador de corrente.

Equipamento: TC	Nº de Série: 305132
Fabricante: SIEMENS	Tipo: ATOF II 230
Ano de fabricação: 1986	Tensão nominal: 230 kV

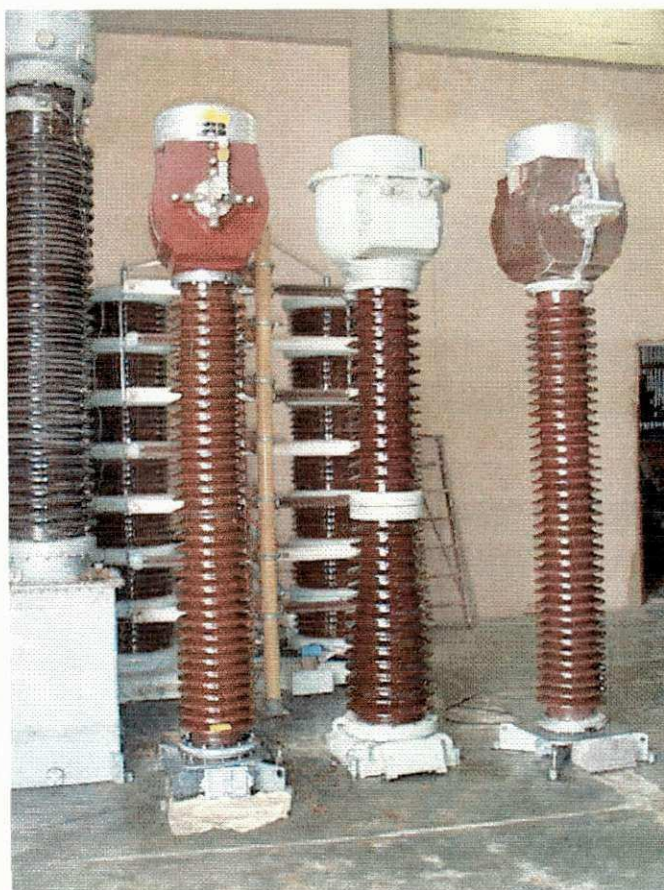


Figura 3.6 - Fotografia de três transformadores de corrente.

### 3.3 - Método

#### 3.3.1 - Detecção de Descargas Parciais e Digitalização dos Sinais

A detecção de descargas parciais foi realizada através do método convencional, mostrado na Figura 2.6. Ele é sugerido pela Norma IEC 270/1981 e adotado pela ABNT. A Figura 3.7 ilustra o arranjo elétrico utilizado para geração, detecção e digitalização dos sinais.

Os ensaios de descargas parciais utilizando as configurações de 1 a 4 foram realizados em uma sala blindada no Laboratório de Alta Tensão (LAT) na Universidade Federal da Paraíba. A alimentação elétrica do circuito de alta tensão é feita na tensão de 220 volts com tensão alternada e frequência industrial. Na mesa de controle é possível fazer a variação do nível de tensão aplicada, além de possuir sistema de acionamento e de proteção. O transformador de alta tensão apresenta uma relação de transformação de 220V - 100 kV e potência nominal de 10 kVA. A medição da tensão é feita com auxílio de um divisor de tensão resistivo com saída para o osciloscópio. O sinal da tensão também serve de referência para localização e identificação das descargas parciais. O capacitor de acoplamento,  $C_x$ , apresenta uma capacitância de 170 pC, bem superior aos valores das amostras ensaiadas. Os pulsos de corrente, gerados pelas descargas parciais no objeto de teste (OT), produzem uma queda de tensão (sinal) no impedor, que se encontra fisicamente dentro do detector de descargas parciais. Os sinais são amplificados, processados e disponibilizados para a leitura analógica, podendo ser visualizados com o auxílio de um osciloscópio (ORC). Paralelamente, os sinais foram disponibilizados para o digitalizador RTD 710A de fabricação Tektronix. Do digitalizador, os sinais foram passados para um computador pessoal (PC) através de um sistema GPIB. Os sinais digitalizados são armazenados no PC em arquivos binários, que posteriormente são traduzidos para o formato ASCII através de um programa computacional escrito em código MATLAB. Assim os dados podem ser manipulados por um editor de gráfico de preferência do usuário.

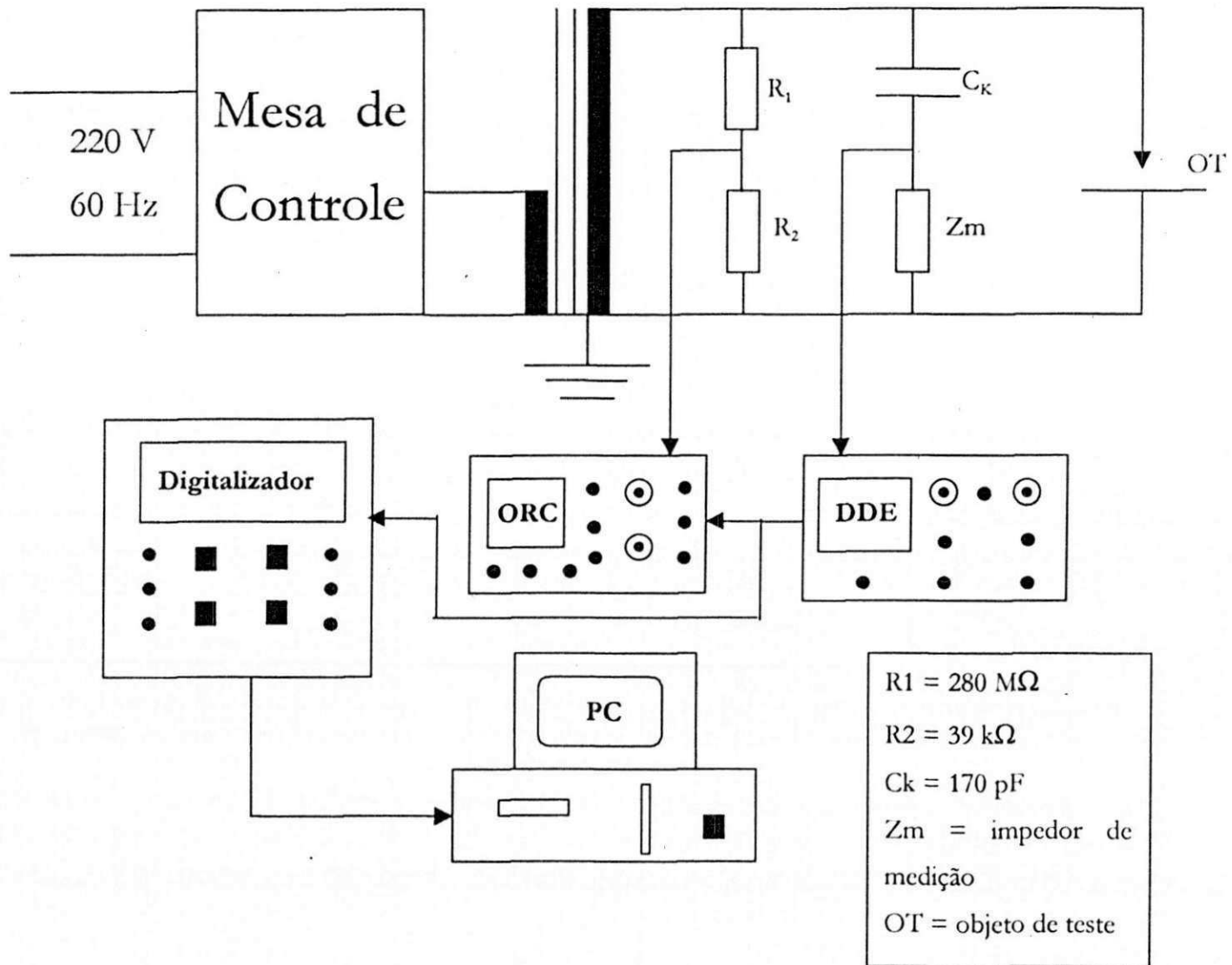


Figura 3.7 - Arranjo geral utilizado para geração, detecção e digitalização de descargas parciais.

O ensaio de descargas parciais no transformador de corrente (TC) (configuração 5) foi realizado na sala principal do LAT/DEE. Na Figura 3.8, mostra-se a configuração utilizada. Na Figura 3.9, mostra-se o circuito de medição de descargas parciais em um transformador de corrente. Devido ao nível de tensão aplicado ao TC, o circuito requer equipamentos com maior isolamento e potência que os das configurações anteriores. O divisor de tensão utilizado possui maior isolamento e é do tipo capacitivo. O capacitor de acoplamento também se apresenta com isolamento maior e possui capacitância superior a do objeto de teste, com valor aproximado de 2100 pF.

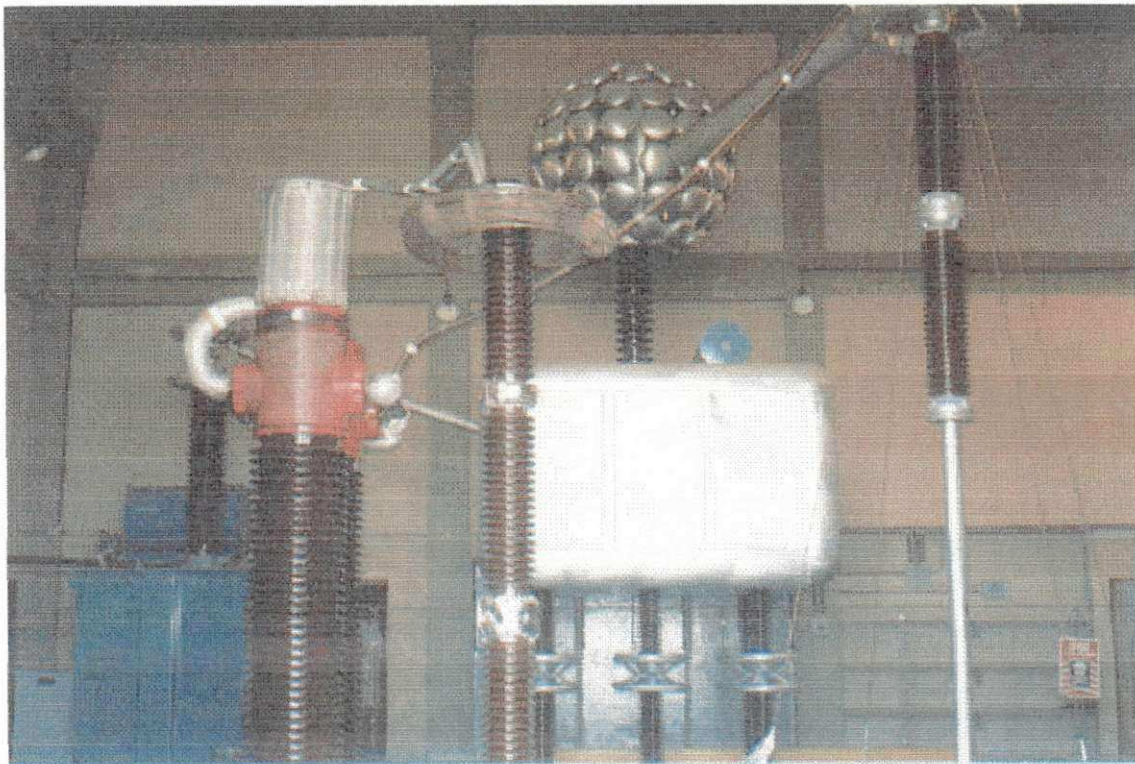


Figura- 3.8 - Fotografia do arranjo para de detecção de descargas parciais em um transformador de corrente.

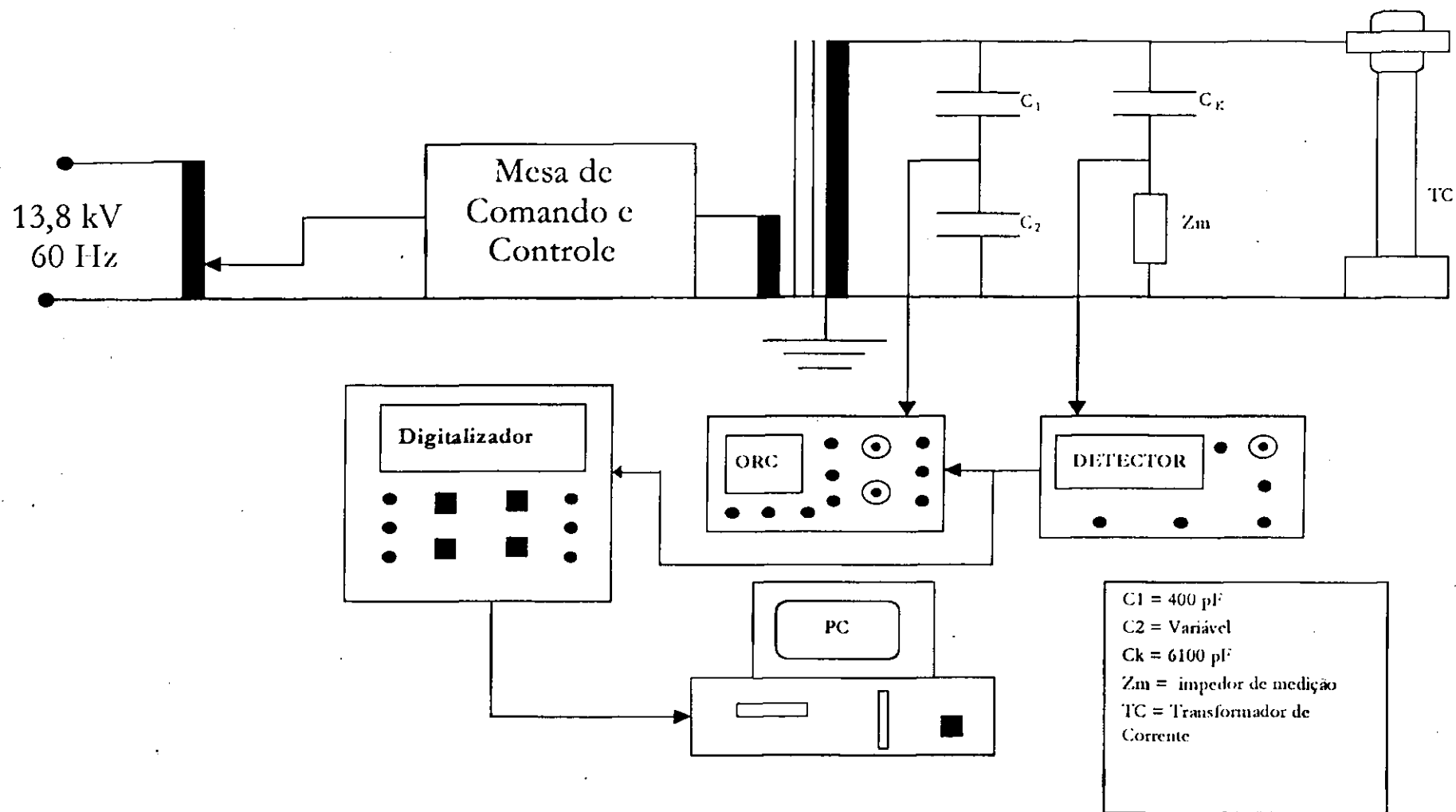


Figura 3.9 - Circuito de detecção de descargas parciais em um transformador de corrente.



A alimentação elétrica do circuito de alta tensão para o ensaio no transformador de corrente é feita na tensão de 13,8 kV em um sistema bifásico, com tensão alternada e frequência industrial. Na mesa de controle é possível controlar o regulador de tensão, conseqüentemente, a variação do nível de tensão aplicado nos enrolamentos do primário do transformador em cascata. O transformador de alta tensão apresenta uma relação de transformação de 1000 V - 600 kV e potência nominal de 350 kVA.

Para o melhor entendimento do processo de detecção e digitalização, a seguir serão detalhados os principais parâmetros do detector de descargas parciais e do digitalizador.

### **Detector de descargas Parciais**

O detector de descargas parciais Biddle tipo *Balanced Partial Discharges Detector* foi utilizado. Os principais parâmetros do equipamento estão mostrados na Tabela 3.2. Pode-se verificar que a faixa de passagem do amplificador é muito estreita (ordem de kHz), podendo causar distorção na detecção. O ganho do amplificador é de 84 dB, ou seja, o sinal captado é amplificado em 13000 vezes. A constante de tempo da medição de picoColoumb vale 1 segundo, limitando a detecção de sinais rápidos no tempo. O valor da impedância do impedor de medição deve ser ajustado com o valor da capacitância do objeto de teste.

Os sinais de descargas parciais, normalmente, são sobrepostos a uma senóide gerada internamente pelo detector. O detector permite ajustes de trinta graus a fim de que a senóide esteja em fase em relação ao sinal da rede. Na Figura 3.10, mostra-se a fotografia do detector de descargas parciais e o PC utilizados no experimento. Acima do detector encontra-se um osciloscópio digital da Tektronix.

Tabela 3.2 - Especificações do detector de descargas

Parâmetros	Valores
Máxima corrente no objeto de ensaio	5 A
Constante de tempo do medidor de Picocoulomb	1 segundo
Precisão do medidor de Picocoulomb	$\pm 10\%$ da leitura de 5 a 500 pC
Níveis das saídas de calibração	Interna: 100 pC Externa: 1, 10, 100, 100 pC
Ganho do amplificador	84 db
Faixa de passagem do Amplificador	16 à 180 kHz
Potência	10 VA



Figura 3.10 - Fotografia do detector de descargas parciais, do osciloscópio e do computador pessoal.

### Digitalizador

Os sinais captados pelo detector de descargas parciais são pelo digitalizador RTD 710A da Tektronix. O digitalizador possui gatilhamento (*trigger*) interno ou externo. Ele tem a capacidade de captar sinais com amplitude entre 100 mV e 50 V. O digitalizador pode se comunicar com o computador através de um sistema de comunicação GPIB. A resolução do

digitalizador é de 10 bits. No seu modo normal, a taxa mínima de amostragem é de 10 ns. Sua memória é composta de 256 K palavras (10 bits por palavra). Cada ponto amostrado pelo digitalizador de resolução de 10 bits é dividido em duas palavras de 8 bits (Byte), quando são transferidos para o computador. Ou seja, cada ponto do sinal consome 2 bytes de memória. A Figura 3.11 ilustra o processo.

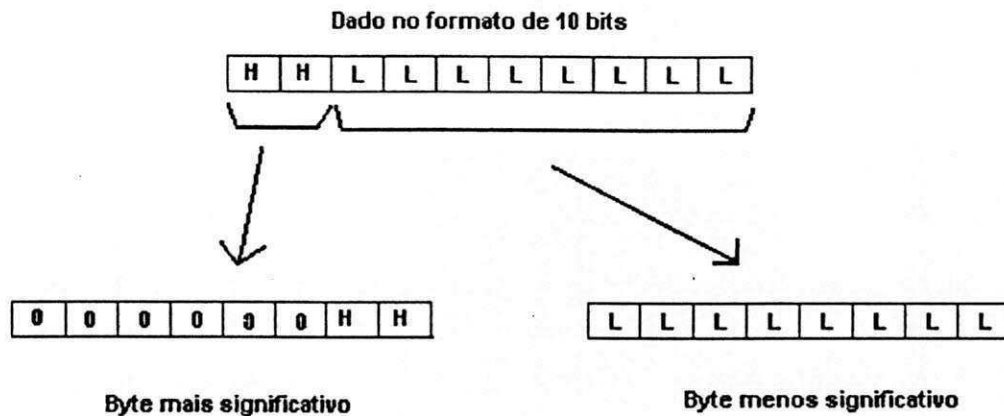


Figura 3.11 - Transferência dos dados de 10 bits para o computador.

Todos os dados captados foram transferidos para o computador através de um programa desenvolvido em código C pela National Instruments, chamado IBIC (NI-488.2™ MS-DOS *Software Reference Manual*, 1991). As medições são armazenadas no computador, em arquivos binários. Na Figura 3.12, mostra-se como os dados transferidos para o computador são armazenados.

O digitalizador fornece a opção de transmitir os dados em um ou mais blocos. Detalhes sobre os comandos GPIB para o digitalizador RTD 710A podem ser encontrados em (RTD 710A *Digitizer Operator Manual*, 1988). Os principais parâmetros do digitalizador na amostra de um sinal são: o tempo de amostragem, o número de pontos adquiridos e o range.

Para se traduzir os arquivos em formato binário para ASCII, um programa em linguagem MATLAB foi desenvolvido. Este programa se encontra em anexo.

