

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 281

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO  
DE DADOS PARA MONITORAMENTO  
E DIAGNÓSTICO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS  
PELO MÉTODO DAS DESCARGAS PARCIAIS**

*Hilton de Oliveira Mota*

DATA DA DEFESA: 22.03.2001

---

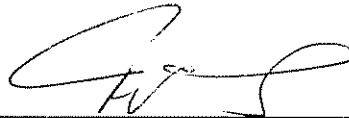
**"Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados para Monitoramento e Diagnóstico de Equipamentos Elétricos pelo Método das Descargas Parciais"**

*Hilton de Oliveira Mota*

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 22 de março de 2001.

Por:



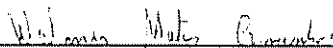
---

**Flávio Henrique Vasconcelos – Ph.D.**  
**Prof. DEE/EEUFMG – orientador**



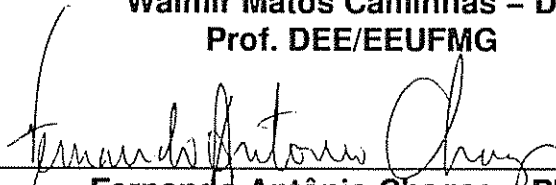
---

**Antônio Emílio Angueth de Araújo – Ph.D.**  
**Prof. DEE/EEUFMG**



---

**Walmir Matos Caminhas – Dr.**  
**Prof. DEE/EEUFMG**



---

**Fernando Antônio Chagas – Ph.D.**  
**Eng. CEPEL – Unidade de Adrianópolis/RJ**

Universidade Federal de Minas Gerais

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

**Sistema de aquisição e tratamento de dados para monitoramento e diagnóstico de equipamentos elétricos pelo método das Descargas Parciais**

por

Hilton de Oliveira Mota

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Flávio Henrique Vasconcelos

# Agradecimentos

Antes de mais nada, gostaria de agradecer a Deus por proporcionar a oportunidade de desfrutar desta experiência tão gratificante, que por muitas vezes é inacessível a tantas outras pessoas. Muito obrigado.

Aos meus pais, por sempre incentivarem de maneira incansável o meu progresso, como profissional e como pessoa. Em particular à minha mãe, que em todos os momentos acompanhou de forma tão próxima o meu desenvolvimento. Ao fim de uma jornada longa como esta percebe-se, enfim, que este apoio é o que faz toda a diferença em nossas vidas.

Aos meus irmãos, Cícero e Hiran, por terem assumido e superado todas as dificuldades que a vida nos impôs, após a ausência de nosso pai. Obrigado por todos os acertos, equívocos e, sobretudo, pela coragem de tentar.

À minha esposa, Janete, pela compreensão, apoio, paciência e carinho com que sempre me tratou. Obrigado por sempre ter sido minha base emocional e por ter trago a estabilidade necessária a ser simplesmente feliz.

Ao meu orientador, Prof. Flávio H. Vasconcelos, por todas as vezes (e não foram poucas) em que me surpreendeu pelo seu apoio, intelectual e pessoal. Foi um privilégio e um prazer conviver com a sua pessoa.

Agradeço a todos os professores do PPGEE, por compartilharem comigo seu conhecimento e sua amizade. A todos os meus colegas de estudo e, de forma especial, ao Erickson, pelo companheirismo nas horas mais difíceis e por sempre partilhar seus

conhecimentos de forma incontestável. Gostaria de agradecer também ao colega Jesus Manoel Francisco por sua motivação e proficiência na construção das partes mecânicas deste trabalho.

Ao CEPTEL, pelo apoio financeiro ao projeto e, em particular, aos Engenheiros Alexandre N. da Silva, Hélivio Martins e Fernando Chagas, por suas contribuições técnicas.

“Para chegar ao fim das coisas, o primeiro passo é julgá-las possíveis”

Luiz XIV

## Resumo

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de medição para a avaliação da degradação do isolamento de equipamentos de alta tensão através do método das Descargas Parciais. A medição dos pulsos de D. P. foi realizada utilizando-se um osciloscópio digital programável que possui altas taxas de aquisição. Esta característica, associada a técnicas de processamento de sinais, permitiu a análise de parâmetros temporais dos pulsos, bem como a conhecida análise relativa à fase da tensão de alimentação do sistema. A avaliação da distribuição relativa à fase foi feita com base em operadores estatísticos, que permitem quantizar o seu formato e, assim, comparar resultados de diferentes ensaios. O sistema foi utilizado na caracterização de descargas parciais em isolamentos sólidos e gasosos, através do uso de diferentes configurações de campo elétrico, com o objetivo de determinar parâmetros significativos para o reconhecimento de diferentes fontes do fenômeno e a avaliação do nível de degradação presente. Os dados obtidos foram organizados em um banco de dados que pode servir ao treinamento de um sistema de inteligência artificial, para possibilitar a automação do diagnóstico dos ensaios.

# Abstract

In this work a measurement system was developed for the evaluation of insulation degradation of high voltage equipment based on the Partial Discharge method. The P. D. pulses measurement was made using a programmable digital oscilloscope that has high acquisition rates. This feature, associated to signal processing techniques, enables the pulse temporal analysis, as the known phase-related analysis. The phase-related evaluation was based on statistical operators that quantize the distribution shape and, then, enables the comparison of results of different tests. The system was used on the characterization of partial discharges in solid and gaseous insulation, by the use of distinct electric field configurations, aiming to establish parameters to recognize different discharge sources and to evaluate the degradation level present. The data obtained from these configurations are organized on a databank that can be used on training an artificial intelligence system, as a way to automatize the test diagnostics.



# Sumário

Agradecimentos .....	i
Epígrafe .....	iii
Resumo .....	iv
Abstract .....	v
Sumário .....	vi
Lista de figuras .....	ix
Lista de tabelas .....	xiv
Capítulo 1 – Introdução .....	1
1.1 – Perspectivas históricas e relevância .....	1
1.2 – Objetivos do trabalho .....	3
1.3 – Organização do texto .....	4
Capítulo 2 – Aspectos gerais do estudo de Descargas Parciais .....	6
2.1 – Introdução .....	6
2.2 – Parâmetros relevantes na medição de Descargas Parciais .....	10
2.3 – Métodos de detecção de Descargas Parciais .....	16
2.4 – Calibração do sistema de medição .....	27
Capítulo 3 – Análise de Descargas Parciais .....	31
3.1 – Técnicas de análise de Descargas Parciais .....	31