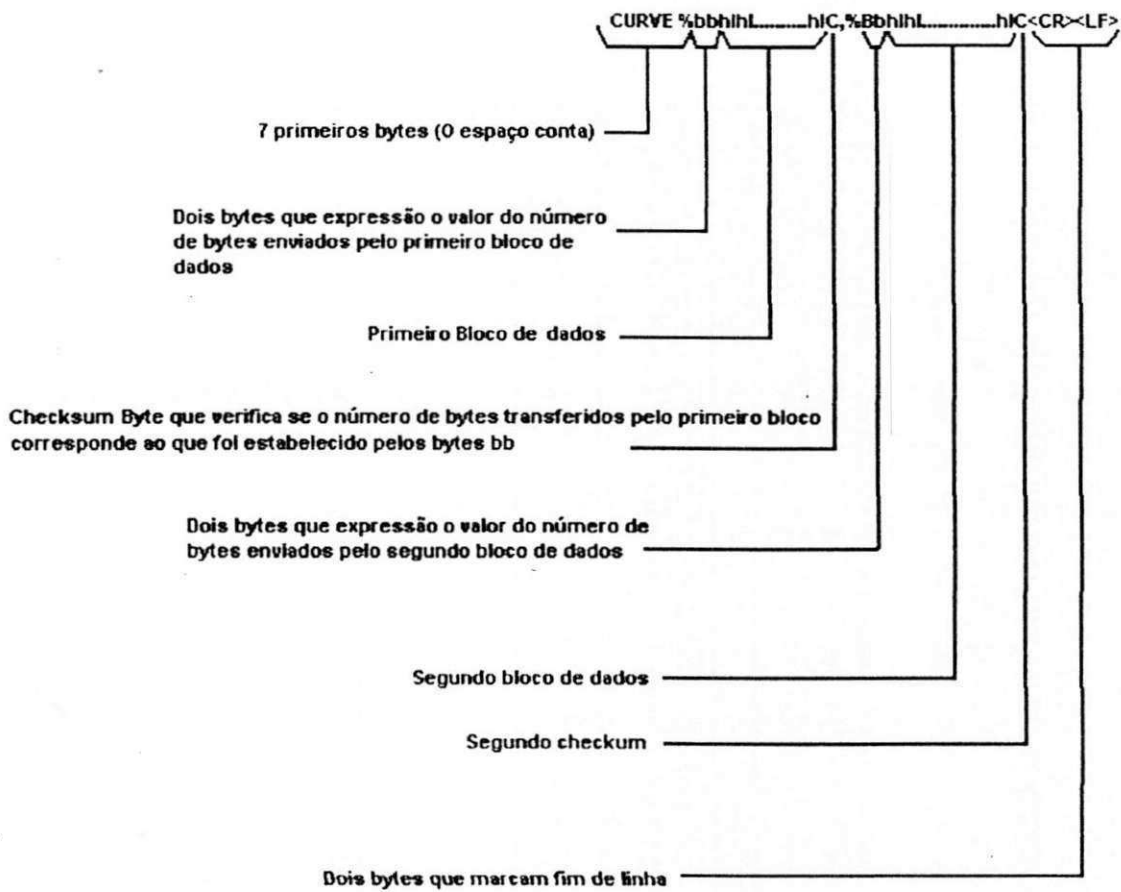


Figura 3.12 - Formato dos arquivos transferidos do digitalizador para o computador.

## **Calibração do circuito**

Nesta seção, mostra-se a metodologia utilizada nos ensaios de diferentes amostras. Anteriormente aos ensaios, procedeu-se a calibração direta e indireta da medição. Assim, uma carga de valor conhecido é injetada no circuito de medição. A amplificação é ajustada para que o valor lido seja correspondente ao valor da carga injetada. A carga injetada é obtida por sinais de onda quadrada gerados pelo próprio detector aplicados em um capacitor. O valor da carga de calibração para todos os ensaios é de 100 pC.

O procedimento para ajuste do ângulo de fase entre o sinal senoidal gerado no próprio detector e o sinal senoidal de alta tensão é feito utilizando a geração de corona através de uma ponta metálica colocada no terminal de alta tensão. Como os sinais de corona para este tipo de arranjo ocorrem no pico negativo de tensão (fato conhecido), o pico negativo da senóide gerada pelo detector é alinhado com os pulsos de corona.

### **3.3.2 - Procedimentos de Ensaios**

Com o objetivo de realizar a digitalização e o estudo de descargas parciais, utilizando transformada wavelet discreta, vários ensaios são realizados. Os ensaios apresentam como variáveis: o nível de tensão aplicado ao objeto de ensaio, a localização da cavidade onde são gerados os pulsos de descarga parcial e o tempo de aplicação da tensão. Amostragens com 16 k pontos e 32 k pontos são utilizadas. Os intervalos de amostragem utilizados são 600 ns ou 2,5  $\mu$ s.

No ensaio do TC (configuração 5), os níveis de descargas parciais são funções do nível de tensão aplicado e o tempo de aplicação. A tensão aplicada ao TC deve ser aumentada gradativamente. Quando os níveis da tensão aplicada atingirem determinados valores, o nível de descargas parciais deve ser registrado e os sinais adquiridos. Dependendo do nível de tensão, o

registro e a aquisição do nível de descargas parciais devem ser feitos mais de uma vez. A Tabela 3.3 resume o procedimento do ensaio realizado.

Tabela 3.3 - Resumo dos ensaios para o transformador de corrente

Tensão aplicada (kV)	Tempo de espera para a medição e aquisição (min.)
35	0
140	0
140	2
154	0
154	2
168	0
168	2
168	4
168	6
168	8
168	10

### 3.3.4 - Procedimento para análise dos sinais

Após a digitalização, os sinais são traduzidos de binário para ASCII através de um programa escrito em código MATLAB. O programa tem como saída um vetor que contém o sinal amostrado. Através da transformada wavelet, o sinal amostrado é decomposto em diferentes resoluções contidas em vetores. Os diferentes níveis de resolução do sinal amostrado são visualizados simultaneamente através de um gráfico tridimensional **Z**. Para a formação do

gráfico  $Z$ , uma matriz é gerada a partir dos vetores que contêm as diferentes resoluções do sinal. Cada linha da matriz corresponde a um nível de resolução do sinal. Os elementos da matriz são dispostos em um gráfico tridimensional. O método matemático *hard-thresholding*, descrito no Capítulo II, é utilizado para a redução de ruídos dos sinais de descargas parciais.

O próximo capítulo apresenta as análises e discussões dos resultados obtidos experimentalmente.

## CAPÍTULO IV

### Análise e Discussão dos Resultados

#### 4.1 – Introdução

Com o objetivo de realizar a digitalização e o estudo de descargas parciais, utilizando transformada wavelet discreta, vários ensaios são realizados. Os ensaios apresentam como variáveis: o nível de tensão aplicado ao objeto de ensaio, a localização da cavidade onde são gerados os pulsos de descarga parcial e o tempo de aplicação da tensão. Amostragens com 16 K pontos e 32 K pontos são utilizadas. Os intervalos de amostragem utilizados são 600 ns ou 2,5  $\mu$ s. A escolha destes valores obedeceu duas necessidades: amostragem de acordo com o critério de Nyquist e a necessidade de captar pelo menos um ciclo da tensão aplicada ao objeto de ensaio.

As técnicas de análise de wavelet para representação de sinais em seus diversos níveis de resolução foram aplicadas. Alguns dos sinais detectados também sofreram o processamento de redução de ruído *hard-thresholding* para que suas características se tornassem mais visíveis.

Este capítulo apresenta análises e discussões dos resultados visando fornecer subsídios para futuros trabalhos de reconhecimento de padrões de descargas parciais. Para o melhor entendimento e compreensão do capítulo, os ensaios, as análises e discussões dos dados são divididos por configurações. Os ensaios em todas as configurações procuram caracterizar os detalhes dos sinais em suas diferentes resoluções, decompostas pela transformada wavelet discreta Daubechies 1 (**db 1**). A decomposição é realizada para 8 níveis de resolução. Esta caracterização é chamada de Representação Z.



## 4.2 - Configuração 1

A geração de corona em ponta conectada a alta tensão é utilizada como base para a identificação de todos os outros padrões de descargas parciais. Com a ponta conectada na alta tensão, o padrão de corona produz pulsos localizados no pico negativo da senóide aplicada ao objeto de ensaio. A representação Z dos sinais de corona pode servir como referência para representações Z de outros tipos de sinais.

A Configuração 1 é descrita no item 3.2 do Capítulo III. Dois ensaios com diferentes números de amostras (pontos) captadas do sinal foram realizados. Os arquivos para o primeiro ensaio contém 32 K amostras, com intervalo de amostragem de valor 600 ns. O arquivo para o segundo ensaio contém 16 K amostras, com intervalo de amostragem de valor 2  $\mu$ s. Nas Figuras 4.1 e 4.2, mostram-se os gráficos dos sinais de corona para 32 K e 16 K amostras, respectivamente. Os sinais foram chamados de C1 (32 k amostras) e C2 (16 k amostras).

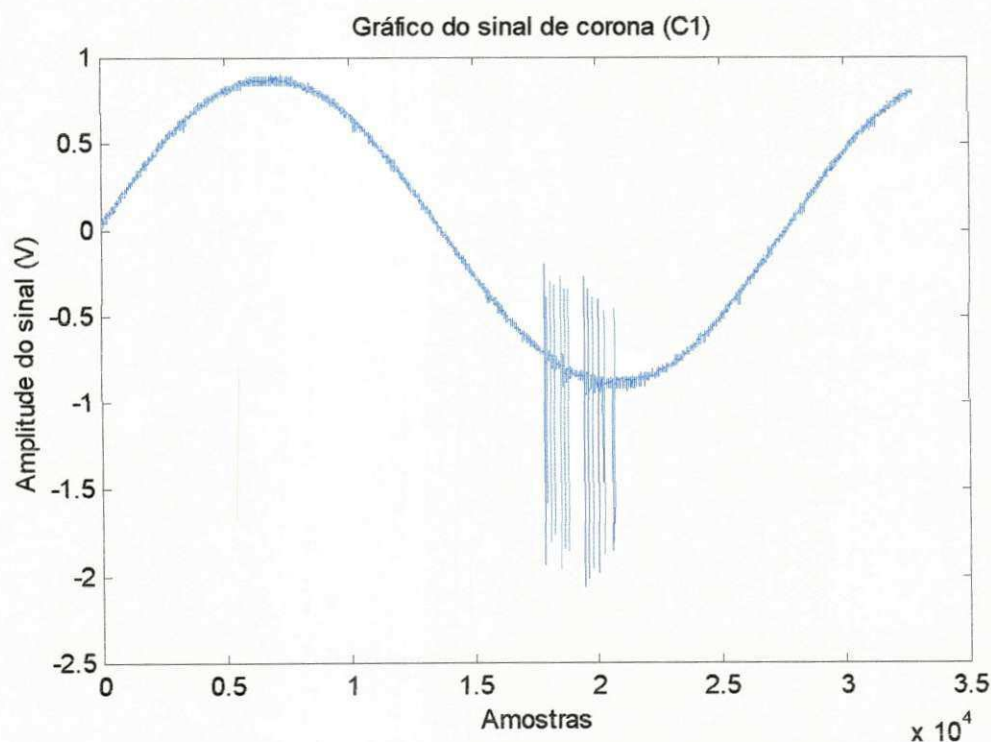


Figura 4.1 - Sinal de corona registrado com 32 K amostras.

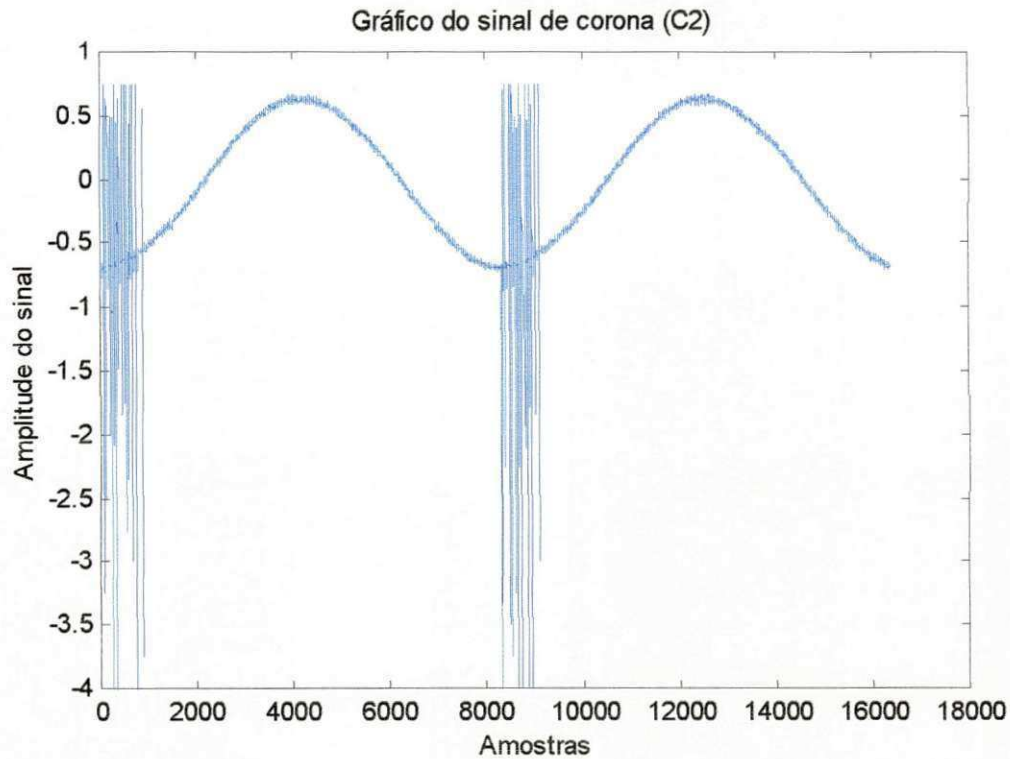


Figura 4.2 - Sinal de corona registrado com 16 K amostras.

Nas Figuras 4.3 e 4.4, mostram-se a representação Z dos sinais C1 e C2. Para o ensaio no qual se captou 32 K amostras, observa-se uma saliência com amplitudes maiores nos níveis de resolução 3 e 4. Para o ensaio com 16 K amostras, duas saliências são observadas. Elas apresentam amplitudes decrescentes a medida em que o nível de resolução aumenta. É importante observar que as resoluções em que o sinal está sendo analisado diminuem com o aumento do nível de resolução, na representação Z.

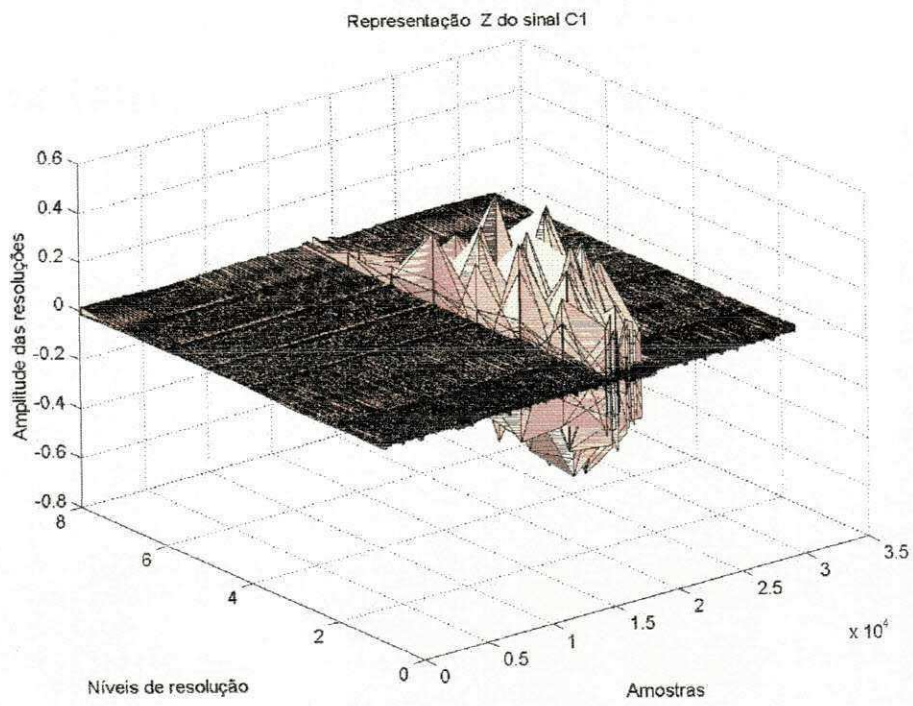


Figura 4.3 - Representação Z do sinal C1.

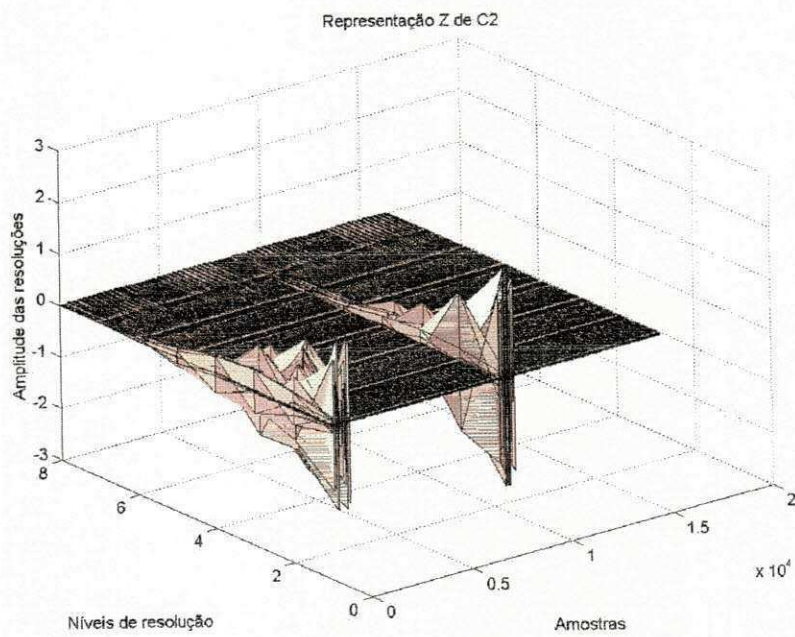


Figura 4.4 - Representação Z do sinal C2.

### 4.3 - Configuração 2

A configuração 2 foi idealizada para se estudar o comportamento das descargas parciais, tendo como variáveis o tempo e o nível da tensão de aplicação no objeto de ensaio. Ela é descrita no item 3.2 do Capítulo III.

Observou-se o efeito do tempo de aplicação de tensão na amostra, na geração de descargas parciais. Foram realizadas 6 medições e captações espaçadas de 30 minutos. Aplicou-se uma tensão eficaz de 2 kV no objeto de ensaio. Os arquivos contêm 32 K amostras, com intervalo de amostragem de 600 ns. Na Tabela 4.1, mostram-se os arquivos em que os sinais foram armazenados, o tempo de sua captação e o nível de descargas parciais medido no detector.

Tabela 4.1 - Resumo dos ensaios da configuração 2 – Tempo de aplicação como variável.

<b>Nome do arquivo</b>	<b>Tempo de aplicação (minutos)</b>	<b>Nível de descargas parciais (pC)</b>
Pt1	30	450
Pt2	60	400
Pt3	90	400
Pt4	120	400
Pt5	150	200

Os gráficos dos sinais são mostrados nas Figuras 4.5 a 4.9.

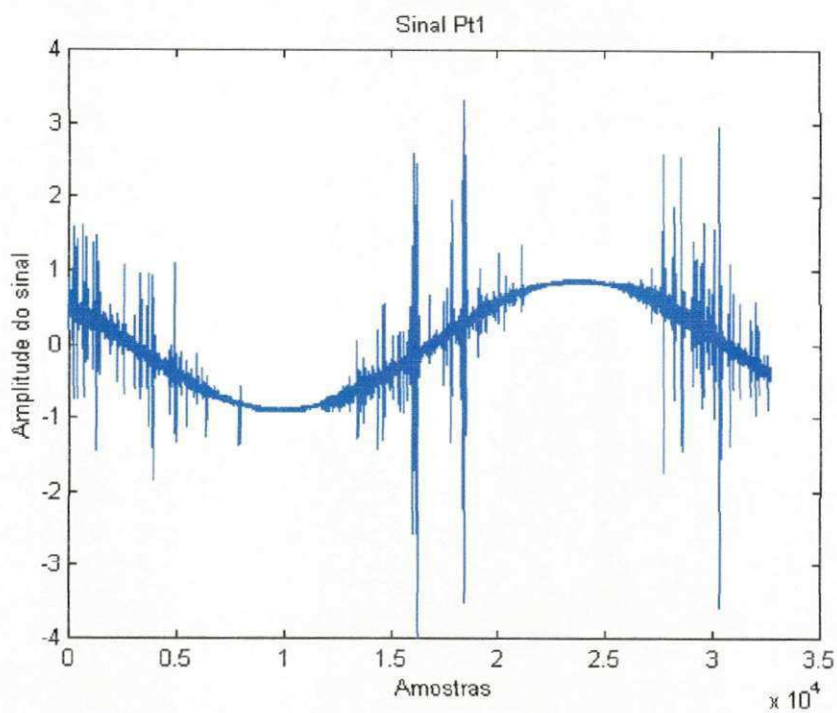


Figura 4.5 - Sinal Pt1 no domínio do tempo.