3.2 – Aquisição de conhecimento sobre o fenômeno .....	34
3.3 – Classificação de padrões de Descargas Parciais .....	36
3.4 – Operadores estatísticos .....	41
Capítulo 4 – Sistema de aquisição de Descargas Parciais .....	43
4.1 – Introdução .....	43
4.2 – O método de aquisição utilizado .....	44
4.3 – Interface gráfica .....	49
4.4 – Procedimento de ensaio .....	52
4.5 – Relato das análises estatísticas .....	58
Capítulo 5 – Medição de Descargas Parciais no ar .....	60
5.1 – Sistema de medição .....	60
5.2 – Geração e medição de Descargas Parciais no ar .....	70
5.3 – Padrões de Descargas Parciais no ar a pressão atmosférica .....	77
Capítulo 6 – Medição de Descargas Parciais em isolamentos sólidos .....	82
6.1 – Sistema de medição .....	82
6.2 – Amostras de material isolante sólido .....	90
6.3 – Padrões de Descargas Parciais em sólidos .....	96
6.4 – Parâmetros temporais das Descargas Parciais em isolamento sólido .....	98
.....	
Capítulo 7 – Resultados e análise dos parâmetros estatísticos .....	103
7.1 – Resultados dos parâmetros estatísticos para Descargas Parciais no ar .....	103

7.2 – Resultado geral do comportamento das Descargas Parciais no ar .....	112
7.3 – Resultados dos parâmetros estatísticos para Descargas Parciais em dielétricos sólidos .....	115
Capítulo 8 – Conclusões e propostas de continuidade .....	119
8.1 – Propostas de continuidade .....	121
Referências bibliográficas .....	123
Apêndice A – Operadores estatísticos .....	A-1

## Lista de figuras

2.1 - Representação do dielétrico contendo uma cavidade e circuito capacitivo equivalente .....	12
2.2 - Duas variações do circuito de medição de descargas parciais padrão ...	16
2.3 - Circuito de detecção de descargas parciais em ponte .....	18
2.4 – Capacitâncias presentes no sistema de medição .....	19
2.5 - Rede de detecção de descargas parciais .....	20
2.6 - Circuito capacitivo visto por uma descarga parcial .....	21
2.7 - Faixa de passagem do sistema de medição .....	22
2.8 - Resposta do sistema a um pulso de descarga parcial .....	23
2.9 - Resposta ao impulso de uma rede de detecção RLC .....	26
2.10 - Calibração do sistema de medição de descargas parciais .....	29
3.1 - Padrão de descargas parciais relativo à fase da tensão de alimentação ...	33
3.2 - Histogramas de tempos de subida e tempos de meia onda .....	34
3.3 - Distribuição de descargas parciais em ar .....	37
3.4 - Distribuição de descargas parciais em isolamento sólido .....	38
4.1 - Divisão do período da senóide em janelas temporais .....	46
4.2 - Descargas parciais medidas em ar a pressão atmosférica .....	48
4.3 - Pulso de descarga parcial adquirido em sólido a 1 GS/s .....	48

4.4 - Interface gráfica .....	50
4.5 - Distribuição de amplitudes médias e número de ocorrências por janela de fase. Descargas parciais em ar a pressão atmosférica .....	51
4.6 - Distribuição de frequência das amplitudes das descargas parciais referentes à figura 4.6. ....	51
4.7 - Histogramas dos parâmetros temporais dos pulsos .....	52
4.8 - Caixa de diálogo “Configurar Osciloscópio” .....	54
4.9 - Descarga parcial em ar e o nível utilizado para a detecção .....	55
4.10 - Caixa de diálogo “Configurar ensaio” .....	56
4.11 - Evolução do ensaio de descargas parciais .....	57
4.12 - Caixa de diálogo relatando o término do ensaio .....	58
4.13 - Caixa de diálogo “Dados estatísticos” .....	59
5.1 - Circuito de medição de descargas parciais .....	60
5.2 - Projeto do resistor de água .....	61
5.3 - Fotografia da montagem para geração de DPs em ar .....	63
5.4 - Pulso de descarga parcial em ar a pressão atmosférica .....	65
5.5 - Resposta do sistema ao pulso de calibração .....	67
5.6 - Forma de onda do gerador no instante de transição .....	69
5.7 - Projeto de alguns eletrodos metálicos .....	71
5.8 - Câmara de vácuo para aquisição de DPs em ar .....	72
5.9 - Circuito de medição de DPs em ar .....	72

5.10 - Pulso de descarga distorcido devido ao erro no casamento de impedância .....	73
5.11 - Degrau de tensão aplicado à linha de transmissão .....	76
5.12 - Exemplos de resultados obtidos de ensaios no ar .....	78
5.13 - Padrão apresentando descargas parciais no segundo quadrante da senóide .....	79
5.14 - Modificações observadas com o aumento do diâmetro do eletrodo .....	80
5.15 - Distribuição de amplitudes médias atípica .....	81
6.1 - Foto da célula de medição de descargas parciais em sólidos .....	84
6.2 - Corte lateral da célula de medição .....	85
6.3 - Ângulos de abertura dos condutores cônicos .....	86
6.4 - Conexão para avaliação da faixa de passagem .....	87
6.5 - Faixa de passagem da célula de medição .....	88
6.6 - Descarga parcial em isolamento sólido .....	89
6.7 - Algumas configurações de eletrodos utilizados para aquisição de DPs em sólidos .....	91
6.8 - Molde para fabricação das amostras de dielétrico sólido .....	92
6.9 - Movimento bi-axial a que o molde está sujeito durante a cura .....	93
6.10 - Foto do acionamento instalado na porta do forno .....	93
6.11 - Amostra de dielétrico sólido contendo cavidade entre eletrodos .....	95
<hr/>	
6.12 - Padrões de descargas parciais em isolamento sólido. Amplitudes médias e número de ocorrências por janela de fase em relação à fase da tensão de alimentação .....	97

6.13 - Distribuição de frequências dos tempos de frente e tempos de meia onda. Descargas parciais em ar a pressão atmosférica .....	98
6.14 - Distribuição de frequência dos tempos de frente e meia onda. Descargas parciais em dielétrico sólido .....	99
6.15 - Distribuição de frequência dos tempos de frente e meia onda. Descargas parciais em dielétrico sólido .....	100
6.16 - Distribuições de frequência dos tempos de frente e meia onda. Descargas parciais em dielétrico sólido, tensão de 10 kV .....	102
7.1 - Centro de distribuição dos gráficos de amplitudes médias e do número de ocorrências no ciclo positivo da senóide, para diversos níveis de tensão aplicada .....	103
7.2 - Centros de distribuição dos gráficos de amplitudes médias e número de ocorrências, para o ciclo negativo da senóide. Resultados de todos os ensaios realizados .....	104
7.3 - Correlações cruzadas entre as distribuições dos ciclos positivo e negativo. Resultados de todos os ensaios realizados .....	105
7.4 - Efeitos do aumento da tensão de alimentação sobre a distribuição de DPs. Amplitudes médias e número de ocorrências por janela de fase em relação à fase da tensão de alimentação .....	106
7.5 - Desvios padrões das distribuições de amplitudes médias e número de ocorrências no ciclo negativo da senóide .....	107
7.6 - Efeitos do aumento do diâmetro dos eletrodos sobre a distribuição das DPs. Amplitudes médias e número de ocorrências por janela de fase em relação à fase da tensão de alimentação .....	108
7.7 - Diminuição do desvio padrão das distribuições com o aumento do diâmetro dos eletrodos. Cálculo realizado sobre as distribuições de amplitudes médias e número de ocorrências, para o ciclo negativo da senóide .....	109
7.8 - Evolução dos resultados do operador Kurtosis com o aumento do diâmetro dos eletrodos. Resultados obtidos da distribuição no ciclo negativo da senóide .....	109
7.9 - Efeito da variação da distância entre eletrodos na distribuição das descargas parciais. Amplitudes médias e número de ocorrências por janela de fase em relação à fase da tensão de alimentação .....	111

7.10 - Evolução dos resultados do operador Kurtosis com o aumento da distância inter eletródica. Os resultados foram extraídos do ciclo negativo das distribuições .....	112
7.11 - Média aritmética e intervalo de confiança dos resultados dos operadores estatísticos, aplicados às distribuições de amplitudes médias .....	113
7.12 - Média aritmética e intervalo de confiança dos resultados dos operadores estatísticos, aplicados às distribuições de número de ocorrências .....	114
7.13 – Médias e intervalos de confiança dos resultados dos operadores estatísticos aplicados às distribuições de amplitudes médias .....	116
7.14 - Médias e intervalos de confiança dos resultados dos operadores estatísticos aplicados às distribuições de número de ocorrências .....	118
A.1 - Cálculo da assimetria das distribuições .....	A-2
A.2 - Cálculo do operador kurtosis .....	A-4
A.3 - Variação do centro da distribuição .....	A-5
A.4 - Cálculo da correlação cruzada .....	A-6



# Lista de tabelas

2.1 – Componentes típicos presentes nos sistemas de medição de DP ..... 21

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 – Perspectivas históricas e relevância

A medição de descargas parciais já há muitos anos é reconhecida como uma poderosa ferramenta para avaliação do nível de degradação do isolamento de equipamentos de alta tensão. Desde meados da década de 1920 este método vem sendo utilizado no diagnóstico e prevenção contra falhas em equipamentos, inicialmente sendo utilizado na avaliação de níveis do efeito corona em linhas de transmissão e de fenômenos relacionados, como perdas de energia na linha e interferência eletromagnética com outros sistemas localizados nas suas proximidades.

A partir da década de 1950, o início do uso intensivo de componentes de isolamento sólido nos equipamentos de alta tensão, tais como o isolamento polimérico em cabos coaxiais de alta tensão, partes do isolamento interno de disjuntores e transformadores, etc., renovou o interesse na detecção das descargas parciais. O uso de tais componentes proporcionou uma série de benefícios, como o aumento da capacidade de isolamento e da resistência mecânica, a possibilidade de aumento da temperatura de trabalho, a redução da espessura das paredes do isolamento e menores custos na fabricação e instalação. No entanto, com o passar dos anos, observou-se que estes componentes são mais susceptíveis à degradação devido à ocorrência de descargas parciais, quando comparados com equipamentos isolados a óleo, comumente utilizados na época. Esta característica determinou que o processo de fabricação dos equipamentos que utilizavam tais materiais tivesse que ser cuidadosamente controlado para evitar a presença de bolhas e impurezas internas ao seu isolamento. Procedimentos mais

rigorosos passaram a vigorar com relação à avaliação da qualidade das peças que acabavam de ser fabricadas e das que já estavam em uso. Manutenções preventivas periódicas tornaram-se obrigatórias para evitar que a degradação do isolamento evoluísse ao ponto de atingir sua completa ruptura.

Naquela época grandes avanços foram obtidos no desenvolvimento de sistemas de detecção de descargas parciais, principalmente com relação à sensibilidade e imunidade a ruídos. Esses avanços foram importantes para a melhoria da avaliação de equipamentos já instalados em campo, situação que é geralmente mais crítica devido às condições adversas presentes. Novas técnicas de avaliação e diagnóstico foram desenvolvidas buscando estabelecer padrões de comportamento dos pulsos de descarga em relação ao nível de degradação.

Atualmente nota-se o ressurgimento do interesse na área devido às facilidades introduzidas pelo uso mais amplo da computação. Como ocorre em várias outras áreas científicas, o barateamento dos custos e a facilidade de aquisição de computadores, aliados aos benefícios trazidos pelo processamento digital de informações, abriram um grande número de alternativas para o desenvolvimento de sistemas de aquisição e processamento de sinais de descargas parciais. Ainda, a possibilidade de armazenamento das informações para posterior processamento permitiu o desenvolvimento de novos procedimentos para o diagnóstico da integridade do isolamento.

Pode-se afirmar, porém, que uma solução definitiva para o diagnóstico dos equipamentos ainda não foi encontrada. As pesquisas recentes mostram avanços na avaliação de cabos coaxiais e equipamentos menos complexos do ponto de vista elétrico. Entretanto, o diagnóstico em transformadores, máquinas e geradores tem se mostrado dependente de características como modelo sob ensaio, fabricante do equipamento e lote de fabricação, o que indica a falta de generalização dos métodos utilizados. A pesquisa na área de descargas parciais apresenta, portanto, boas

perspectivas para novos estudos, uma vez que ainda carece de ferramentas que possam realizar diagnósticos mais confiáveis e que possam ser aplicadas a uma gama maior de equipamentos e sistemas de alta tensão. Este trabalho motiva-se em tal carência, buscando a investigação do fenômeno e a determinação de parâmetros estatísticos que possam melhorar a análise dos ensaios realizados.

## **1.2 – Objetivos do trabalho**

Este trabalho tem como objetivo a implementação de parte de uma ferramenta computacional que possa ser utilizada para o monitoramento de equipamentos elétricos e que, posteriormente, seja capaz de fornecer, com base em técnicas de inteligência artificial, o diagnóstico das condições de isolamento desses dispositivos, para a implementação de procedimentos preditivos de manutenção.

Um sistema de aquisição de dados de descargas parciais foi desenvolvido com base em um osciloscópio digital programável, controlado via computador através de uma interface GPIB. O sistema permite a aquisição e armazenamento dos dados para posterior análise em relação à fase da tensão de alimentação e em relação a parâmetros temporais dos pulsos. Uma interface gráfica apresenta os dados coletados ao operador para que este possa realizar o diagnóstico da integridade do sistema.

Devido às características aleatórias encontradas no comportamento das descargas parciais nos diversos tipos de isolamento, operadores estatísticos foram implementados e aplicados sobre os padrões de descargas coletados. Estes operadores permitem quantificar características relativas aos formatos das distribuições obtidas e, assim, possibilitam a classificação de diferentes padrões gerados pelas descargas parciais. Esta classificação permite relacionar o resultado de uma determinada aquisição com um tipo de defeito característico e o nível de degradação presente no isolamento.