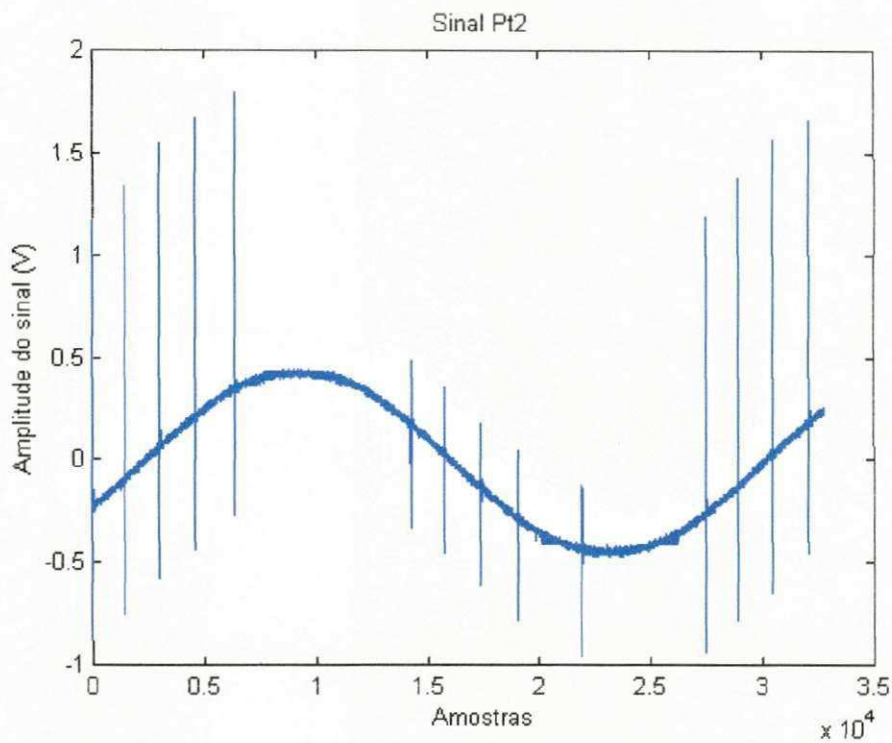


Figura 4.6 - Sinal Pt2 no domínio do tempo.

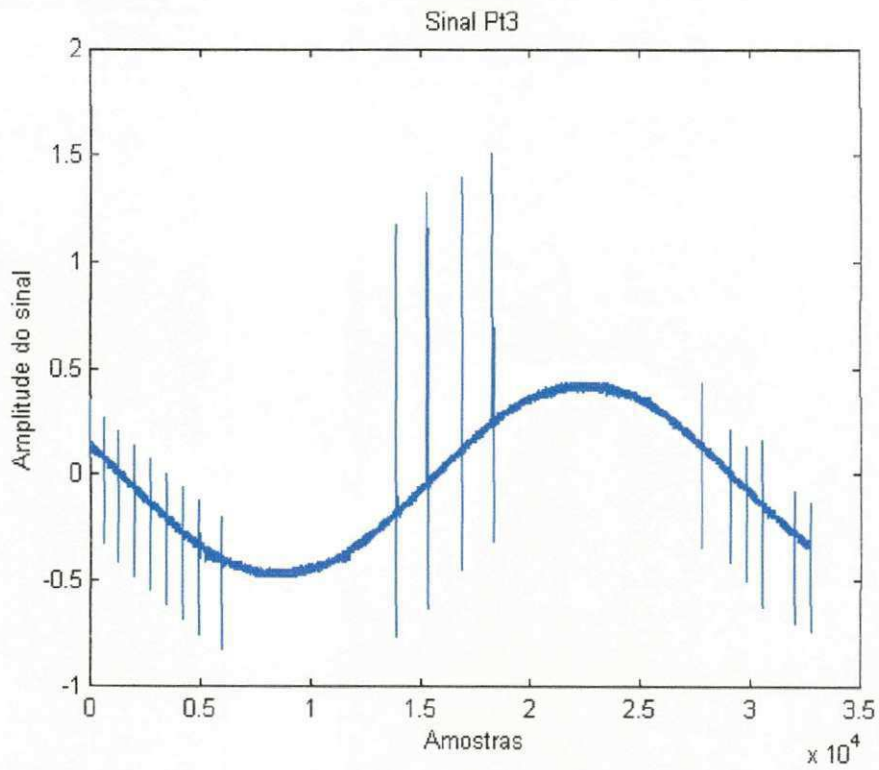


Figura 4.7 - Sinal Pt3 no domínio do tempo.

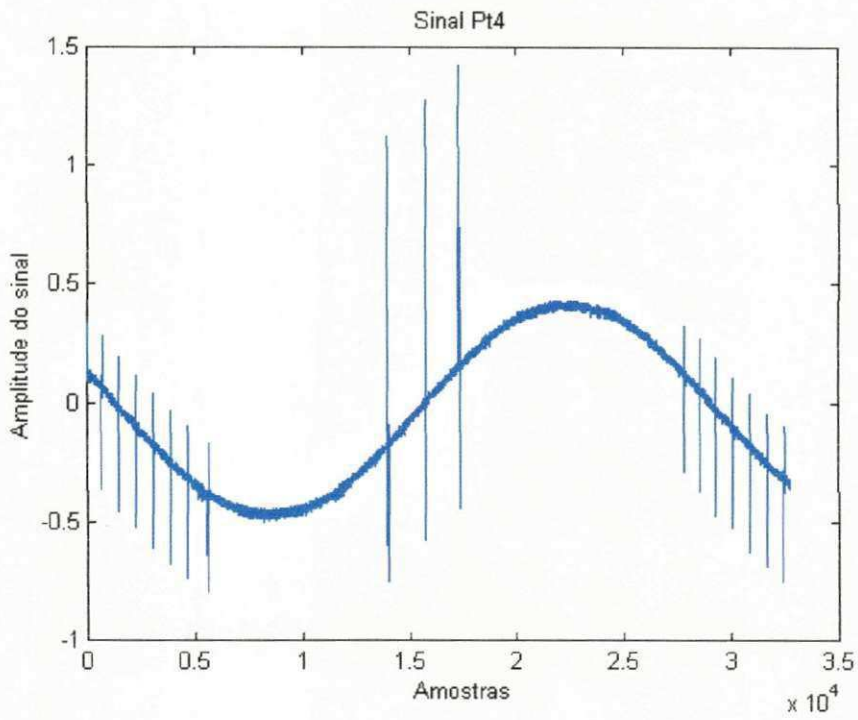


Figura 4.8 - Sinal Pt4 no domínio do tempo.

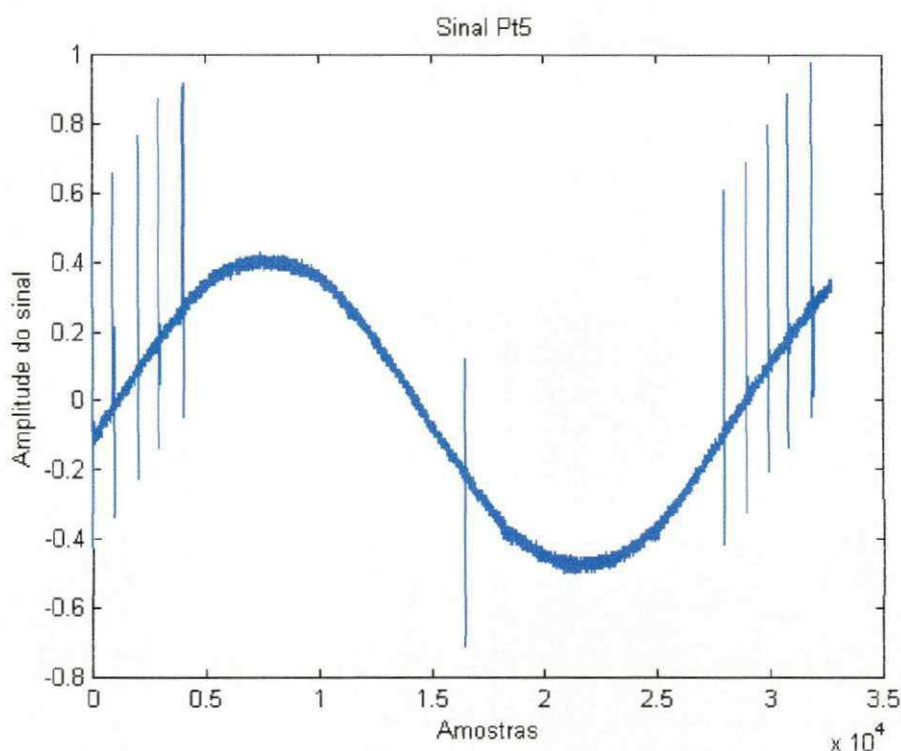


Figura 4.9 - Sinal Pt5 no domínio do tempo.

Nas Figuras 4.4 a 4.9 e na Tabela 4.1, mostra-se que a ocorrência e o nível de descargas parciais diminuem no decorrer do tempo. Após 1 hora, a taxa de redução de descargas parciais é reduzida. Pode-se constatar que apesar da semelhança entre os gráficos dos sinais Pt4 e Pt5, na Tabela 4.1, mostra-se que o nível de descargas parciais medidos em picocoulomb no sinal Pt4 é igual à metade do medido no sinal Pt5. As descargas parciais geram como subproduto moléculas de  $O_3$ , que são menos susceptíveis a ionização, ou seja, a região onde as descargas parciais ocorrem, com o passar do tempo, se tornam menos ionizáveis e a intensidade e ocorrência das próprias descargas diminuem

O sinal Pt1 apresenta o maior nível de ruído, sendo selecionado para sofrer o processamento para redução de ruído. O *hard thresholding* foi a técnica utilizada. O valor do nível de *thresholding* foi 0,2. Foi escolhido para suprimir as menores saliências da representação Z do sinal. Nas Figuras 4.10 e 4.11, mostra-se a representação Z do sinal Pt1 sem e com

processamento para redução de ruído, respectivamente. Após este processamento o sinal é chamado de dPt1. A Figura 4.12 compara os sinais original e processado.

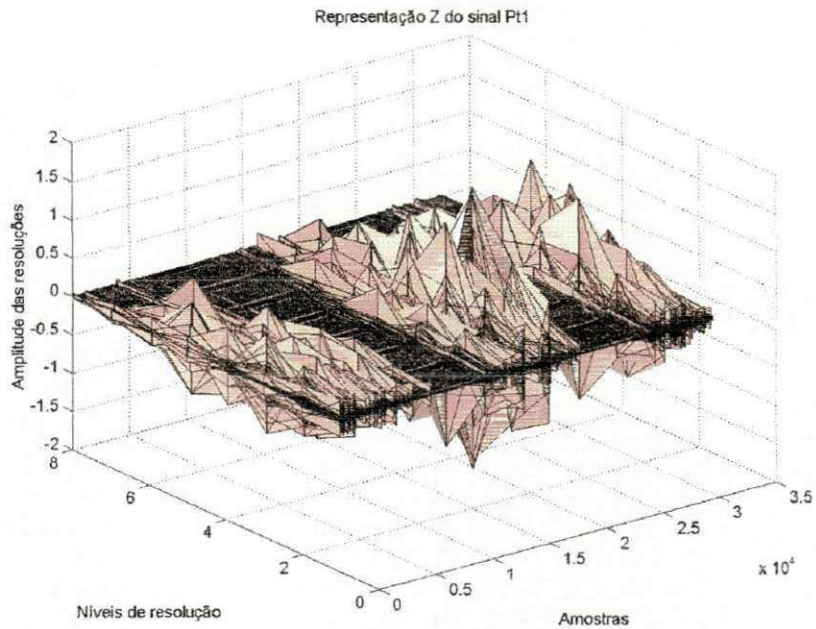


Figura 4.10 - Representação através do gráfico Z do sinal Pt1.

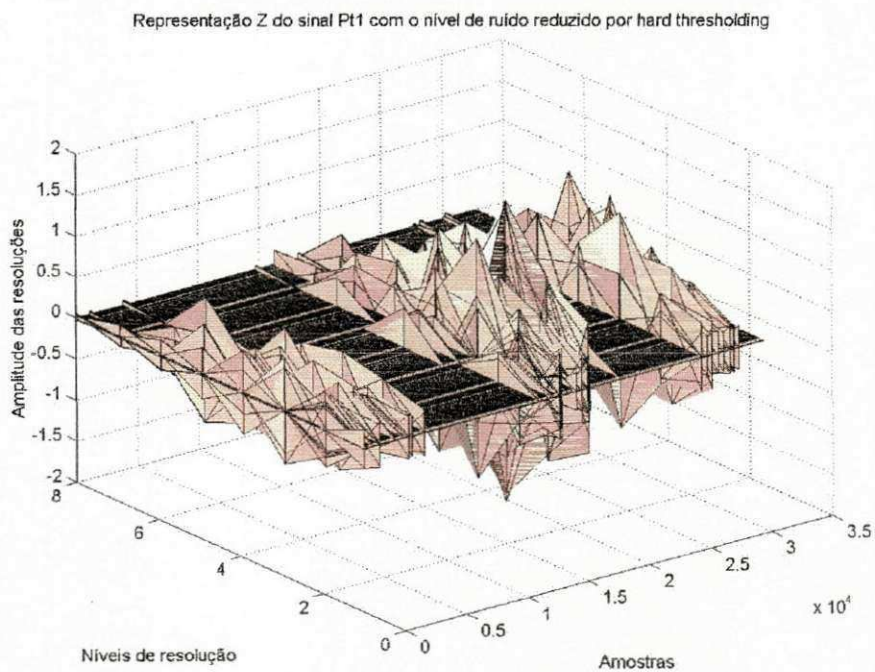


Figura 4.11 - Representação através do gráfico Z do sinal dPt1.



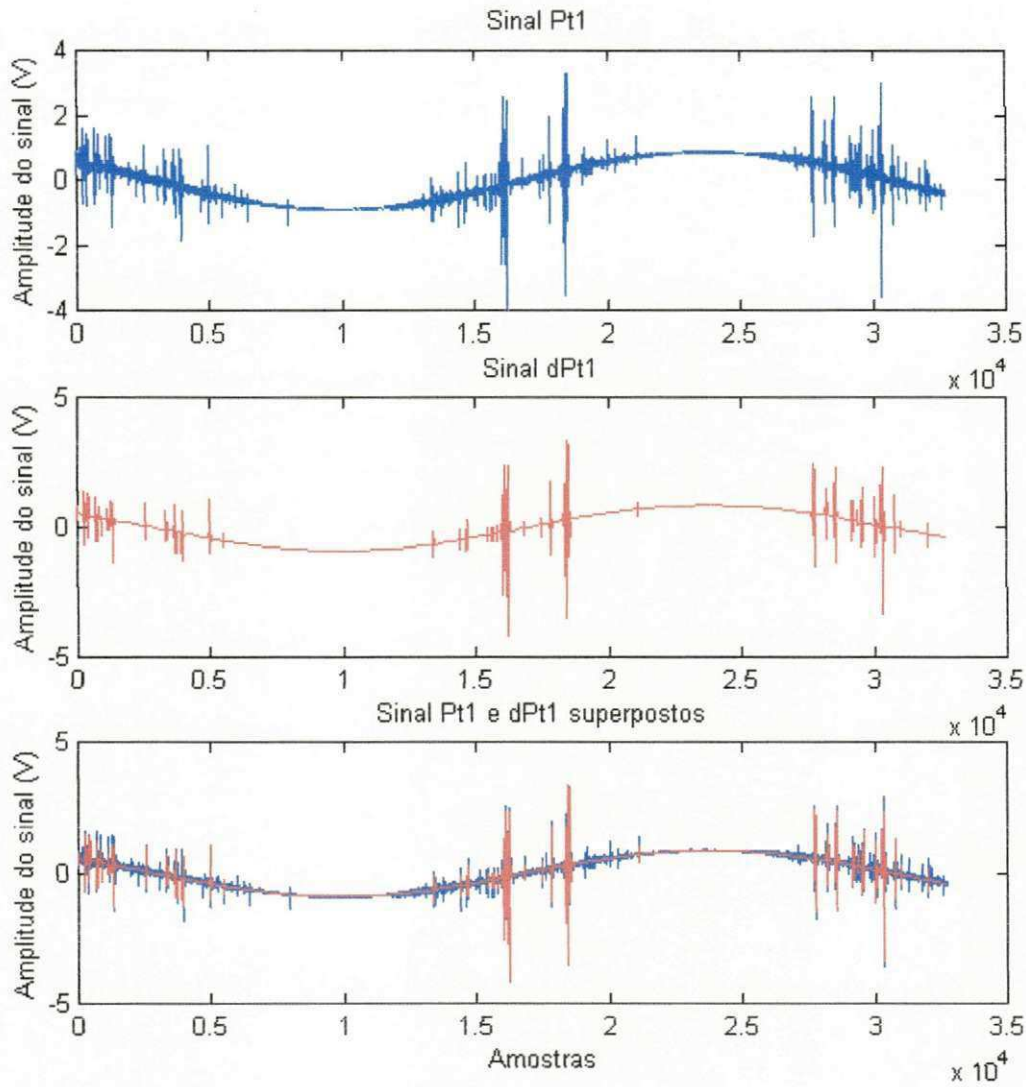


Figura 4.12 - Comparação entre o sinal original Pt1 e o sinal com o ruído reduzido dPt1.

Nas Figuras 4.10 e 4.11, mostra-se que as representações Z dos sinais Pt1 e dPt1 possuem formas semelhantes à forma da representação Z do sinal de corona C1. Ou seja, as resoluções 3 e 4 dos sinais Pt1 e Pt2 possuem amplitudes maiores a exemplo do que acontece com o sinal de corona C1. Este fato pode indicar que existe a presença de corona no sinal Pt1 e que ela não foi eliminada em dPt1.

A representação de Pt1 e dPt1 no domínio do tempo são muito semelhantes, e a diferença entre as amplitudes dos sinais, no domínio do tempo, torna-se mais observável

quando os gráficos são superpostos. Como o formato das representações Z dos sinais Pt1 e dPt1 também são muito semelhantes, a caracterização por esse tipo de representação não ajudou de maneira significativa à diferenciação entre o sinal original e o sinal com o ruído reduzido.

Um segundo tipo de ensaio, utilizando a configuração 2, foi realizado tendo como variável a tensão aplicada na amostra. Os arquivos contêm 16 K amostras, com intervalo de amostragem de 2  $\mu$ s. Um pouco mais de dois ciclos do sinal foram amostrados. A Tabela 4.2 mostra os valores das tensões aplicadas na amostra e os níveis de descargas parciais medidos no detector, para cada sinal amostrado.

Tabela 4.2 - Resumo dos ensaios da configuração 2 – Nível de tensão como variável

<b>Nome do arquivo</b>	<b>Tensão eficaz aplicada na amostra (kV)</b>	<b>Nível de descargas parciais (pC)</b>
Poli1	5,1	100
Poli2	8,1	500
Poli3	15,3	750

Na Figura 4.13, mostram-se os sinais referentes ao segundo ensaio da configuração 2. Quando o nível de tensão aumenta, as amplitudes das descargas crescem. Este crescimento é acompanhado pelo aumento do nível de picocoulombs registrado no detector de descargas parciais, como mostrado na Tabela 4.2.

A representação Z dos sinais Poli 1 e Poli 3 são mostradas nas Figuras 4.14 e 4.15. Elas apresentam saliências que se assemelham às apresentadas pela representação Z do sinal de corona C2. Ou seja, nestas saliências as amplitudes das resoluções decrescem quando as resoluções diminuem (ou os níveis de resolução aumentam). Novamente, as saliências podem indicar a presença de corona nos sinais detectados.

O sinal Poli 3 foi escolhido para sofrer o processo de redução de ruído, pois apresentou o maior nível de descargas parciais registrado pelo detector. A redução de ruído foi realizada através do *hard-thresholding*. Como resultado da redução de ruído do sinal Poli 3, na Figura 4.16, mostra-se o sinal dPoli 3. A representação Z deste resultado é visualizada através da Figura 4.17. Pode-se observar que no processo de redução de ruído, a retirada das pequenas saliências da representação Z do sinal Poli 3 é suficiente para que o sinal dPoli3 apresente distorções no domínio do tempo.

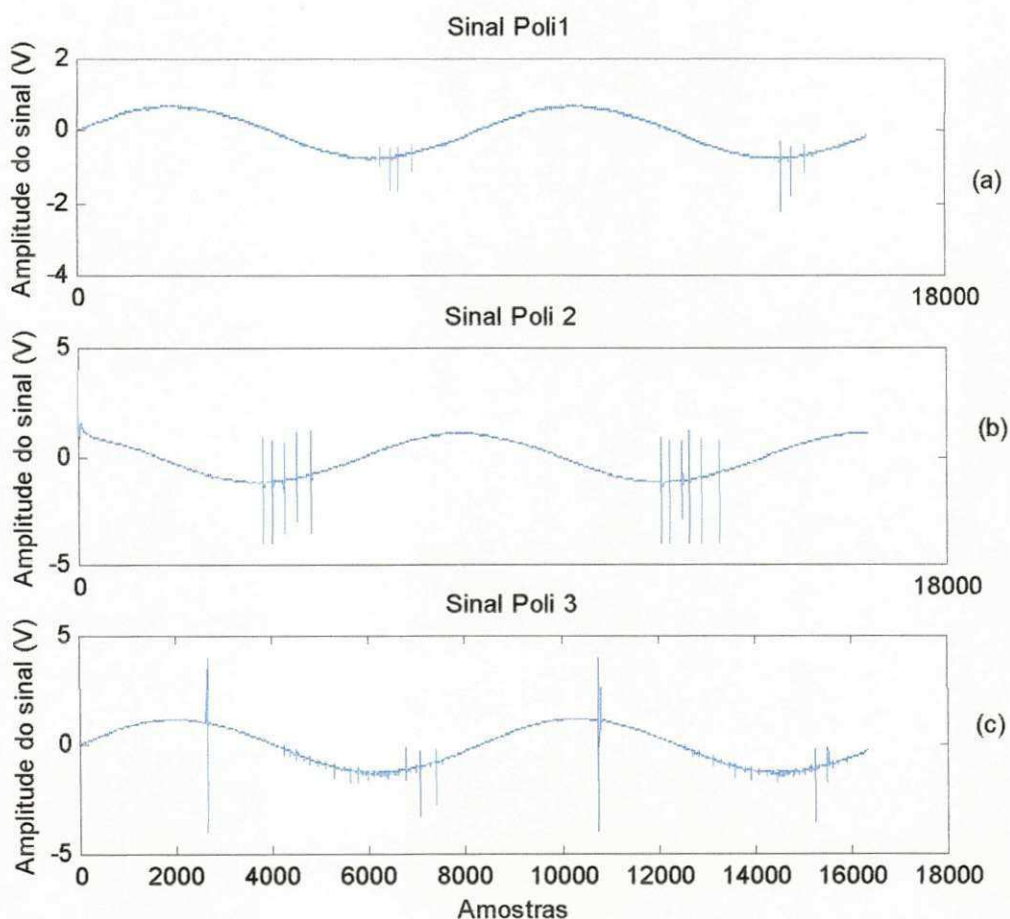


Figura 4.13 - (a) Sinal Poli 1, (b) Poli 2 e (c) Poli 3 no domínio do tempo.

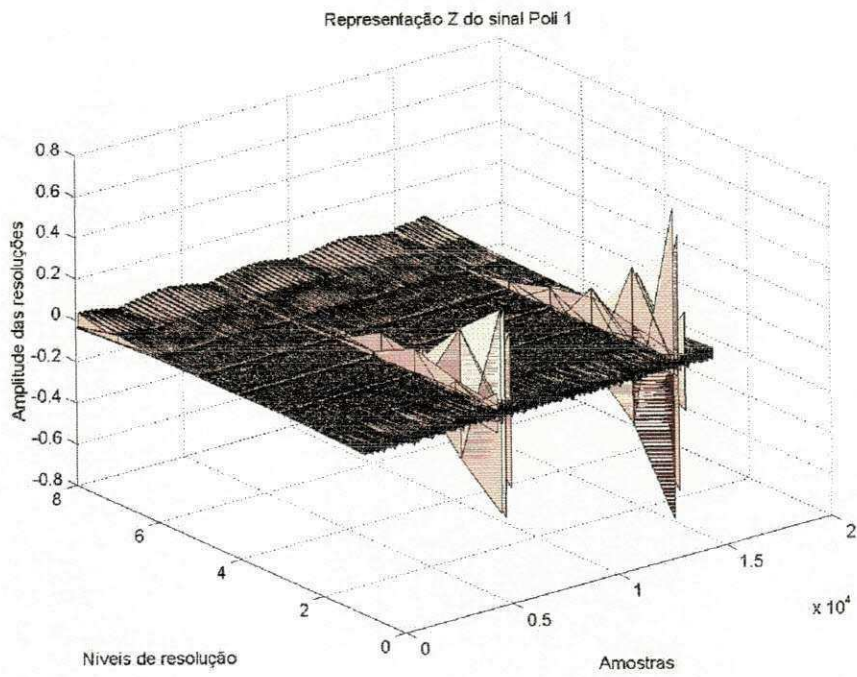


Figura 4.14 - Representação Z do sinal Poli 1.

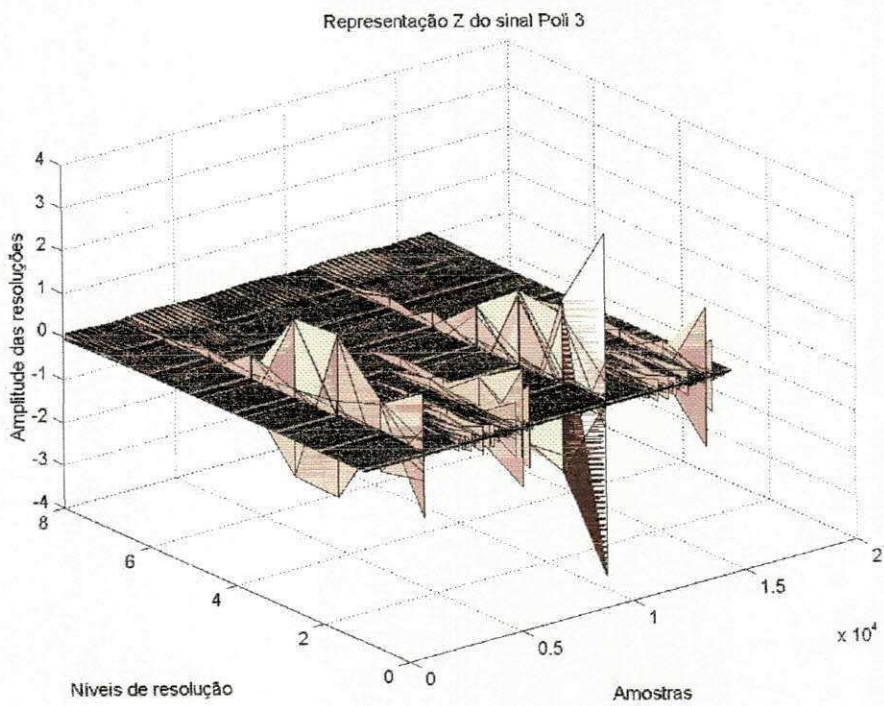


Figura 4.15 - Representação Z do sinal Poli 3.

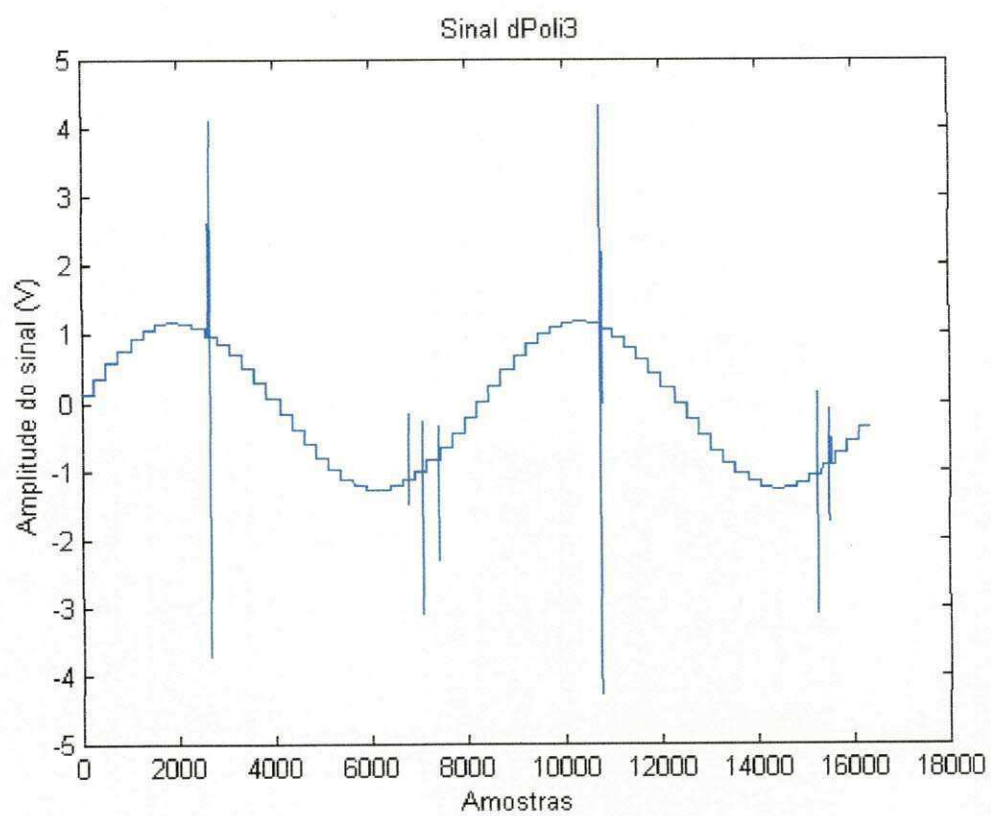


Figura 4.16 - Sinal dPoli3 no domínio do tempo.

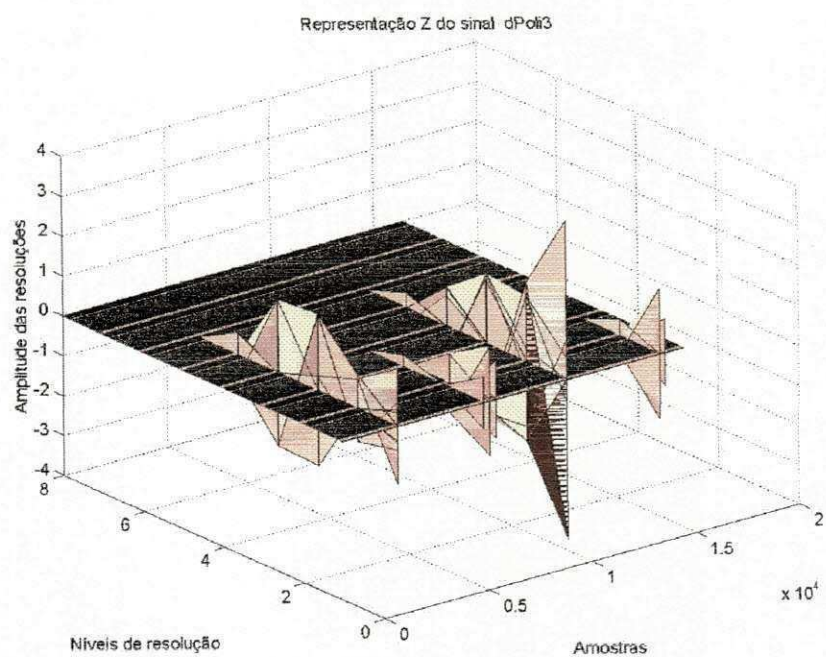


Figura 4.17 - Representação Z do sinal dPoli3.

#### 4.4 – Configuração 3

A configuração 3 foi idealizada para se estudar o comportamento das descargas parciais, tendo como variável o nível da tensão de aplicação no objeto de ensaio. A configuração 3 é descrita no item 3.2 do Capítulo III.

Os arquivos registrados na configuração 3 contêm 32 K amostras, com intervalo de amostragem de valor 600 ns. Na Tabela 4.3, mostram-se os níveis de tensão utilizados e o nível de descargas parciais medido no detector.

Tabela 4.3 - Resumo dos ensaios da configuração 3 – Nível de tensão como variável.

<b>Nome do arquivo</b>	<b>Tensão eficaz aplicada (kV)</b>	<b>Nível de descargas parciais (pC)</b>
Epox1	9,5	50
Epox2	10,6	60
Epox3	13,2	100
Epox4	16,5	150-300

Nas Figuras 4.18 e 4.19, mostram-se, respectivamente, os gráficos dos sinais Epox1 e Epox2. As representações Z associadas são mostradas nas Figuras 4.20 e 4.21. O sinal Epox4 foi escolhido para sofrer o processo de redução de ruído. O sinal resultante do processamento, mostrado na Figura 4.22, é chamado de dEpox4. Nota-se que o processamento de redução de ruídos apenas suprimiu os valores de amplitude de resolução abaixo de um determinado valor. A representação Z do sinal com o ruído suprimido é mostrada na Figura 4.23.

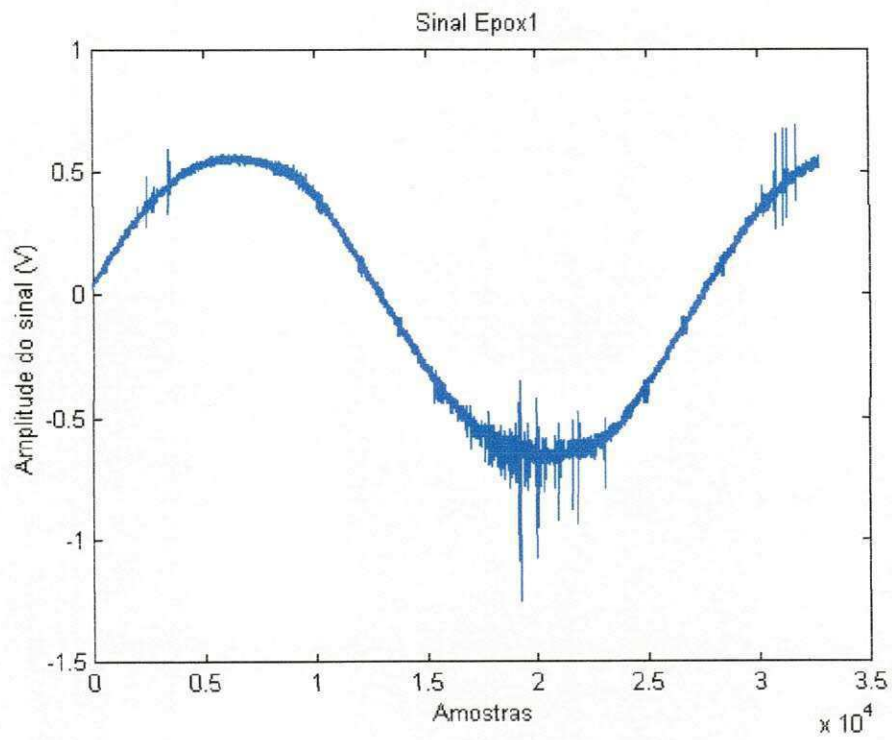


Figura 4.18 - Sinal Epox 1 no domínio do tempo.

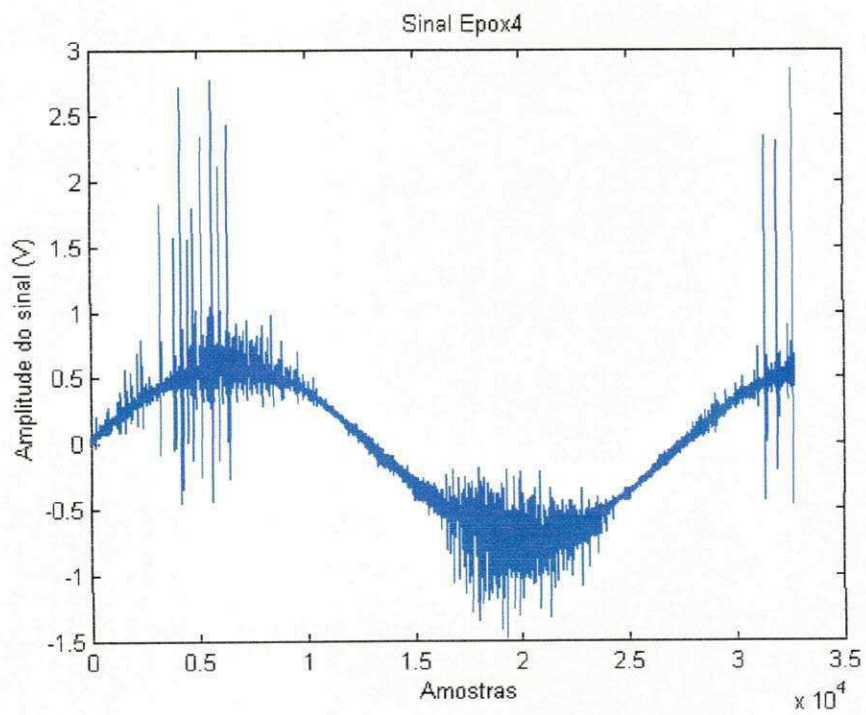


Figura 4.19 - Sinal Epox 4 no domínio do tempo.

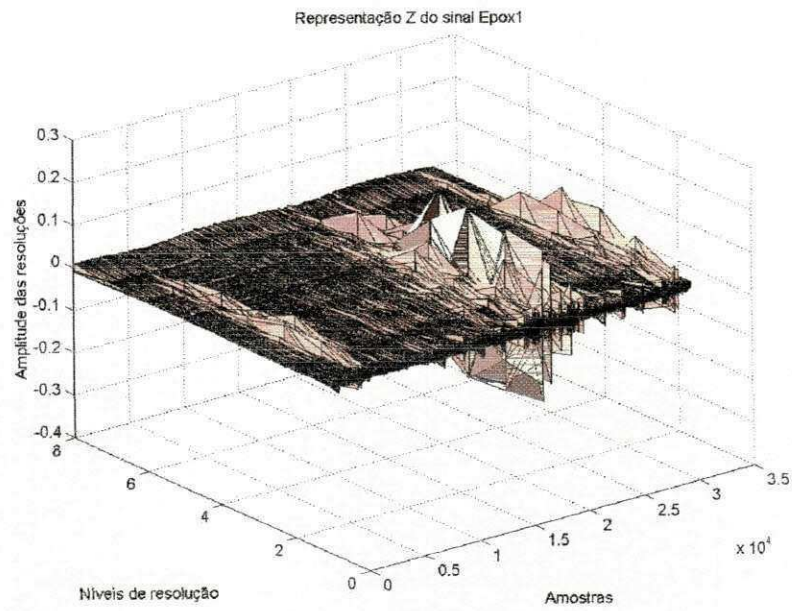


Figura 4.20 - Representação Z do sinal Epox 1.

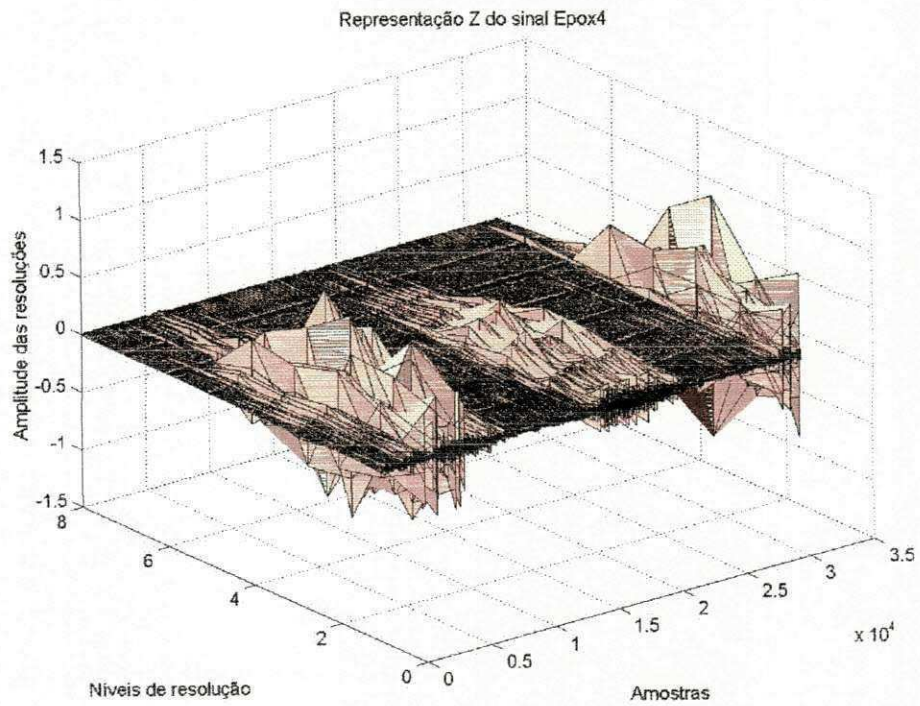


Figura 4.21 - Representação Z do sinal Epox 4



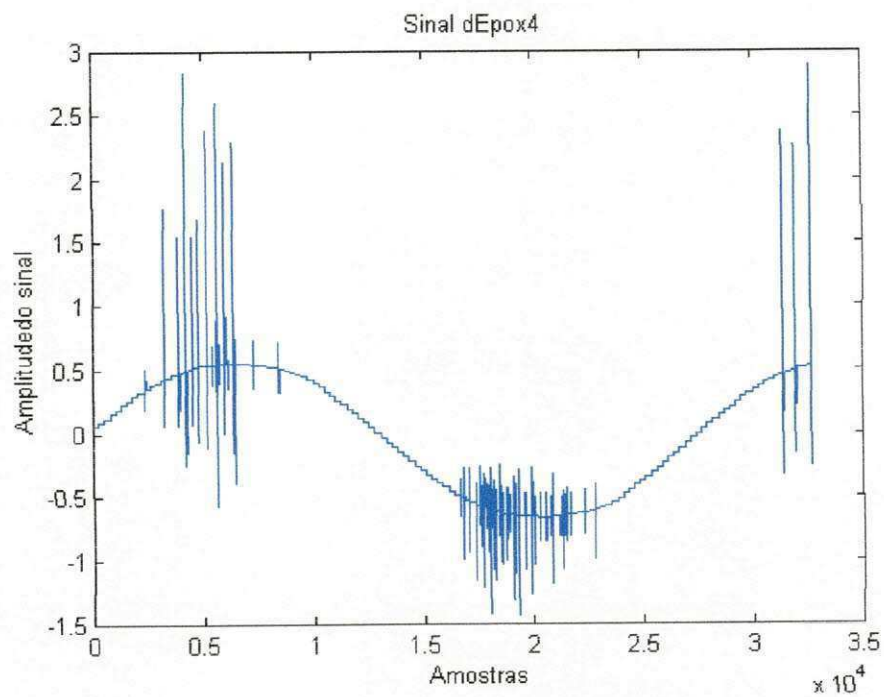


Figura 4.22 - Sinal dEpoX4 no domínio do tempo.