O sistema desenvolvido foi utilizado para a caracterização do comportamento das descargas parciais em isolamentos gasosos e sólidos. Este estudo foi feito através do uso de diferentes configurações eletródicas e diferentes níveis de tensão, em ambos os tipos de isolamento, que estabelecem diferentes configurações e intensidades do campo elétrico ao qual o isolamento está sujeito. Parâmetros relevantes para a caracterização do estado do isolamento do sistema foram determinados. Os resultados obtidos foram organizados em um banco de dados a ser utilizado no treinamento de um sistema de inteligência artificial que visa automatizar os diagnósticos dos ensaios. O desenvolvimento deste sistema está sendo feito em um trabalho paralelo.

Como consequência do trabalho desenvolvido foram publicados dois artigos em um congresso nacional [21, 23] e um em um congresso internacional [22].

### **1.3 – Organização do texto**

Este documento está organizado em 8 capítulos, a saber:

- Capítulo 1: apresenta perspectivas históricas e a relevância do estudo realizado, bem como os objetivos do trabalho.
- Capítulo 2: faz-se uma abordagem dos aspectos relevantes no estudo das descargas parciais. Apresenta uma visão geral do estudo das DPs e as características comuns aos sistemas de aquisição de descargas parciais.
- Capítulo 3: apresenta as técnicas de análise utilizadas no estudo das descargas parciais.
- Capítulo 4: introduz o sistema de aquisição de dados desenvolvido. São mostrados o procedimento de ensaio e o modo de apresentação de resultados.

- Capítulo 5: relata a aquisição de descargas parciais no ar. Apresenta o desenvolvimento do sistema de medição e os métodos de geração de descargas.
- Capítulo 6: o sistema de medição de descargas parciais em dielétricos sólidos é introduzido. Apresenta o desenvolvimento do sistema e discute suas limitações.
- Capítulo 7: apresenta e discute os resultados obtidos da análise estatística aplicada às distribuições de fase de descargas parciais no ar e em dielétrico sólido.
- Capítulo 8: conclusões obtidas do trabalho e sugestões para desenvolvimento futuro.

## Capítulo 2

# Aspectos gerais do estudo de Descargas Parciais

### 2.1 - Introdução

A definição do termo descargas parciais tem sido contraditória e gerado algumas discussões, uma vez que ele engloba uma série de fenômenos a princípio semelhantes, mas que podem ocorrer em situações e materiais completamente diferentes. O consenso maior em relação à sua definição pode ser encontrado em [5] e em [16]: descarga parcial é uma descarga elétrica localizada que curto-circuita parcialmente o isolamento entre condutores e que pode ou não ocorrer adjacente a um condutor. O termo “parciais” refere-se ao fato de que o processo de ionização ocorre somente em parte do espaço existente entre os eletrodos responsáveis por gerar o campo, não chegando, portanto, a constituir uma ruptura completa do isolamento do sistema (breakdown).

Considera-se que existam três requisitos para a ocorrência de descargas parciais em um sistema de isolamento:

1. É necessária a presença de um gás.
2. É necessária a presença de um campo elétrico que exceda o limite de isolamento suportável pelo gás.
3. É necessária a presença de pelo menos 1 elétron livre para que o processo seja desencadeado. Uma vez ocorrida a primeira descarga, elétrons livres geralmente tornam-se abundantes e a ocorrência de novas descargas torna-se facilitada.

Uma característica importante e que por vezes causa confusão para as pessoas que tomam contato com o fenômeno pela primeira vez é que as descargas parciais não ocorrem necessariamente entre um par de eletrodos metálicos. Pelo contrário, o fenômeno pode ocorrer entre eletrodos feitos de materiais isolantes, desde que o gradiente de potencial a que o gás está exposto seja superior ao limite suportável pelo mesmo. O estudo do fenômeno tornou-se importante exatamente devido à sua ocorrência no interior de peças de isolamento sólido, cujas paredes, obviamente, são feitas de material isolante. A conclusão equivocada de que são necessários eletrodos metálicos veio do fato de que a maioria dos experimentos em laboratório usam eletrodos deste tipo.

O tipo de descarga parcial mais intuitivo e de fácil observação é o efeito corona que ocorre, por exemplo, nas proximidades de linhas de transmissão e subestações de energia elétrica. O fenômeno é facilmente observado em dias nublados ou úmidos. O termo corona geralmente é relacionado às descargas parciais que ocorrem em isolamentos gasosos, como os isolamentos presentes em linhas de transmissão e subestações isoladas a gás SF<sub>6</sub>, enquanto o termo descarga parcial relaciona-se a descargas em isolamentos sólidos ou líquidos. Entretanto, os dois termos denominam o mesmo fenômeno.

A ocorrência de descargas parciais em uma peça de isolamento pode não levar a nenhuma consequência grave ou pode levar até à completa ruptura da mesma. Obviamente, a presença de descargas parciais que não comprometam o desempenho do isolamento com o passar do tempo é perfeitamente aceitável. Entretanto, e infelizmente, na maioria dos casos a ocorrência de descargas causa degradação na peça e pode acarretar efeitos desastrosos. As cavidades encontradas nos isolamentos surgem devido a imperfeições no processo de fabricação das peças ou devido a reações químicas e à movimentação constante a que os isolamentos líquidos estão sujeitos. A sua presença provoca distorções no campo elétrico, devido às diferenças no valor das permissividades



do gás e do sólido ou líquido, sendo que o gradiente de potencial no interior da cavidade é mais intenso que no dielétrico.

Caso a intensidade de campo elétrico ultrapasse o valor da rigidez dielétrica do gás, ocorre uma ionização do mesmo e observa-se um fluxo de elétrons na direção contrária às linhas de campo elétrico, ou a chamada descarga parcial. Estes elétrons cruzam o espaço ocupado pela cavidade e atingem a parede do dielétrico polarizada positivamente em frações de segundo. Na direção contrária ao fluxo de elétrons observa-se um fluxo de íons positivos, que atingem a outra parede do dielétrico frações de segundo mais tarde que os elétrons.

Observa-se que, durante a ocorrência de descargas parciais, as paredes do material dielétrico são constantemente bombardeadas com elétrons e íons positivos, que possuem grande energia cinética. Este bombardeamento causa a deterioração do material dielétrico, devido à transferência de energia, principalmente dos íons, para os átomos do material dielétrico. A troca de energia entre os íons e os átomos acarreta a formação de subprodutos químicos, sendo que o tipo de subproduto formado depende de uma série de características, como tipo de dielétrico, tipo de gás presente e intensidade da energia. Frequentemente observa-se a formação de produtos derivados de carbono, resultantes da “queima” do material dielétrico. Conseqüentemente, a parede do isolamento começa a formar canais condutores, conhecidos como arvorejamentos, que resultam em maior distorção do campo elétrico no interior da cavidade e intensificação da ocorrência de descargas parciais. O fenômeno é do tipo “bola-de-neve”, e pode levar ao crescimento da degradação do material até o ponto de completa perda da capacidade de isolamento e conseqüente falha no sistema elétrico. O crescimento de arvorejamentos pode levar anos, semanas ou mesmo dias, razão pela qual a verificação periódica dos equipamentos de alta tensão faz-se necessária e o fenômeno é considerado tão perigoso para os sistemas de energia elétrica. Por outro lado, é importante salientar que existem casos em que, apesar da presença de descargas parciais, não ocorre evolução de arvorejamentos a ponto de comprometer o funcionamento do equipamento.

A ocorrência de descargas parciais reflete-se em uma série de fenômenos, como por exemplo:

1. Geração de luz visível e radiação ultravioleta.
2. Produção de gás ozônio e oxigênio.
3. Ruído audível e não audível.
4. Formação de componentes químicos nas paredes dos dielétricos.
5. Geração de calor localizado e perda de energia elétrica no sistema.
6. Erosão mecânica de superfícies devido ao bombardeamento iônico.
7. Geração de campos eletromagnéticos que causam interferências em sistemas de comunicação, principalmente estações de rádio AM.

Qualquer destes fenômenos pode ser utilizado para a detecção da sua ocorrência, dependendo das condições ou possibilidades oferecidas pelo sistema que está sendo avaliado. Por exemplo, fenômenos óticos podem ser utilizados em sistemas de isolamento que permitam a visualização do local de ocorrência das descargas, embora estes casos sejam raros. A detecção de gases gerados pela descarga é bastante utilizada na avaliação cromatográfica do óleo isolante de transformadores. O estudo da formação de componentes químicos pode ser utilizado onde for possível destruir a peça de isolamento. Entretanto, os processos de detecção mais interessantes são aqueles em que o sistema de isolamento permanece intacto.

Os processos mais utilizados hoje em dia são quatro. O primeiro baseia-se na detecção do campo eletromagnético gerado, através do uso de um equipamento medidor de tensão de rádio-interferência (RIV). O segundo método baseia-se na medição do som gerado pela descargas, bastante utilizado para a determinação do local onde o fenômeno está ocorrendo. O terceiro baseia-se na medição da variação do fator de dissipação ( $\tan \delta$ ) do equipamento através de uma ponte Schering ou outra semelhante. O quarto

método baseia-se na medição da corrente que circula no circuito externo conectado à peça de isolamento.

O método de medição da corrente externa tem sido considerado o mais eficiente para a avaliação do nível de degradação a que o isolamento está sujeito. Estudos mostraram [13, 17, 26] que há uma forte relação entre a distribuição dos pulsos com relação à fase da tensão de alimentação e nível de degradação do dielétrico. Além disso, parâmetros temporais dos pulsos de descarga, como tempo de subida ou tempo de meia onda, sofrem variações com a evolução de arvorejamentos, e podem ser utilizados para inferir sobre este nível de degradação. O trabalho desenvolvido baseia-se no método das correntes devido à sua maior confiabilidade e a possibilidade de obtenção de maior quantidade de informações sobre o fenômeno. Um maior aprofundamento sobre o processo que provoca a circulação da corrente externa e os métodos utilizados para sua medição serão apresentados nas seções subsequentes.

## **2.2 – Parâmetros relevantes na medição de Descargas Parciais**

Na seção anterior foi introduzido o conceito de que as descargas parciais ocorrem em isolamentos sólidos e líquidos na presença de cavidades que contêm gás. Para a compreensão do fenômeno, das relações entre as variáveis medidas e a degradação presente no isolamento, esta seção apresenta uma descrição sucinta do processo de desencadeamento das descargas parciais.

O processo de ionização do gás presente no isolamento se dá principalmente por colisão, razão pela qual um dos pré-requisitos para sua ocorrência seja a presença de pelo menos 1 elétron livre.

Ao estar sujeito a um campo elétrico suficientemente intenso e dependendo de condições de pressão do gás e tamanho da cavidade, o elétron pode adquirir energia cinética suficiente para, ao colidir com átomos neutros em seu caminho, deslocar outro elétron. Os dois elétrons livres passam, então, a adquirir energia cinética e podem liberar outros dois elétrons através de novas colisões durante seu curso entre o catodo e o anodo. Este processo repete-se com conseqüente aumento exponencial do número de elétrons liberados, até que estes atinjam o anodo e o fluxo cesse. A passagem da nuvem de elétrons pela cavidade deixa em seu caminho átomos ionizados positivamente, que possuem velocidade de deslocamento muito menor e, portanto, atingem o catodo, ou a parede oposta da cavidade, frações de segundo mais tarde.

Após esta transferência de cargas a diferença de potencial entre o anodo e o catodo diminui, devido à presença de cargas superficiais que ficam retidas na parede do dielétrico. A intensidade do campo elétrico diminui a um nível abaixo do suportável pelo gás, e o campo resultante não é mais capaz de fornecer energia suficiente aos elétrons para que ocorram novas ionizações. A descarga se extingue neste instante. Enquanto a diferença de potencial entre os eletrodos geradores do campo permaneça constante e a carga depositada no dielétrico não se dissipe, não ocorrerão novas ionizações e, portanto, novas descargas. No caso de o campo aplicado ser resultante de uma tensão alternada, novas ionizações ocorrerão caso o valor instantâneo da tensão continue aumentando, até atingir novamente o limite suportável pelo gás, ou caso a polaridade da tensão se inverta. Nas duas situações novas descargas parciais ocorrerão, dependendo de quantas vezes o campo elétrico ultrapasse o valor da rigidez dielétrica do gás.

Os processos de ionização relativos às descargas parciais são os mesmos explicados por Townsend em suas pesquisas com campos uniformes entre eletrodos metálicos e por Meek e Raether [18], conhecido como mecanismo Streamer. As duas teorias relacionam-se a processos diferentes de desencadeamento das descargas, porém ambos podem ocorrer. O tipo de descarga que ocorrerá depende de fatores como o

diâmetro da cavidade, intensidade de campo (e, portanto, da presença ou ausência de cargas superficiais) e pressão interna do gás. Geralmente descargas de baixa intensidade, abaixo de 120 pC, relacionam-se ao processo descrito por Townsend, enquanto que descargas de maior intensidade relacionam-se ao processo streamer [5]. Estas últimas são consideravelmente mais prejudiciais ao isolamento do sistema, quando comparadas às descargas relacionadas ao processo Townsend.

Para a compreensão dos parâmetros utilizados na avaliação das descargas parciais as cavidades presentes no sistema de isolamento são estudadas através de um modelo simplificado proposto por Whitehead [36], Austen e Hackett [2], e apresentado na figura 2.1.