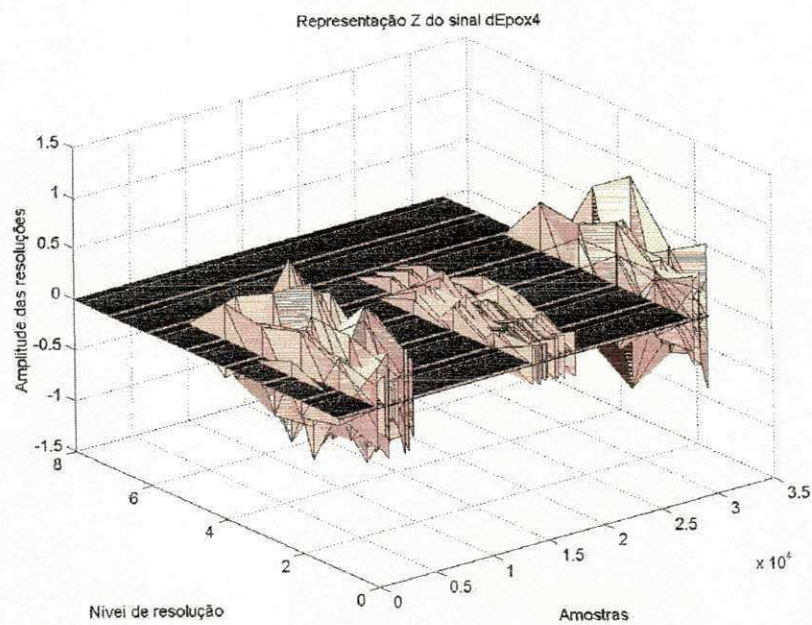


Figura 4.23 - Representação Z do sinal dEpoX4.

Na Tabela 4.3 e nas Figuras 4.18 e 4.19, mostra-se de forma clara que o nível da intensidade das descargas parciais e o nível de ocorrência é função da tensão aplicada.

As representações Z do sinal Epox1 e do sinal Epox4 apresentam três saliências principais. A representação Z do sinal Epox 4 possui as amplitudes de resolução maiores comparadas com a representação Z do sinal Epox 1. Apesar disso, a faixa de resoluções onde os detalhes do sinal é representado praticamente não se altera.

#### 4.5 - Configuração 4

A configuração 4 foi idealizada para se estudar o comportamento das descargas parciais, tendo como variável a localização da cavidade para gerar descargas parciais. A configuração 4 é descrita no item 3.2 do Capítulo III.

Os arquivos referentes à configuração 4 contêm 32 K amostras, com intervalo de amostragem de valor 600 ns. Na Tabela 4.4, mostra-se o nível de descargas parciais em função da localização (posição) da cavidade.

Tabela 4.4 - Resumo dos ensaios dos discos de acrílico.

Nome do arquivo	Localização da cavidade	Nível de descargas parciais (pC)
Acri 1	No disco do lado da alta tensão	250
Acri 2	No disco do meio	300
Acri 3	No disco do lado do potencial terra	300

Os gráficos dos sinais referentes à Tabela 4.4 são mostrados nas Figuras 4.24 a 4.27. O sinal Acri 2 possui uma ocorrência maior de descargas parciais em relação aos outros dois sinais. A representação Z do sinal Acri 2 é mostrada na Figura 4.27. Nela, observa-se uma pequena saliência central, que pode ser ruído. A representação Z do sinal Acri 3 é mostrada na Figura

4.28. Observa-se que a saliência central é menor que a saliência observada na representação Z do sinal Acri 2.

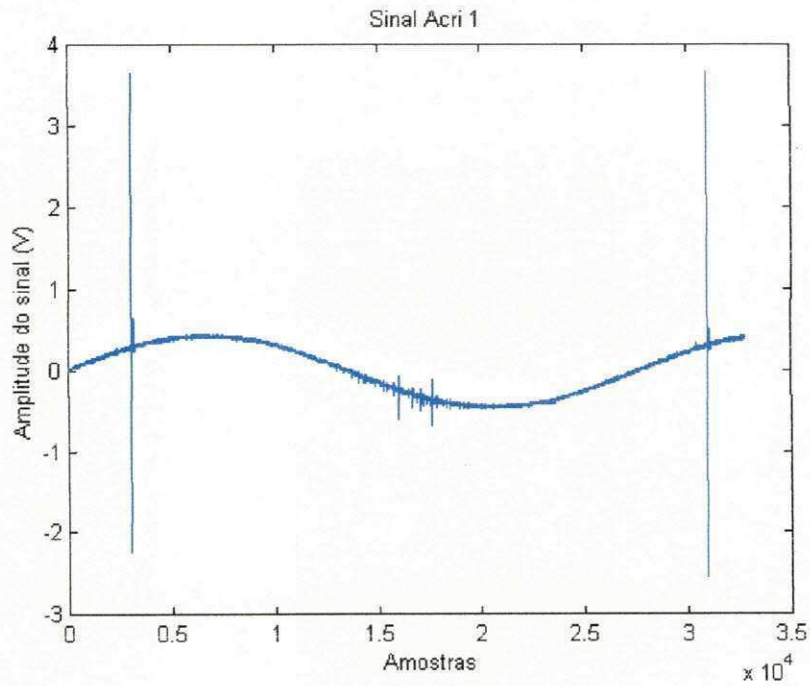


Figura 4.24 - Sinal Acri 1 no domínio do tempo.

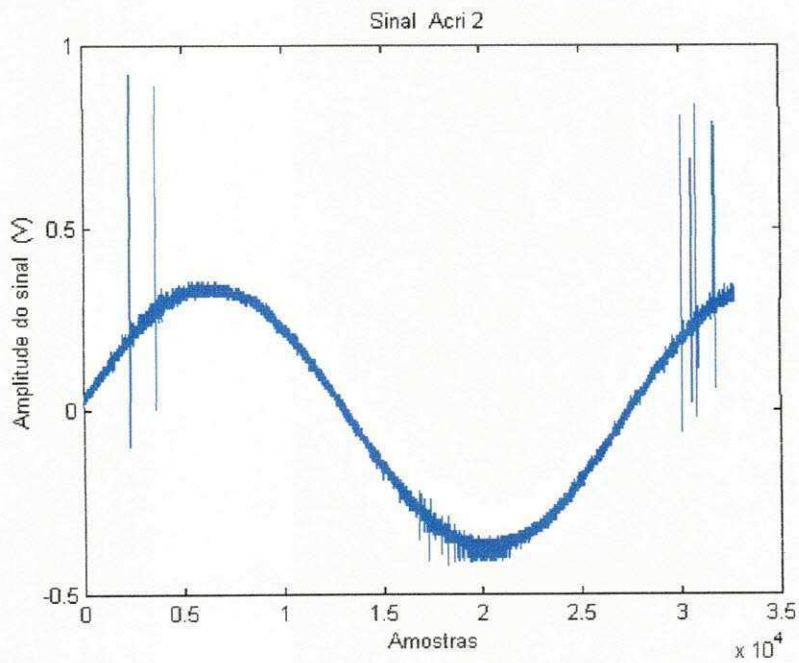


Figura 4.25 - Sinal Acri 2 no domínio do tempo.

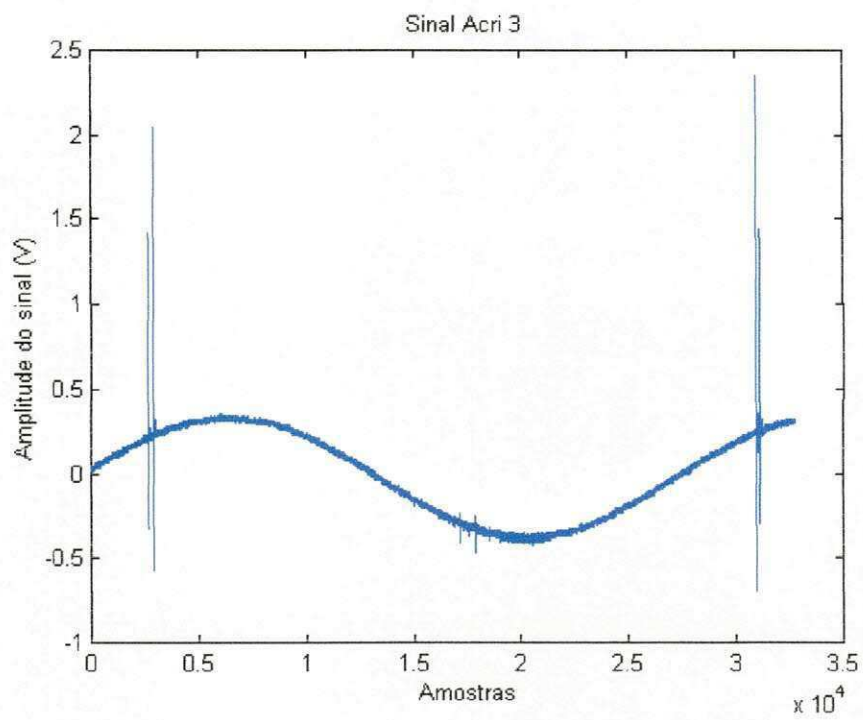


Figura 4.26 - Sinal Acri 3 no domínio do tempo.

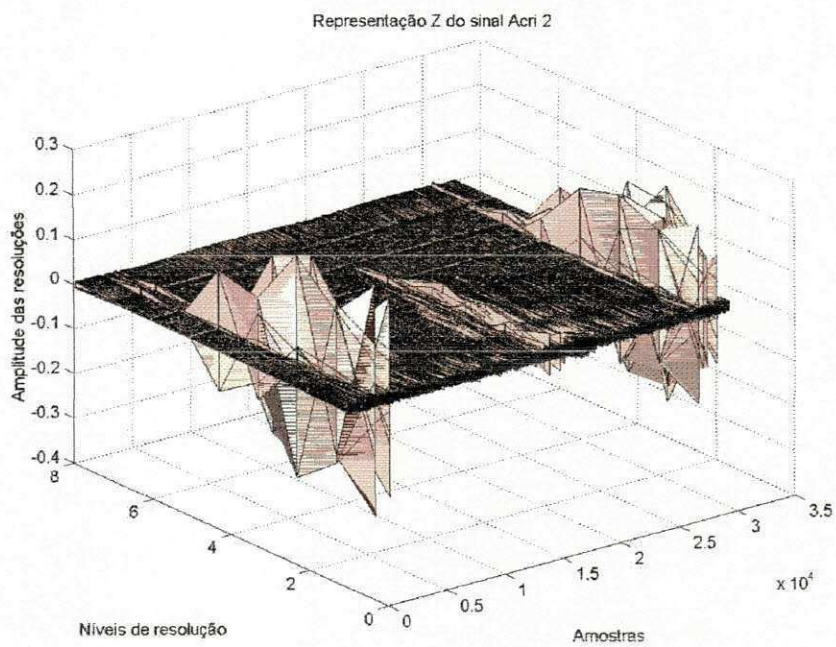


Figura 4.27 - Representação Z do sinal Acri 2.

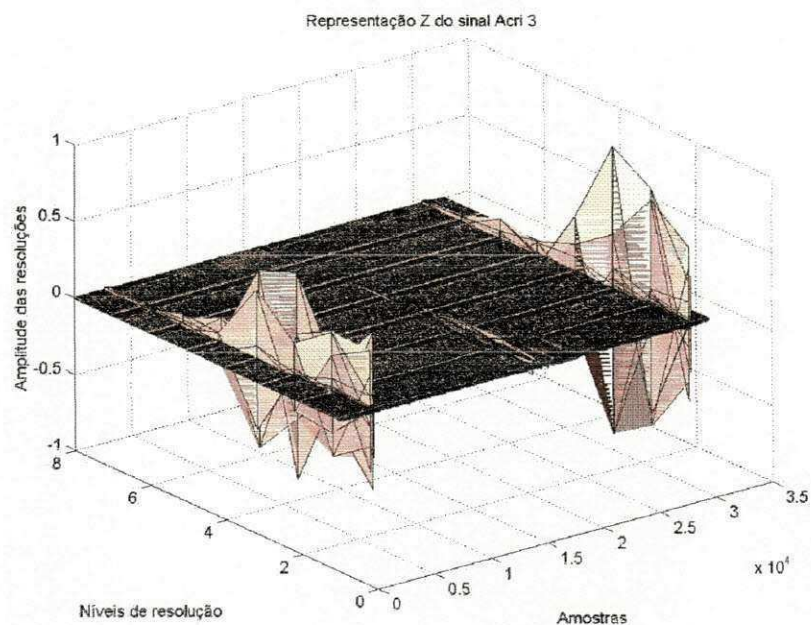


Figura 4.28 - Representação do Z do sinal Acrí 3.

Nas Figuras 4.24, 4.25 e 4.26, mostra-se que o nível e a ocorrência de descargas parciais estão em função da localização da cavidade. Quando a cavidade se encontra em contato com os eletrodos, o nível e frequência de ocorrência de descargas parciais são maiores, porque a emissão de cargas é facilitada pelo próprio eletrodo. A cavidade circunscrita em material isolante apresenta menor nível e frequência de ocorrência de descargas parciais devido à dificuldade da retirada de cargas.

#### 4.6 – Configuração 5

A configuração 5 foi idealizada para se estudar o comportamento das descargas parciais em um transformador de corrente, tendo como variável a tensão aplicada ao transformador de corrente. A configuração 5 é descrita no item 3.2 do Capítulo III.

Os arquivos referentes à configuração 5 contêm 32 K amostras, com intervalo de amostragem de valor 600 ns. Na Tabela 4.5, mostra-se o resumo dos ensaios do transformador de corrente. A segunda coluna da Tabela 4.5 apresenta o tempo indicado para medição do nível de descargas parciais, especificado pela concessionária. Os níveis de descargas parciais descritos

na terceira coluna da tabela não ultrapassam 20 pC, estando abaixo dos níveis especificados para o equipamento construído em resina epóxi. Com os valores apresentados no ensaio de descargas parciais, o transformador de corrente possui condições favoráveis de ser instalado no campo.

Todos os gráficos dos sinais, oriundos do transformador de corrente, apresentaram pouca ocorrência de descargas parciais. Na Figura 4.29, mostra-se o sinal TC168.2, no domínio do tempo. Na Figura 4.30, mostra-se a sua respectiva representação Z.

Tabela 4.5 - Resumo dos ensaios para o transformador de corrente

<b>Nome do arquivo</b>	<b>Tensão eficaz (kV)</b>	<b>Tempo (min.)</b>	<b>D.Parciais (pC)</b>
TC35	35	0	∠ 15
TC140.1	140	0	∠ 20
TC140.2	140	2	∠ 20
TC154.1	154	0	∠ 20
TC154.2	154	2	∠ 20
TC168.1	168	0	∠ 20
TC168.2	168	2	∠ 20
TC168.3	168	4	∠ 20
TC168.4	168	6	∠ 20
TC168.5	168	8	∠ 20
TC168.6	168	10	∠ 20

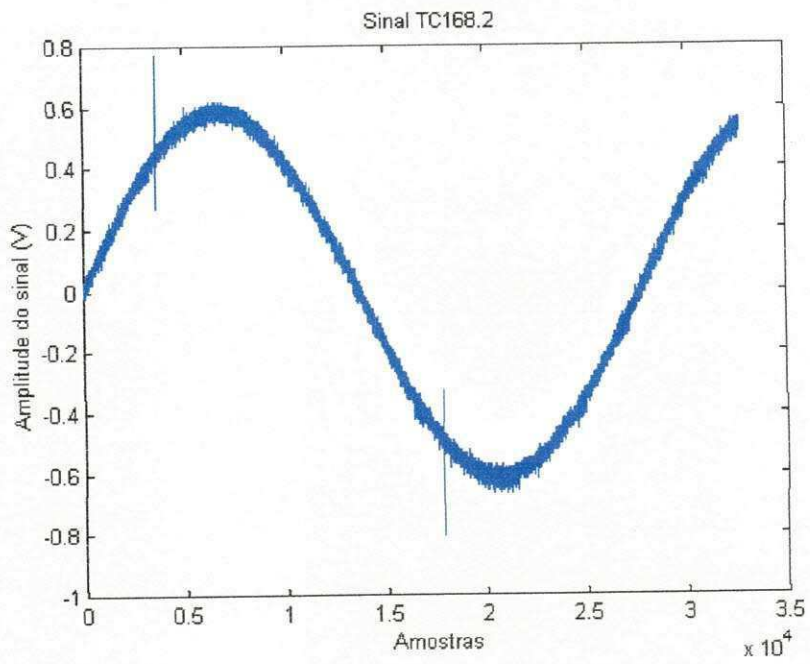


Figura 4.29 - Sinal TC168.2 no domínio do tempo.

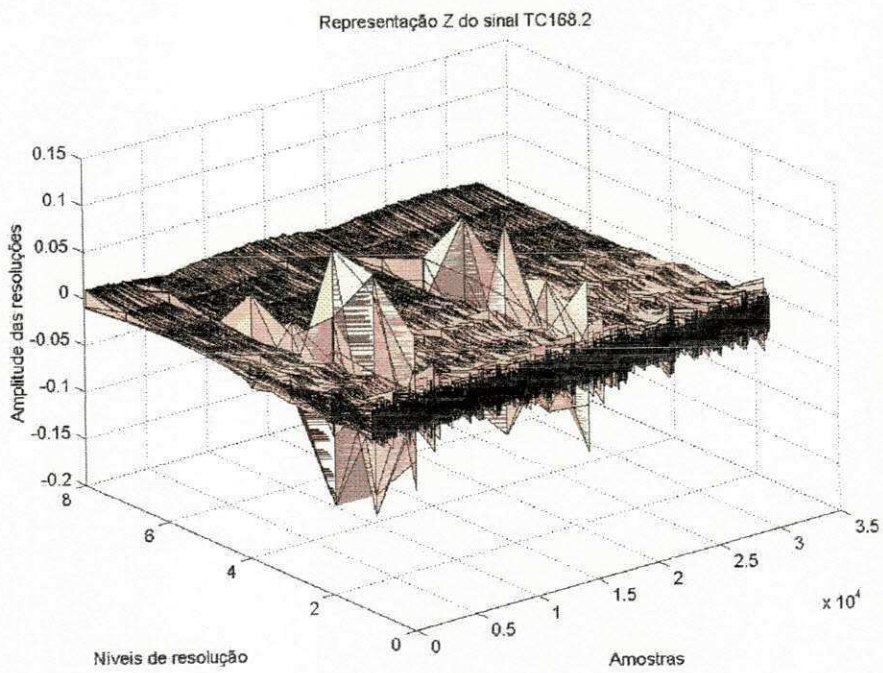


Figura 4.30 - Representação Z do sinal TC168.2

## 4.7- Simulação

O processamento e análise dos sinais de descargas parciais foram parcialmente prejudicados pela estreita banda de passagem do detector (16 – 180 kHz). Nas Figuras 4.31 e 4.32, mostra-se que os pulsos de corona C1 e de descargas parciais em Pt3 são praticamente idênticos. Conseqüentemente, no processo de redução de ruídos do sinal captado, pulsos originários de descargas parciais podem ter sido suprimidos. As figuras foram obtidas através de aproximações sucessivas dos sinais usando o recurso de *zoom* no tempo do MATLAB.

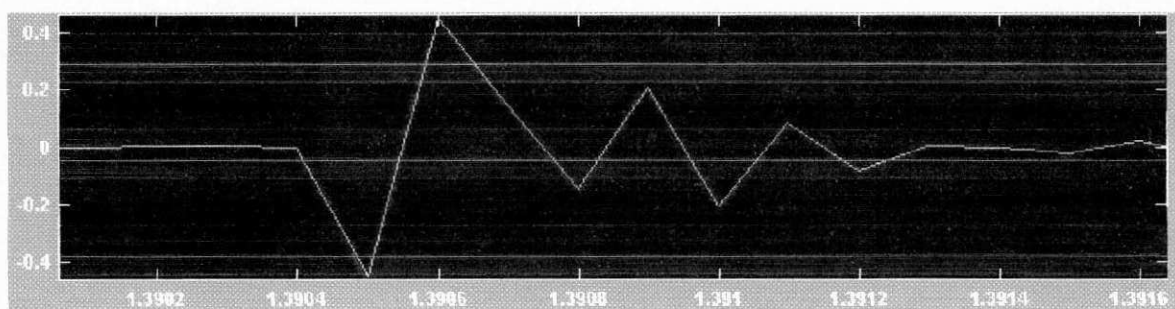


Figura 4.31 - Detalhe do pulso de corona C1.

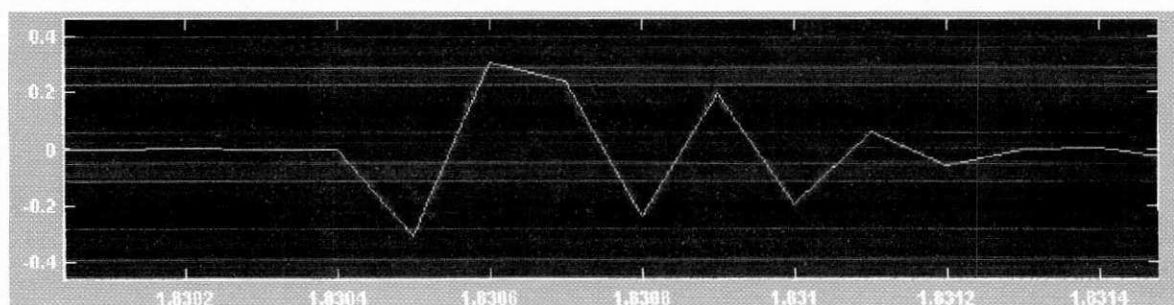


Figura 4.32 - Detalhe do pulso de descarga parcial.

Para superar as limitações impostas pelo equipamento às medições de descargas parciais, nessa seção, através de sinais simulados computacionalmente e utilizando-se o toolbox wavelet do programa MATLAB, mostra-se a maneira pela qual a decomposição wavelet pode auxiliar na caracterização dos sinais de descargas parciais e dos sinais de corona, além de mostrar como a técnica de redução de ruídos *thresholding* é eficiente quando os pulsos de ruído são de duração menor que os pulsos de descargas parciais.



Os pulsos de descargas parciais considerados possuem aproximadamente a forma mostrada na Figura 4.33 como investigado por OSVÁTH (1995). Ele também mostrou que os pulsos de corona são geralmente de maior duração, como é mostrado na Figura 4.34. Na Figura 4.35 pulsos de descargas parciais foram superpostos a uma senóide que se encontra em fase com a tensão aplicada ao objeto de ensaio.

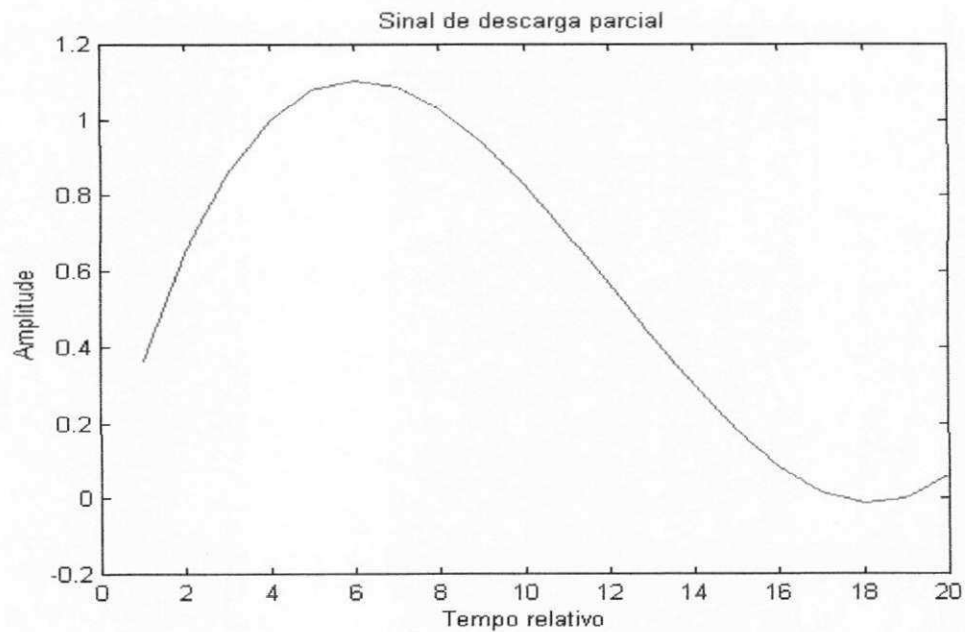


Figura 4.33 – Pulso de descarga parcial.

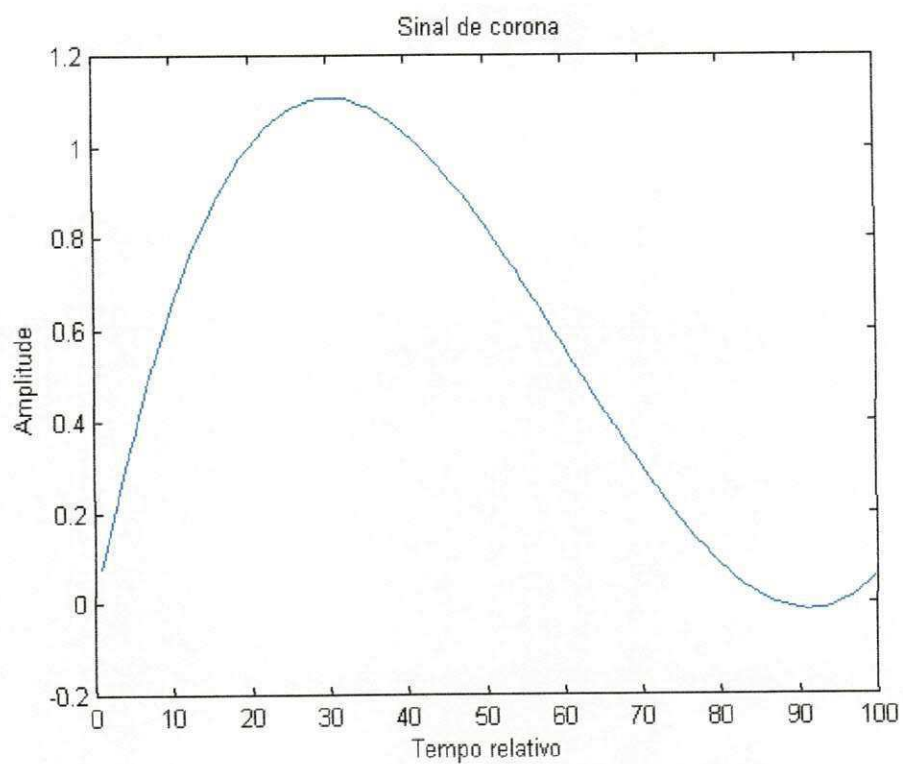


Figura 4.34 – Pulso de corona.

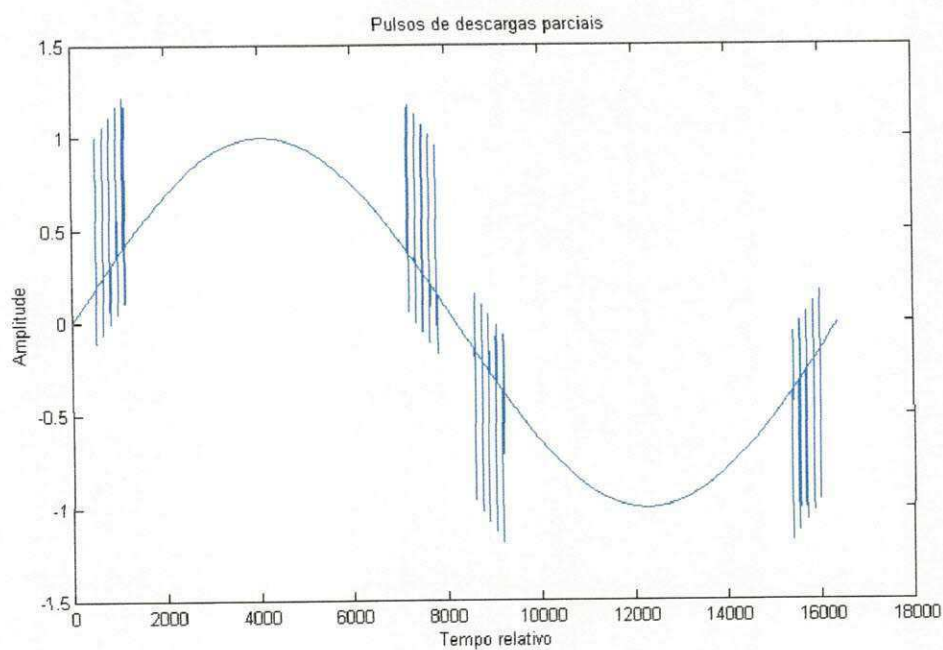


Figura 4.35 – Pulsos de descargas parciais superpostos a senoide de 60 Hz.

Na Figura 4.36 é mostrada a decomposição wavelet em 8 níveis para o sinal da Figura 4.35. A wavelet utilizada foi a *daubechies 4*. A decomposição serve como assinatura para os pulsos de descargas parciais.

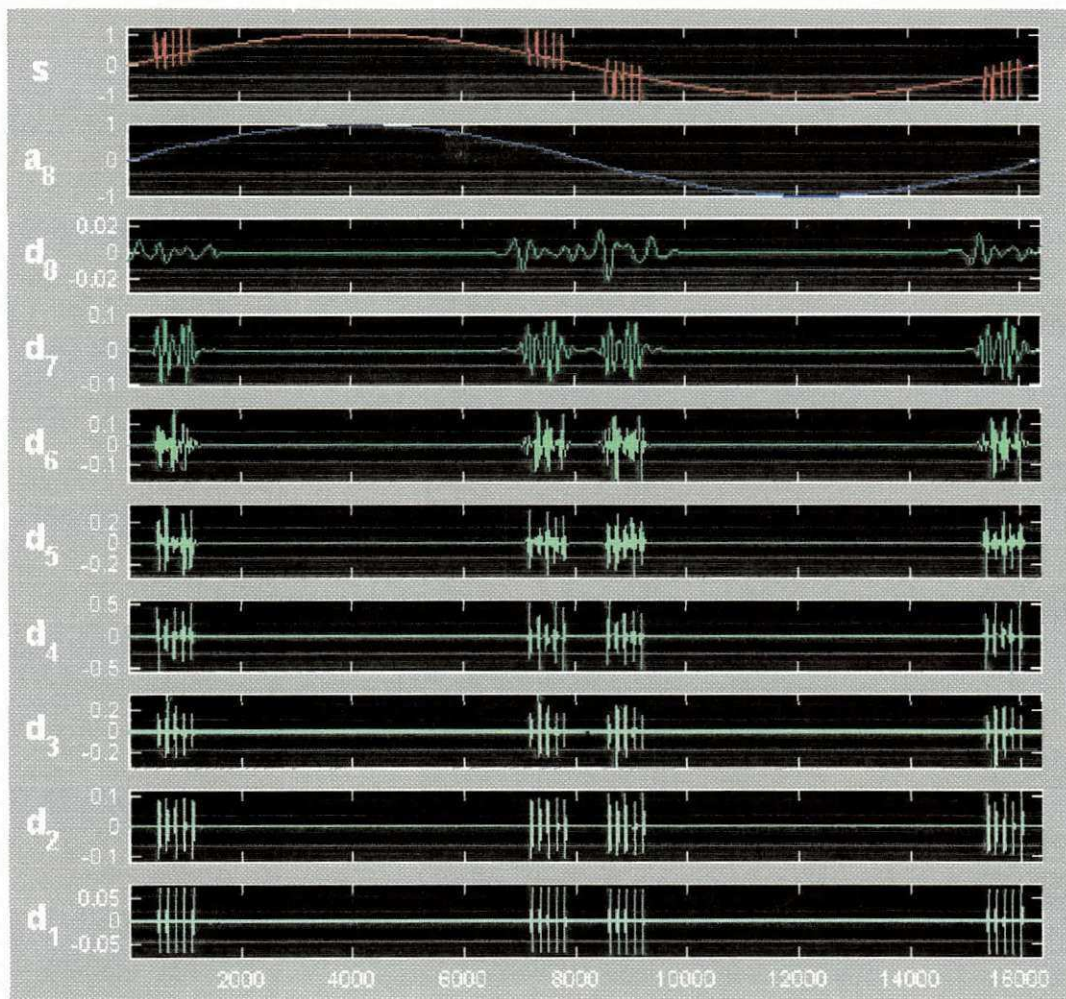


Figura 4.36 – Decomposição wavelet para os sinais de descargas parciais.

Na Figura 4.37 é mostrada a senoide de 60 Hz superposta por sinais de corona. Os sinais simulam o corona produzido por uma configuração típica com ponta na baixa tensão. Para esta configuração, o corona deve aparecer ou se localizar no pico positivo da tensão senoidal que se encontra em fase com a tensão aplicada ao objeto de teste.

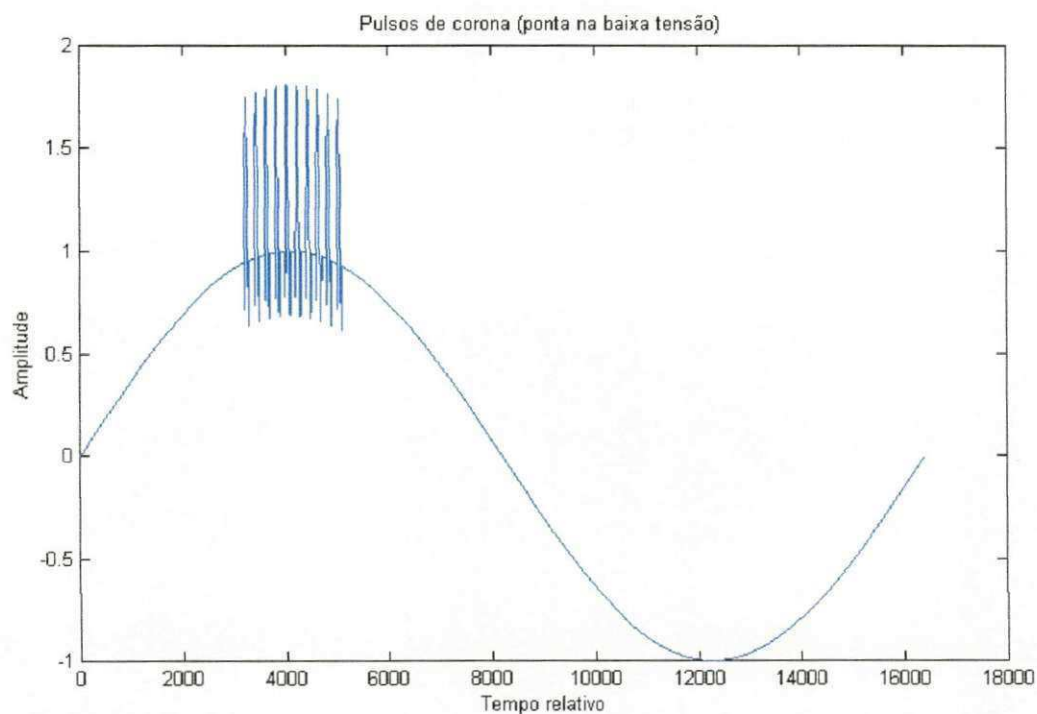


Figura 4.37 – Pulsos de corona (ponta na baixa tensão).

Na Figura 4.38 é mostrada decomposição wavelet em 8 níveis para o sinal da Figura 4.37. A wavelet utilizado foi a *daubechies 4*. A decomposição serve como assinatura para os pulsos de corona (ponta na baixa tensão). O sinal  $\mathbf{d}_1$  representa os detalhes de menor resolução do sinal  $\mathbf{s}$  decomposto, o sinal  $\mathbf{d}_8$  representa os detalhes de maior resolução e o sinal  $\mathbf{a}_8$  representa a aproximação do sinal decomposto na menor resolução

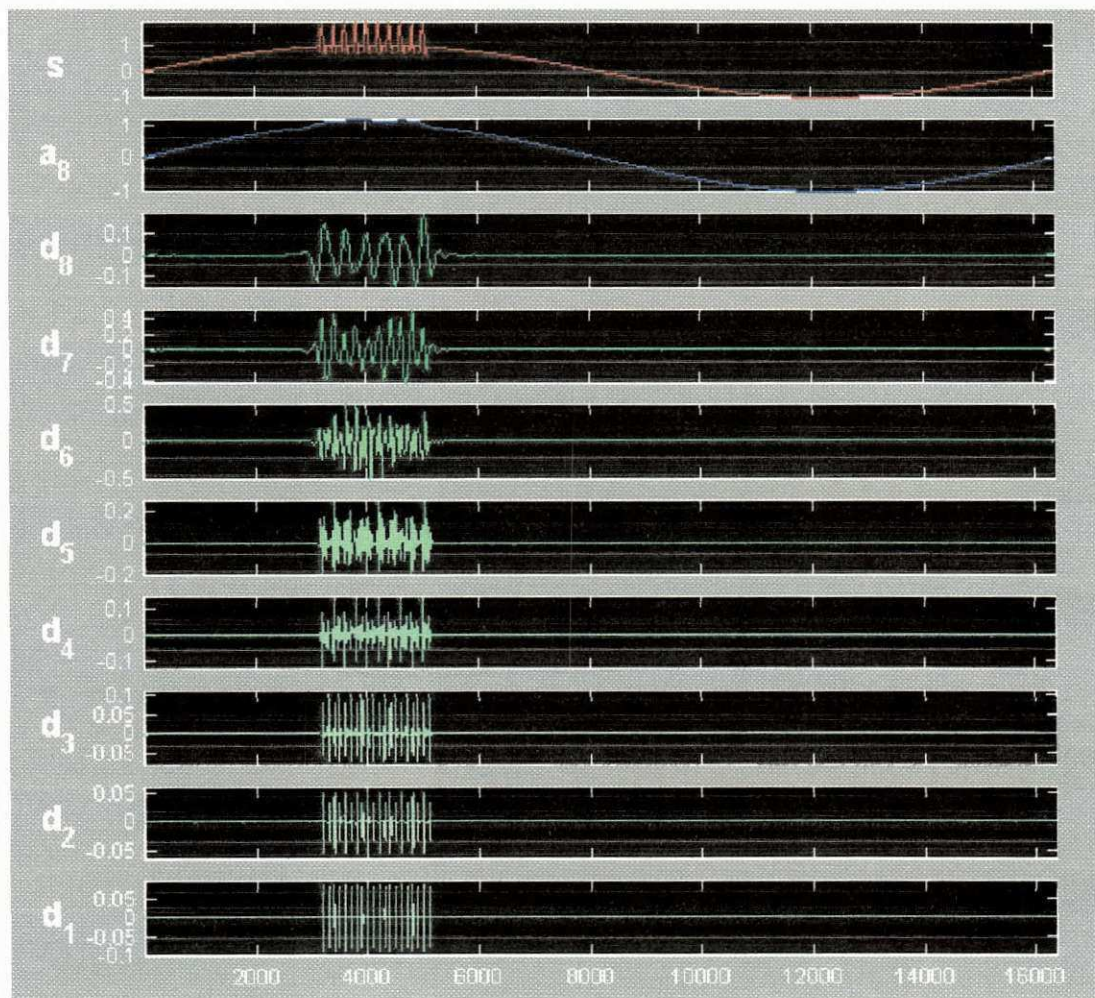


Figura 4.38 – Decomposição da wavelet para pulsos de corona (ponta na baixa tensão).

Na Figura 4.39 é mostrada a senoide de 60 Hz superposta por sinais de corona. Os sinais simulam o corona produzido por uma configuração típica com ponta na alta tensão. Para esta configuração, o corona deve aparecer ou se localizar no do pico negativo da tensão senoidal que se encontra em fase com a tensão aplicada ao objeto de teste.

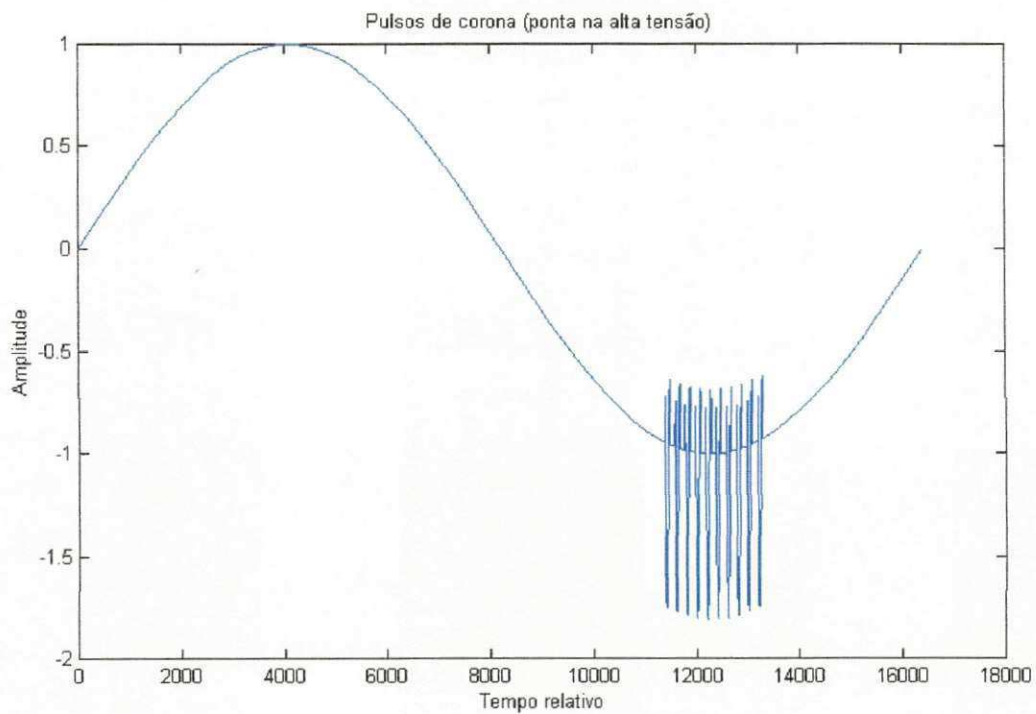


Figura 4.39 – Pulsos de corona (ponta na baixa tensão).