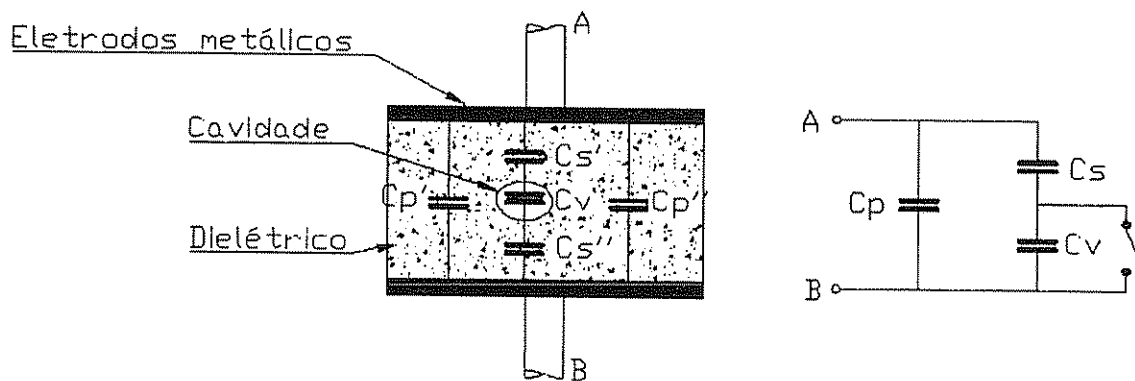


Figura 2.1: representação do dielétrico contendo uma cavidade e circuito capacitivo equivalente

Neste modelo a capacitância da cavidade é representada por  $C_v$ .  $C_s$  representa a capacitância da parte do dielétrico que está em série com a cavidade.  $C_s$  é obtida da associação série de  $C_s'$  e  $C_s''$ , sendo portanto igual a:

$$C_s = \frac{C_s' \cdot C_s''}{C_s' + C_s''} \quad (2.1)$$

$C_p$  representa a capacitância do restante do dielétrico que está em paralelo com a cavidade. Ela é a associação em paralelo de  $C_{p'}$  e  $C_{p''}$ , sendo igual à soma das duas. A chave em paralelo a  $C_v$  representa o curto circuito que ocorre sobre esta quando ocorre uma descarga parcial.

No instante em que ocorre uma descarga, a tensão entre as paredes da cavidade diminui abruptamente um montante  $\Delta E$ , a partir do seu valor inicial  $E_b$ , que é a tensão de ruptura suportável pelo gás. Este comportamento é semelhante à aplicação de um degrau de tensão igual a  $E_b - \Delta E$  sobre o capacitor  $C_v$ . Para restaurar o nível de tensão, uma carga  $\Delta Q$  é drenada do capacitor  $C_p$ , que está em paralelo a  $C_v$ , e dos capacitores eventualmente presentes no circuito externo que alimenta o sistema. Esta carga é dada por [5]:

$$\Delta Q = \Delta E \cdot \frac{C_v \cdot C_s}{C_v + C_s} \quad (2.2)$$

A carga transferida,  $\Delta Q$ , é diretamente proporcional à variação da tensão sobre a cavidade. Esta variação é uma medida da magnitude ou intensidade da descarga, estando diretamente relacionada à intensidade de degradação causada pela mesma, para um mesmo tipo de dielétrico. Portanto, pode ser suposto que quanto maior a carga transferida durante a ocorrência de uma descarga parcial, maior será o dano causado. Esta característica é utilizada na avaliação de equipamentos de alta tensão com relação à degradação presente em seu isolamento. As primeiras normas escritas para este fim relacionavam somente os níveis máximos de carga transferida, obtidos de leituras na tela do osciloscópio, com níveis considerados aceitáveis, de acordo com os tipos e classes de equipamentos.

A ocorrência de uma descarga parcial no interior da cavidade reflete-se na circulação de uma corrente no circuito externo ao dielétrico. Como visto, esta corrente é responsável pelo fornecimento de parte da carga necessária para recarregar o capacitor relacionado à cavidade. Devido ao fato de se conseguir detectar somente parte desta

corrente, consegue-se medir somente parte da carga transferida durante uma descarga parcial. Esta carga é denominada *carga aparente*. A medição da carga total seria possível somente caso se tivesse acesso à corrente que circula no interior da cavidade, o que é impossível na maioria dos casos. As exceções ocorrem na medição de descargas parciais entre eletrodos metálicos, em que a corrente que circula durante a descarga é totalmente fornecida pelo circuito externo de alimentação, podendo, portanto, ser totalmente medida.

Em condições normais, as capacitâncias dos capacitores utilizados no modelo possuem uma relação tal que  $C_s \ll C_v \ll C_p$ . Com base nesta relação, a equação 2.2 pode reduzir-se a:

$$\Delta Q \approx C_s \cdot \Delta E \quad (2.3)$$

Definindo-se  $E_b$  como a tensão de limiar suportável pelo gás e  $E_r$  a tensão residual que permanece na cavidade após a ocorrência da descarga devido às cargas superficiais, temos que:

$$\Delta E = E_b - E_r \quad (2.4)$$

A energia dissipada em cada pulso de descarga é dada por [5]:

$$\Delta W \approx C_v \cdot \Delta E \cdot \left( E_b - \frac{1}{2} \cdot \Delta E \right) \quad (2.5)$$

Se a cavidade fosse completamente descarregada pela descarga parcial, o que na prática raramente acontece, a tensão residual  $E_r$  seria igual a 0. Deste modo, a eq. 2.5 tomaria a forma mais simplificada e mais referenciada na literatura:

$$\begin{aligned}
 \Delta W &= C_v \cdot (E_b - E_r) \cdot \left[ E_b - \frac{1}{2} \cdot (E_b - E_r) \right] = \\
 \Delta W &= C_v \cdot E_b \cdot \left( E_b - \frac{1}{2} E_b \right) = \\
 \Delta W &= \frac{1}{2} \cdot C_v \cdot E_b^2 = \\
 \Delta W &= \frac{1}{2} \cdot C_v \cdot \Delta V^2 \qquad (2.6)
 \end{aligned}$$

A energia transferida pela descarga, calculada pela equação 2.5, representa uma grandeza importante, uma vez que a taxa de degradação a que o material está exposto é proporcional a ela. No entanto, na prática a equação 2.5 é de difícil implementação porque, normalmente, nem a capacitância da cavidade nem a variação de tensão sobre a mesma são conhecidas. A medição desta variação de tensão implica na aquisição de pulsos com amplitude muito baixa sobrepostos à tensão nominal aplicada entre os terminais do equipamento, o que torna a tarefa muito complicada.

Algumas avaliações podem ser feitas através da medição da energia consumida pelas descargas parciais utilizando-se a medição do fator de perdas, através de ponte Schering ou outras semelhantes. Porém observa-se que poucas informações de ordem prática são obtidas. A experiência e o aumento no número de ensaios realizados mostrou que, da mesma forma que ocorreu com a avaliação através da carga máxima transmitida pelas descargas, a avaliação através do fator de perdas é um tanto duvidosa e incompleta [5].