No gráfico da Figura 4.40 são mostrados os pulsos de descarga parcial e de corona (ponta na baixa tensão). Ambos os sinais estão superpostos a uma senoide que se encontra em fase com a tensão aplicada ao objeto de teste. Esta simulação representa uma ocorrência corriqueira nos ensaios de descargas parciais em laboratórios de alta tensão.

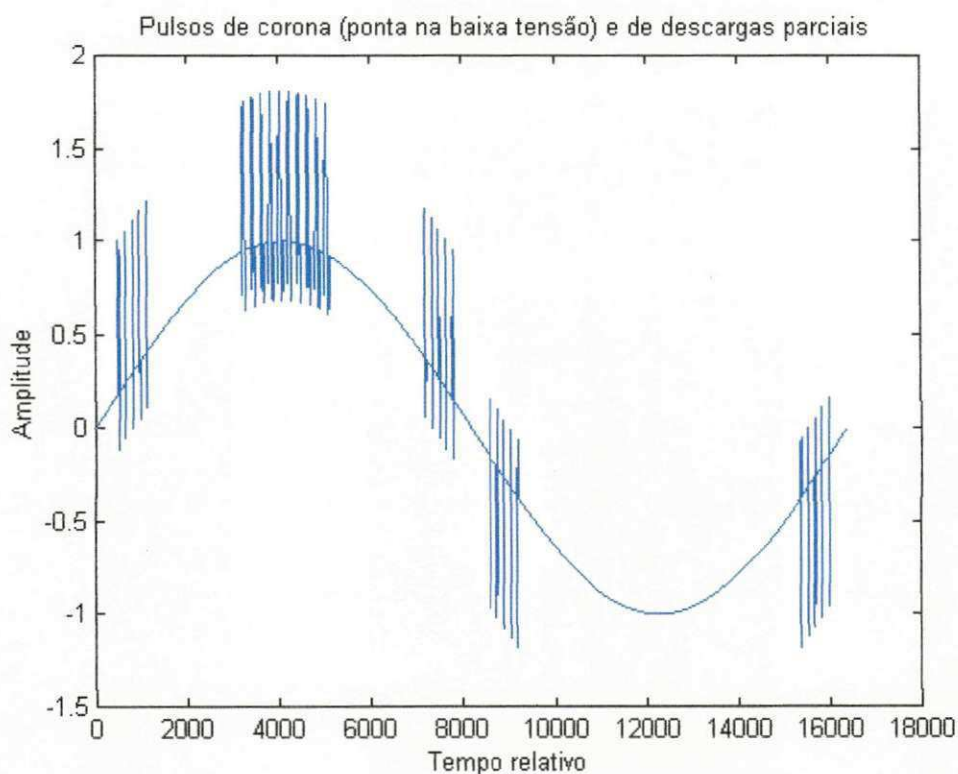


Figura 4.40 – Pulsos de descarga parcial e de corona superpostos a uma senoide.

Na Figura 4.41 é mostrada a decomposição wavelet do sinal da Figura 4.40 em 8 níveis de resolução. A wavelet *daubechies 4* foi utilizada para a decomposição. Na Figura 4.41, nota-se que a decomposição dos pulsos de corona nos maiores níveis de resolução possui amplitudes maiores do que a decomposição para os pulsos de descargas parciais. Essa é a maneira que a transformada wavelet auxilia a diferenciação dos pulsos de descargas parciais dos pulsos de corona. Na Figura 4.42 está representado o processo de redução da corona para o sinal da Figura 4.40. Na parte esquerda da figura, os valores dos *thresholding* para cada nível de resolução são visualizados. Na parte superior central, o gráfico em vermelho é o sinal original. O gráfico de cor amarela é o sinal após o processamento para a redução do corona.

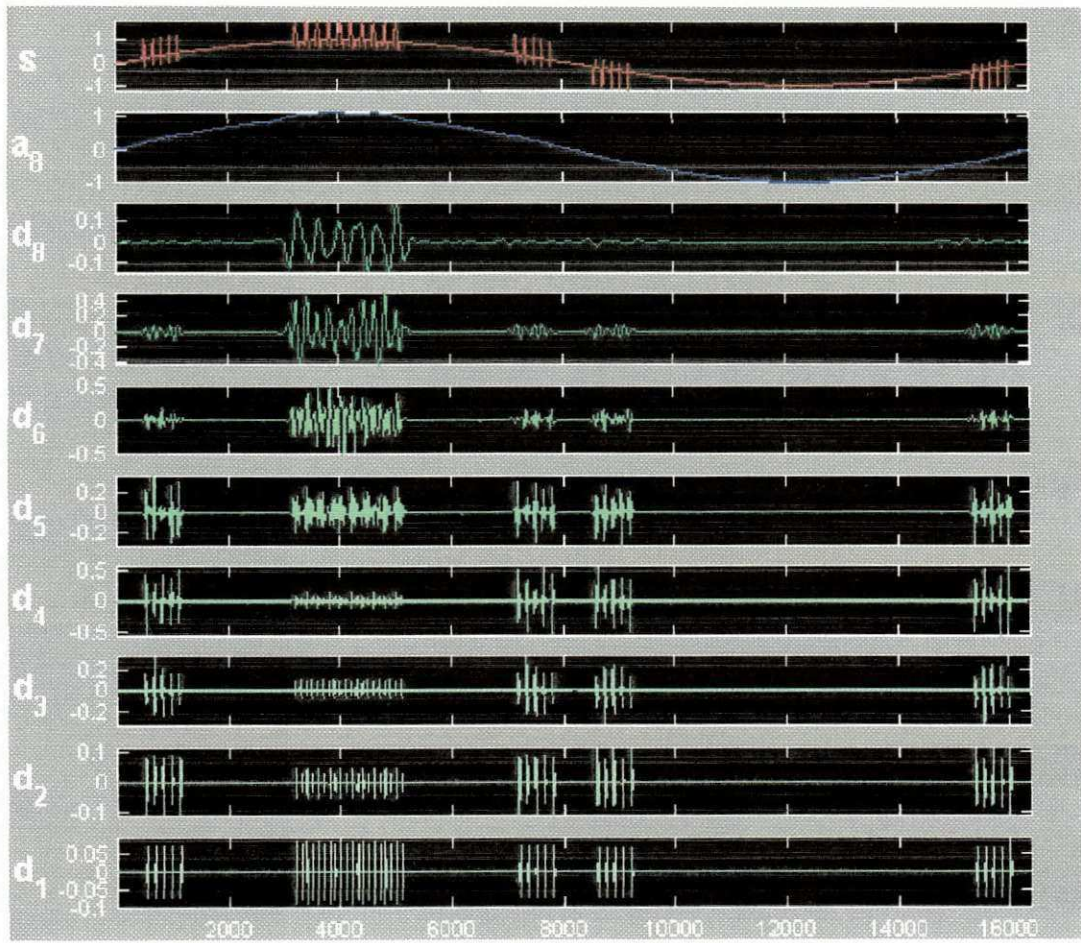


Figura 4.41 – Decomposição wavelet para pulsos de corona e de descargas parciais.



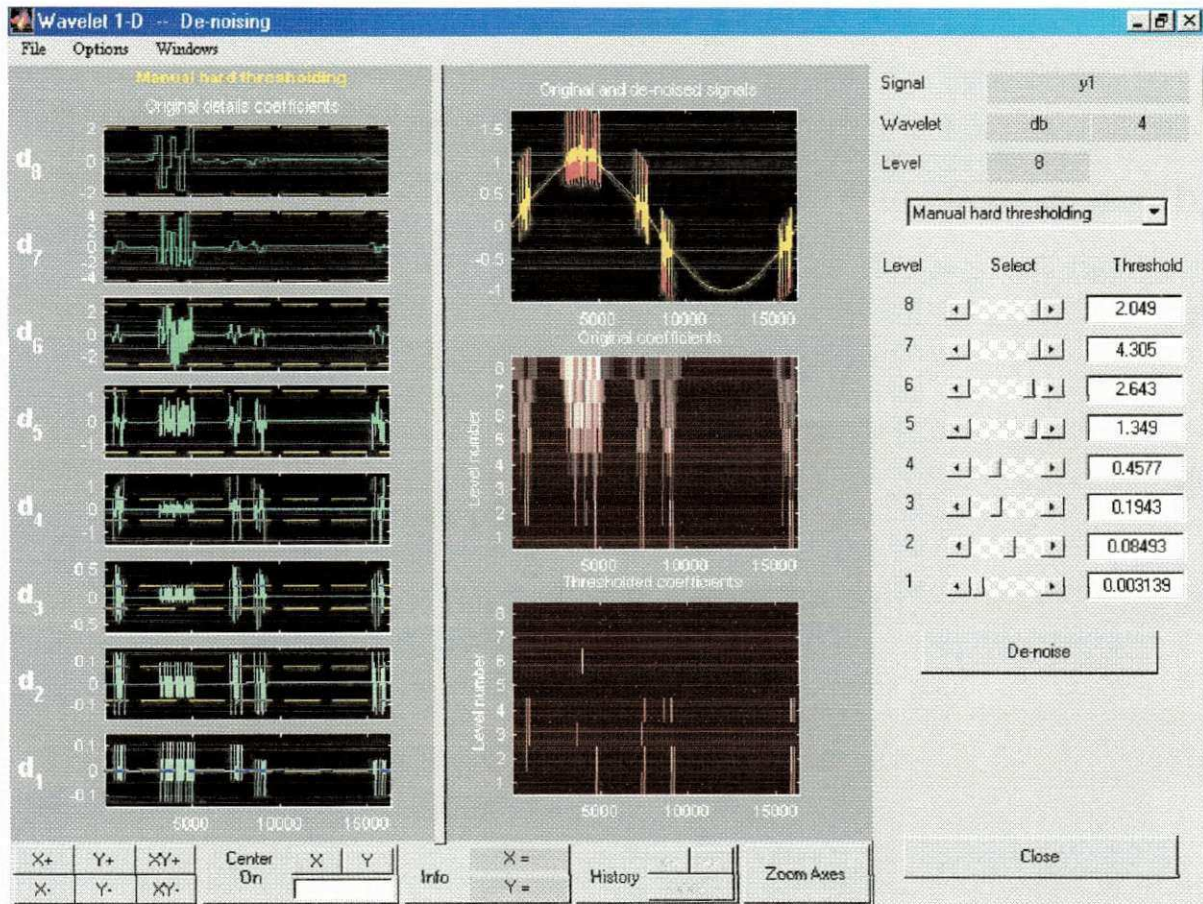


Figura 4.42 – Processo de redução de corona.

Na Figura 4.42, nota-se que os pulsos de descargas parciais sofreram uma redução em sua amplitude, consideravelmente maior que a redução que os pulsos de descargas parciais. Isso significa que o processo de redução de corona foi efetivo.

Para verificar como a transformada wavelet pode auxiliar na separação entre os pulsos de descargas parciais e os pulsos de ruído, foi elaborado, computacionalmente, um pulso de ruído com duração menor e de amplitude maior que a do pulso de descarga parcial, mostrado na Figura 4.43. O formato do sinal de ruído foi idealizado tomando com base gráficos apresentados por SHIM, (2000).

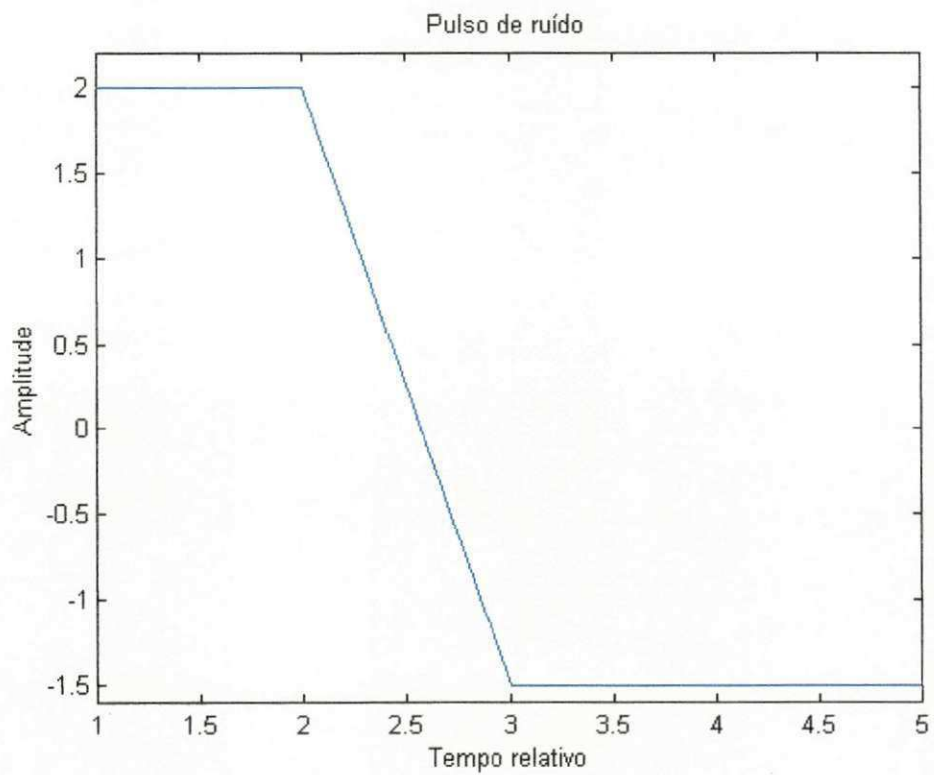


Figura 4.43 – Pulso de ruído idealizado.

Na Figura 4.43 é mostrado em ordem de ocorrência; uma seqüência de pulsos de ruído e uma seqüência de pulsos de descargas parciais.

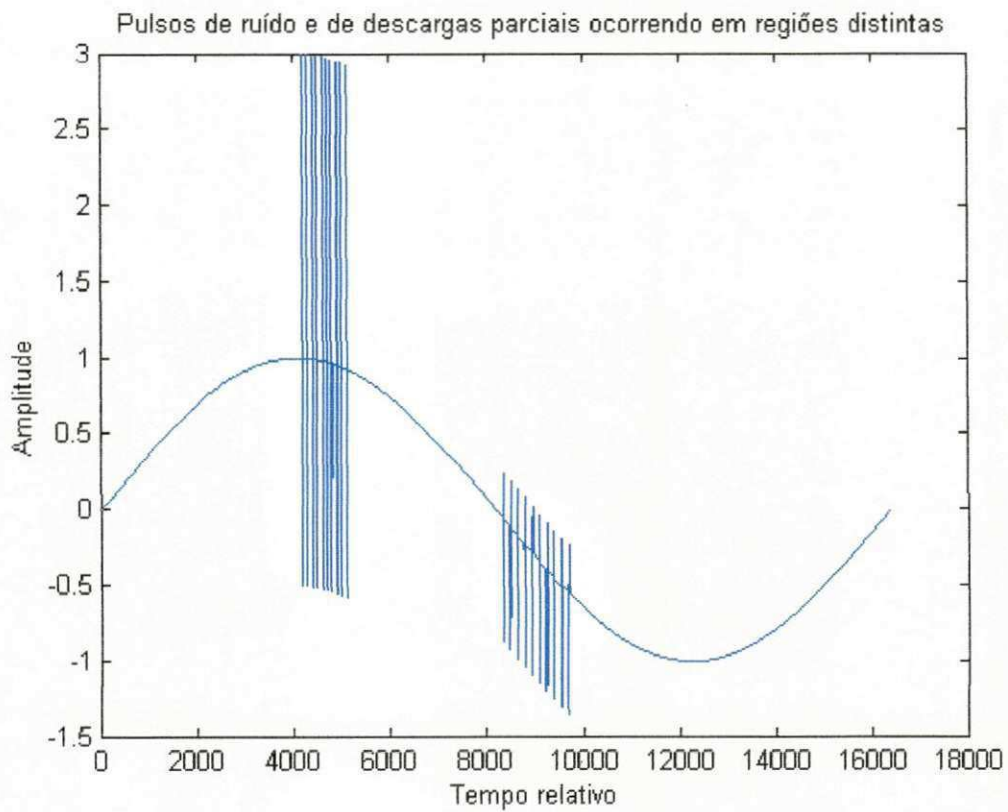


Figura 4.44 – Pulsos de ruído e de descargas parciais ocorrendo em regiões distintas.

A decomposição wavelet em 7 níveis para o sinal da Figura 4.44 é apresentada na Figura 4.45. A wavelet utilizada foi a *daubechies 4*.

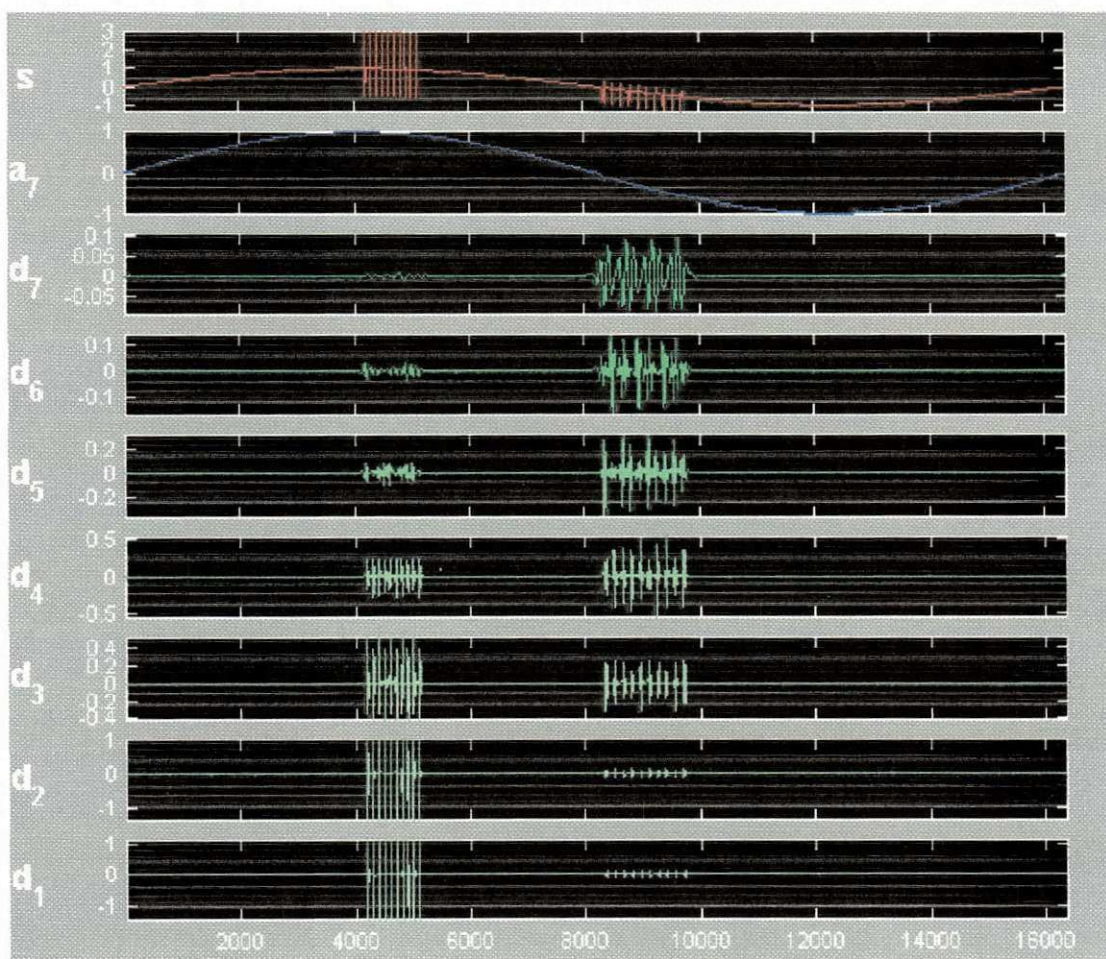


Figura 4.45 – Decomposição wavelet para os pulsos de ruído e de descargas parciais ocorrendo em regiões distintas.

A técnica matemática escolhida para redução do nível de ruído sem maior comprometimento dos pulsos de descargas parciais foi o *hard thresholding*. Na parte esquerda da Figura 4.46 são mostrados os valores de thresholding para cada nível de detalhamento da decomposição wavelet. Na parte superior central da mesma figura, o gráfico em vermelho é o sinal original e o gráfico superposto, em amarelo, representa o sinal após o processo de redução de ruído. Pode-se notar que a amplitude dos pulsos de ruído diminuiu de maneira considerável, enquanto que a amplitude dos pulsos de descargas parciais pouco se alterou.

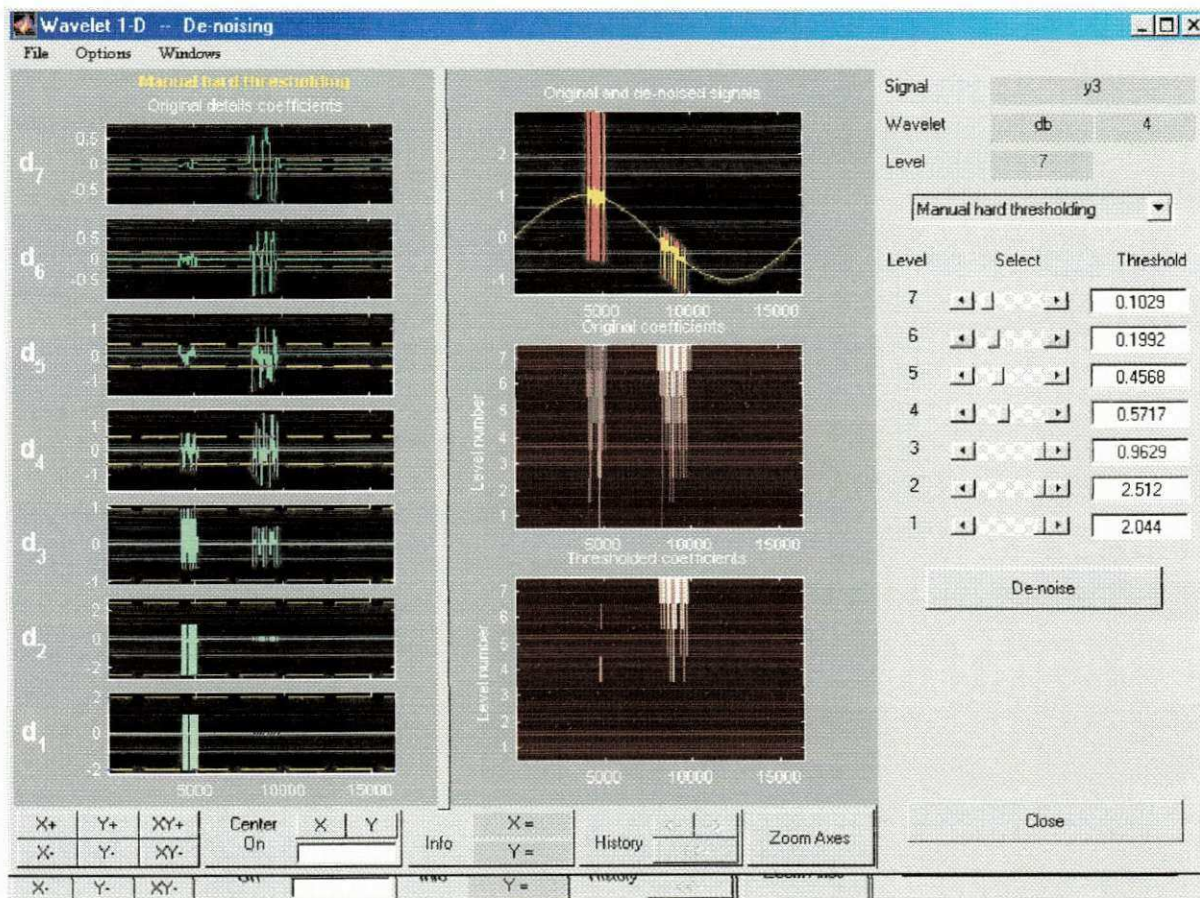


Figura 4.46 – Processo de *hard thresholding* no MATLAB.

Na Figura 4.47 é mostrada a superposição dos pulsos de ruído e de descargas parciais. Os pulsos de ruídos estão distribuídos em todo sinal senoidal e os pulsos de descargas parciais estão localizados nas mesmas posições da Figura 4.35.

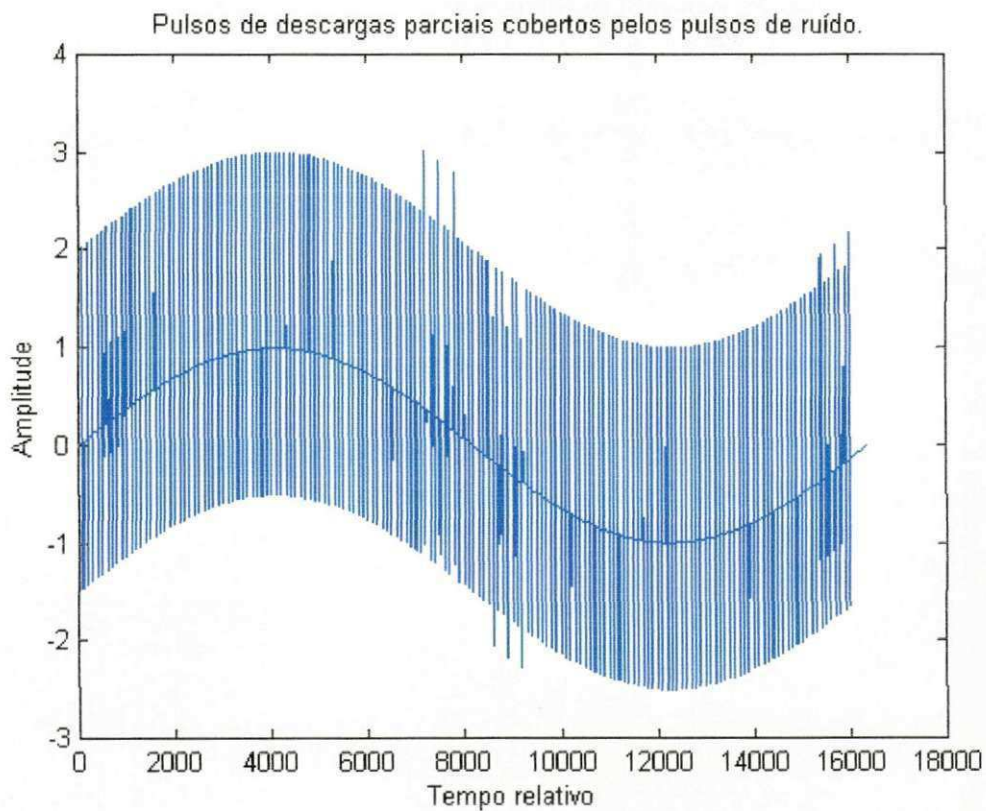


Figura 4.47 – Pulsos de descargas parciais cobertos pelos pulsos de ruído.

Aplicando os mesmos níveis de *thresholding* mostrados na Figura 4.46 para o sinal da Figura 4.47 obtém-se o sinal mostrado na Figura 4.48. Os níveis de *thresholding* estão sendo utilizados como bancos de dados para que o processo de redução de ruídos possa ser aplicado com mais eficiência.

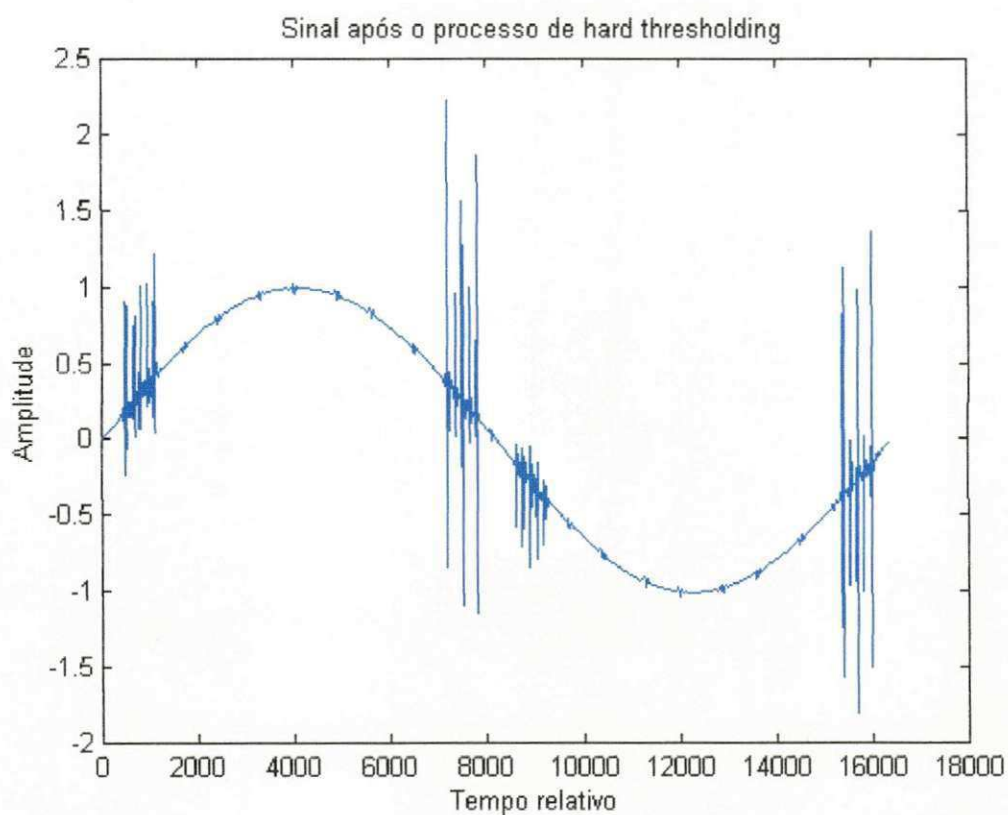


Figura 4.48 – Sinal após o processo de redução de ruído.

Pode-se notar que a redução de ruído para o sinal da Figura 4.45 foi bem sucedida, pois, somente restaram pulsos onde efetivamente ocorriam descargas parciais. Conclui-se, então que a transformada wavelet é efetiva na separação de sinais de ruído e de descargas parciais.

## CAPÍTULO V

### Conclusões

O trabalho de digitalização e estudo de descargas parciais através da transformada wavelet discreta apresentou cinco tipos de configurações idealizadas para gerarem sinais de descargas parciais. Para cada configuração, arquivos contendo os sinais de descargas parciais foram obtidos. O sistema de aquisição dos dados foi constituído pelo circuito de detecção, detector de descargas parciais, digitalizador e um computador pessoal. A tensão aplicada ao objeto de ensaio, o tempo de aplicação da tensão ao objeto de ensaio e a localização da cavidade, onde pulsos de descargas parciais são gerados, foram as variáveis para os ensaios.

A transformada wavelet discreta foi utilizada para o processamento dos sinais de descargas parciais. O processamento objetivou a caracterização dos sinais em suas diferentes resoluções. A wavelet Daubechies 1 permitiu decompor os sinais de descargas parciais em oito níveis de resolução. As resoluções do sinal foram visualizadas em um gráfico tridimensional, chamado de representação Z. O processamento de redução de ruídos, *hard-thresholding*, foi utilizado para alguns sinais captados.

Atualmente, a maioria dos trabalhos de reconhecimento de padrões de descargas parciais utiliza redes neurais. A representação dos sinais captados através do gráfico Z se apresentou como uma alternativa complementar para caracterização e formação de padrões de descargas parciais. Obviamente, mais estudos com este tipo de representação precisam ser realizados.

O processamento e análise dos sinais de descargas parciais foram prejudicados pela estreita banda de passagem do detector (16 – 180 kHz). Grandes faixas do espectro de frequência dos sinais analisados foram suprimidas durante a medição. Como os pulsos de corona possuem energia em faixas mais elevadas de frequência em relação a muitos tipos de



descargas parciais, então o sistema de medição tendeu a igualar (em termos de espectro de frequência) os pulsos de corona e aos de descargas parciais. Na análise dos sinais simulados no computador, a efetividade da transformada wavelet para separar pulsos de durações diferentes foi comprovada.

O banco de dados dos sinais obtidos neste trabalho pode ser útil para estudos futuros. As configurações utilizadas foram concebidas para fins de pesquisa, mas a metodologia empregada pode ser expandida para objetos de teste de uso mais comercial.

As dificuldades deste trabalho originaram-se principalmente do processo de captação das descargas. Contudo, o processo de análise dos sinais também deve ser estudado com maior profundidade. Tendo em vista essas dificuldades, propõe-se os seguintes trabalhos:

- Estudo da elaboração de wavelets que melhor representem os padrões de descargas parciais, oriundas dos diversos materiais ou equipamentos. Isto significa que, no processo de decomposição do sinal em suas diferentes resoluções, a energia da descarga parcial deve estar concentrada em um pequeno e conhecido número de coeficientes que represente melhor o fenômeno;
- Outro estudo alternativo seria decompor sinais de descargas parciais, utilizando wavelets já conhecidas e verificar as que mais se adequam na decomposição;
- Desenvolvimento de um detector com uma faixa de passagem na ordem de centenas de MHz. O trabalho consistiria em desenvolver um impedor de medição e um amplificador de sinais apropriados;
- Aplicação de redes neurais para o reconhecimento de padrões de descargas parciais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SCHWAB, A. **High-Voltage Measurement Techniques** Massachusetts, The M.I.T. Press, 1971.
- BARTNIKAS, R.; McMAHON E. J. **Corona Measurement and Interpretation** Baltimore, American Society for Testing and Materials, 1979.
- BOGGS, S. A.; STONE, G. C. **Fundamental Limitations in The Measurement of Corona and Partial Discharge**. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-17 n. 2, p. 143-150, Abril 1982.
- BORSI, H. **A PD Measurements and Evaluation System Based on Digital Signal Processing**. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 7, n. 1, p. 21-29, Fevereiro, 2000.
- BURRUS, C. S. **Introduction to Wavelets Transforms**, EUA, Prentice- Hall, 1998.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION-IEC 270 **Standard for Partial Discharge Measurements**, 1981.
- FLORKOWISK, M. **Wavelet Based Partial Discharge Image De-Noising**. 11º ISH, vol. 5 p. 21-24 seção n. 5, Agosto, 1999.
- GULSKI, E. **Computer-aided Measurements of Partial Discharges in HV Equipment**. IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol. 28, n. 6, p. 969-983, Dezembro, 1993.
- GULSKI, E.; KRIVDA, A. **Neural Networks as a Tool for Recognition of Partial Discharges**. IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol. 28, n. 6, p. 984-1001 Dezembro, 1993.

- KAWADA, M.; TUNGKANAWANICH A.; KAWASAKI Z. **Detection of Wide-Band E-M Signals Emitted from Partial Discharge Ocorring in GIS Using Wavelet Transform.** IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 15 n. 2, p. 467-471, abril, 2000.
- KELEN, A. **Trends in PD Diagnostics (When New Options Proliferate, so do Old and New Prolems).** IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 2, n. 4, p.529-534, agosto, 1995.
- KOCK, N.; CORIC, B.; PIETSCH, R. **UHF PD Detection in Gas Isulated Switgear-Suitability and Sensitivity of the UHF Method in Comparison with the IEC 270 Method.** IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 12, n. 6 p. 20-25, novembro/dezembro, 1996.
- KRANZ, H. G. **Fundamentals in Computer Aided PD Processing, PD Pattern Recognition and Automated Diagnosis in GIS.** . IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 7, n. 1, p. 12-20, Fevereiro, 2000.
- KREUGER, F. H. **Partial Detection in High-Voltage Equipment.** Grã-Bretanha, Anchor Press Ltd, Tiptree, Essex, 1989.
- KREUGER, F. H. **Classification of Partial Discharges.** IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol 28, n. 6, p. 917-931, Dezembro, 1993.
- MISITI, M.; MISITI, Y.; OPPENHEIM G. **Wavelet Toolbox for Use with MATLAB** EUA, The MathWorks, Inc., março, 1996.
- NIELSEN, O. M. **Wavelets in Scientific Computing.** Ph.D. Dissertation, Technical University of Denmark, 1998.
- OSVÁTH, P. **Comment and Discussion on Digital Processing of PD Pulses** IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol 2, n. 4, p. 685-699, Agosto, 1995.
- POMPOLI, M.; MAZZETTI, C.; BARTNIKAS R. **Early Stages of Negative PD Development in Dielectric Liquids.** IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol 2, n. 4, p. 602-613, Agosto, 1995.

- SANTOSO, S.; POWERS, E. J.; GRADY, W. M. **Power Quality Assesment via Wavelet Transform Analisis**. IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 11, n. 2 p.924-930, abril, 1996.
- SHIM, I.; SORAGHAN, J. J.; SIEW, W. H.; MCPHERSON, F.; SLUDDEN, K.; GALE, P. F. **Locating Partial Discharge in High Voltage (HV) Cable Networks**. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p. 210-213, 1999.
- SHIM, I.; SORAGNAN, J. J.; SIEW, W. H. **Aplication of Digital Signal Processing to Detection Partial Discharge Part 2: Optimized A/D Conversion**. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol 16, n. 4, p. 11-15, Julho/Agosto, 2000.
- SHIM, I.; SORAGNAN, J. J.; SIEW, W. H. **Aplication of Digital Signal Processing to Detection Partial Discharge Part 3: Wavelet Denoising**. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol 17, n. 1, p. 6-13. , Janeiro/Fevereiro, 2001.
- VETTERLI, M.; KOVACEVIC, J. **Wavelet and Subband Coding** New Jersey, Pretince Hall, 1995.
- ZODERVAN, J.P.; GULSKI, E.; SMIT, J. J. **Fundamentals Aspects of PD Patterns of On-Line Measurements on Turbogenerators**. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 7, n. 1, p. 59-77, Feveiro, 2000.

## Anexo

Programa em código MATLAB para conversão dos arquivos em formato

binário oriundos do digitalizador para o formato ASCII:

```
close all
clear all
nome=input('digite o nome do arquivo\n\n','s');
range=input('digite o range utilizado\n');
fid=fopen(nome,'r');
fread(fid);
posicao=ftell(fid);
%
if posicao==65553 % 32K pontos
    status=fseek(fid,0,-1);
    h1=fread(fid,7,'char');
    b1=fread(fid,2,'uchar');
    n1=b1(1)*256+b1(2)
    w1=fread(fid,n1,'uchar');
    %
    h2=fread(fid,2,'char');
    b2=fread(fid,2,'uchar');
    n2=b2(1)*256+b2(2)
    w2=fread(fid,n2,'uchar');
    %
    w=zeros((n1+n2)/2-2,1);
    j=0;
    for i=1:2:n1-1,
        h=w1(i);
        l=w1(i+1);
        j=j+1;
        w(j)=(h*256)+l;
        w(j)=(range*w(j)/512)-range;
    end
    %
    for i=1:2:n2-1,
        h=w2(i);
        l=w2(i+1);
        j=j+1;
        w(j)=(h*256)+l;
        w(j)=(range*w(j)/512)-range;
    end
end
%
if posicao==131099 % 64 k pontos
    status=fseek(fid,0,-1);
```

```

h1=fread(fid,7,'char');
b1=fread(fid,2,'uchar');
n1=b1(1)*256+b1(2)
w1=fread(fid,n1,'uchar');
%
h2=fread(fid,2,'char');
b2=fread(fid,2,'uchar');
n2=b2(1)*256+b2(2);
w2=fread(fid,n2,'uchar');
%
h2=fread(fid,2,'char');
b2=fread(fid,2,'uchar');
n2=b2(1)*256+b2(2);
w3=fread(fid,n2,'uchar');
%
h2=fread(fid,2,'char');
b2=fread(fid,2,'uchar');
n2=b2(1)*256+b2(2);
w4=fread(fid,n2,'uchar');
%
w=zeros((n1+n2)-2,1);
j=0;
for i=1:2:n1-1,
h=w1(i);
l=w1(i+1);
j=j+1;
w(j)=(h*256)+l;
w(j)=(range*w(j)/512)-range;
end
%
for i=1:2:n2-1,
h=w2(i);
l=w2(i+1);
j=j+1;
w(j)=(h*256)+l;
w(j)=(range*w(j)/512)-range;
end
for i=1:2:n1-1,
h=w3(i);
l=w3(i+1);
j=j+1;
w(j)=(h*256)+l;
w(j)=(range*w(j)/512)-range;
end
%
for i=1:2:n2-1,
h=w4(i);
l=w4(i+1);
j=j+1;
w(j)=(h*256)+l;
w(j)=(range*w(j)/512)-range;

```

```
end
end
if posicao==32780 % 16k pontos
    status=fseek(fid,0,-1);
    h1=fread(fid,7,'char');
    b1=fread(fid,2,'uchar');
    n1=b1(1)*256+b1(2);
    w1=fread(fid,n1,'uchar');
    w=zeros((n1-1)/2,1);
    j=0;
    for i=1:2:n1-1,
        h=w1(i);
        l=w1(i+1);
        j=j+1;
        w(j)=(h*256)+l;
        w(j)=(range*w(j)/512)-range;
    end
end
end
%
save saida w;
fclose(fid);
%
format short e;
%
plot(w)
```