Estas observações levaram à popularização do método de avaliação que utiliza a corrente que circula no circuito externo como parâmetro de julgamento. Além de fornecer maior quantidade de informações, a medição da corrente é mais simples de ser feita, o que facilita o uso do método.



Deve ficar claro que a medição da corrente externa à amostra é uma medição indireta da carga transferida durante a descarga parcial e que, por sua vez, é uma medição indireta do degrau de tensão  $\Delta E$  que ocorre entre as paredes da cavidade. Por fim, este degrau de tensão é proporcional à energia dispendida pela descarga e transferida às paredes do dielétrico e, portanto, está diretamente relacionado ao nível de degradação imposto pela mesma. Desta forma, medindo-se a corrente externa do circuito, obtém-se uma estimativa da energia que está sendo transferida ao dielétrico e da degradação a que ele está sujeito.

Nas seções posteriores as características e os circuitos de medição da corrente externa serão apresentados. A seção também apresenta a relação entre a corrente medida, a carga transferida e as análises feitas sobre estas medições.

## 2.3 -- Métodos de detecção de descargas parciais

### 2.3.1 – Circuitos de medição

A maioria dos circuitos de detecção de descargas parciais baseia-se em um dos três arranjos mostrados nas figuras 2.2 e 2.3 [16].

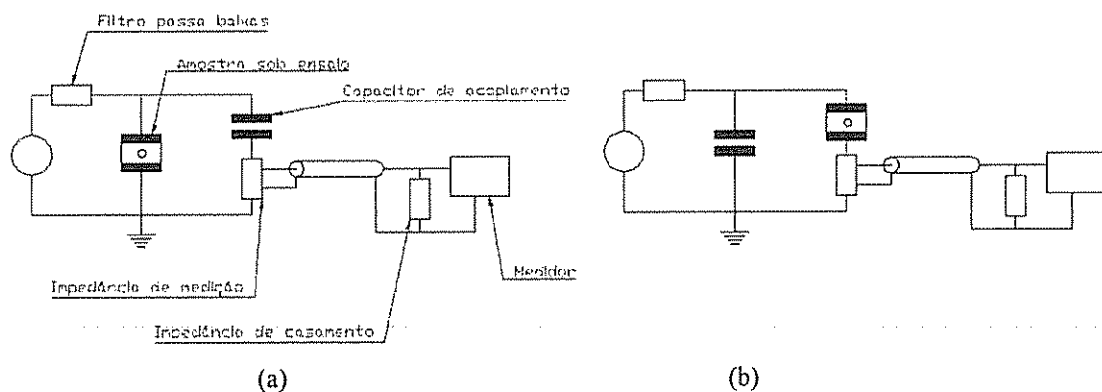


Figura 2.2: duas variações do circuito de medição de descargas parciais padrão

A figura 2.2 apresenta duas variações do circuito mais utilizado. A fonte de alimentação é geralmente uma fonte de corrente alternada, similar à alimentação à qual o objeto sob ensaio estará sujeito durante a sua operação normal. A avaliação de descargas parciais em tensão contínua também pode ser realizada, muito embora esta condição de operação seja mais rara. Este tipo de avaliação é utilizado em equipamentos e situações específicos, e possui características particulares. Este procedimento não será abordado neste trabalho, sendo que maiores detalhes podem ser obtidos nas referências [5, 16].

Sempre que possível, é um bom procedimento isolar a fonte de alimentação do restante do sistema através de um filtro passa baixas, para que interferências ou descargas parciais que porventura venham a ocorrer naquela não o atinjam.

A parte (a) da figura 2.2 apresenta o sistema mais utilizado. O equipamento sob ensaio é representado por uma peça de dielétrico contendo uma cavidade. Uma impedância de medição é conectada ao equipamento através de uma capacitância de acoplamento. O circuito que compõe esta impedância é determinante da sensibilidade do sistema e da sua faixa de passagem, e será melhor explicado a seguir. O capacitor de acoplamento permite a conexão da impedância de medição à parte de alta tensão do sistema, uma vez que filtra as componentes de 50 ou 60 Hz da fonte de alimentação. Este capacitor deve, portanto, possuir tensão nominal compatível com a tensão de alimentação, sendo frequentemente utilizados capacitores de alta tensão isolados a gás pressurizado.

Em situações em que o equipamento sob ensaio pode ter seu terminal de terra desconectado do solo, a impedância de medição pode ser conectada em série com aquele, como mostrado na parte (b) da figura 2.2. Deste modo consegue-se um pequeno ganho de sensibilidade, nos casos em que a capacitância do capacitor de acoplamento é maior do que a do espécime, devido à redução do ruído induzido no circuito. No entanto, geralmente este ganho é muito pequeno, e o circuito introduz a desvantagem de

que uma falha no isolamento do equipamento conecta a impedância de medição e a entrada do medidor diretamente à tensão de alimentação. Neste circuito o capacitor de acoplamento funciona como um elemento de armazenamento de energia. Durante a ocorrência de uma descarga parcial, a carga deslocada é fornecida por ele, de forma que a tensão sobre os terminais da amostra permaneça constante.

Em situações em que o ruído ambiente é muito intenso, o circuito apresentado na figura 2.3 torna-se bastante útil. Este arranjo é formado por um circuito balanceado, em que o medidor é conectado entre duas impedâncias de medição similares. O balanceamento é obtido através do uso de um capacitor de acoplamento de mesma ordem de magnitude da capacitância do objeto sob ensaio.

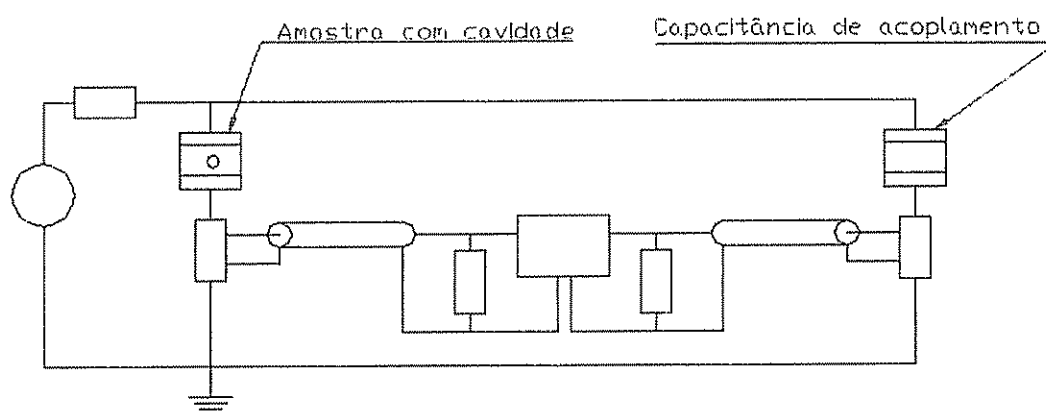


Figura 2 3: circuito de detecção de descargas parciais em ponte

O medidor realiza uma medição diferencial sobre as duas impedâncias. Desta forma, correntes induzidas por ruídos circularão pelas impedâncias no mesmo sentido, e serão eliminadas pela medição diferencial. A ocorrência de uma descarga parcial na amostra fará circular uma corrente pelo circuito externo que tem um sentido na impedância de medição 1, mas tem sentido contrário na impedância 2. A medição diferencial registra a ocorrência de circulação de uma corrente de aproximadamente o dobro do valor original, que pode ser corrigido posteriormente ou através de uma

calibração do sistema. Desta forma consegue-se um ganho significativo de sensibilidade e imunidade a ruídos.

O arranjo da figura 2.3 possui a desvantagem de que é necessário um capacitor de acoplamento o mais semelhante possível à capacitância da amostra sob ensaio. Em casos em que diversos tipos de equipamentos serão avaliados, o método torna-se difícil de ser utilizado.

Além dos métodos tradicionais, atualmente é comum encontrar sistemas que utilizam antenas e transformadores de corrente de alta frequência para captar os pulsos de descargas [9, 35]. Ambos os sistemas utilizam outro tipo de fenômeno associado à ocorrência das descargas: a geração de campos eletromagnéticos. Entretanto, este trabalho baseou-se na detecção através do sistema tradicional, ou seja, através da medição da corrente que circula no circuito externo.

### 2.3.2 – Impedância de medição

A corrente que circula pelo sistema de medição tem a forma de um impulso, que se distribui por todas as capacitâncias presentes no sistema, apresentadas na figura 2.4.

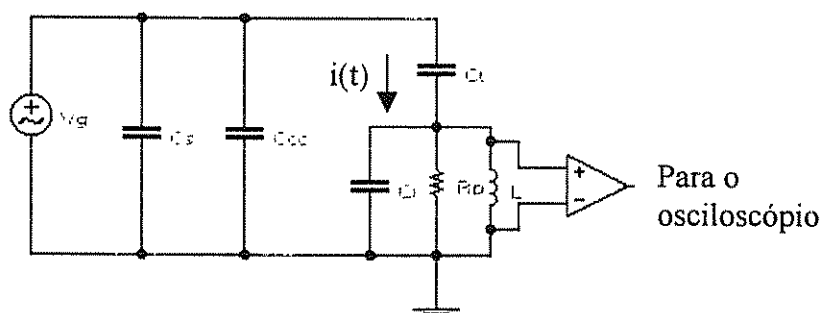


Figura 2.4: capacitâncias presentes no sistema de medição

Na figura 2.4 o equipamento sob ensaio foi substituído por sua capacitância equivalente  $C_t$ .  $C_{cc}$  representa o capacitor de acoplamento. Em paralelo a ele está a

capacitância parasita do sistema, representada por  $C_s$ . Por fim,  $C_i$  representa a capacitância de entrada do amplificador ou do instrumento de medição, associada à capacitância dos cabos condutores do sinal.

A impedância de medição introduzida no caminho da corrente é responsável pela detecção da sua ocorrência e pela sua conversão em um valor de tensão (conversor corrente-tensão) que possa ser registrado pelo medidor. Este último geralmente é um osciloscópio, ou mais recentemente um digitalizador, cuja faixa de passagem e taxa de aquisição dependem da faixa de passagem do sistema e da avaliação a ser utilizada na análise das descargas.

Um elemento sensor generalizado é apresentado na figura 2.5. Este elemento é comumente conhecido como rede RLC, onde  $C$  representa a associação das capacitâncias do sistema como um todo.  $R_p$  representa o elemento de conversão da corrente em tensão, amplamente conhecido como resistor “shunt”.  $L$  é uma indutância que pode ou não ser utilizada, mas que está presente na maior parte dos sistemas comerciais. Como será visto a seguir, esta indutância é responsável pela limitação da faixa de passagem do sistema e proporciona uma grande melhoria da medição de descargas em situações em que o ruído incidente no ambiente é muito intenso.

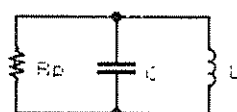


Figura 2.5: rede de detecção de descargas parciais.

A análise do sistema de medição será feita com base no circuito da figura 2.2(b), ou seja, com a impedância de medição em série com a amostra. Também utilizaremos, inicialmente, o circuito sem a indutância, para que a análise da faixa de passagem possa ser melhor avaliada. O efeito da inserção da indutância será discutido posteriormente.

Após a ocorrência de uma descarga no equipamento sob ensaio, a corrente resultante encontra em seu caminho o circuito mostrado na figura 2.6.  $V_t$  representa o degrau de tensão  $\Delta E$  que aparece devido à ocorrência da descarga parcial.

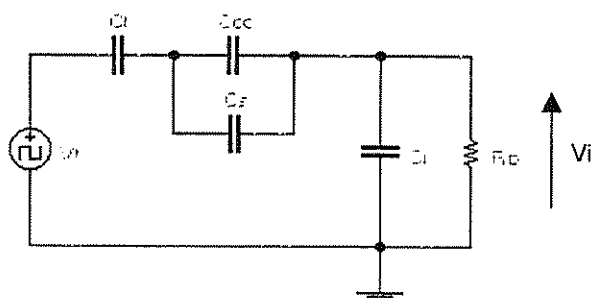


Figura 2 6: circuito capacitivo visto por uma descarga parcial

O levantamento da função de transferência deste circuito, relacionando a tensão sobre  $R_p$ , denominada  $V_i$ , e a tensão de entrada  $V_t$ , nos leva à seguinte equação:

$$\frac{V_i}{V_t} = \frac{R_p C_t (C_s + C_{cc}) S}{R_p [C_i (C_s + C_{cc} + C_t) + C_t (C_s + C_{cc})] S + (C_s + C_{cc} + C_t)} \quad (2.7)$$

Valores típicos de componentes encontrados nos sistemas de medição são dados na tabela 1 [5]. Estes valores foram utilizados para a avaliação da faixa de passagem do sistema. Embora sejam de ordem genérica, eles são úteis para a sensibilização do tipo de sistema com que estamos lidando.

Tabela 2 1 – Componentes típicos presentes nos sistemas de medição de DP (fonte: [5])

$C_i \approx 500 \text{ pF}$
$C_{cc} \approx 3000 \text{ pF}$
$C_s \approx 150 \text{ pF}$
$C_t \approx 0 \text{ a } \infty$
$R_p = 1200 \ \Omega$

A avaliação da faixa de passagem levou ao diagrama de Bode apresentado na figura 2.7.

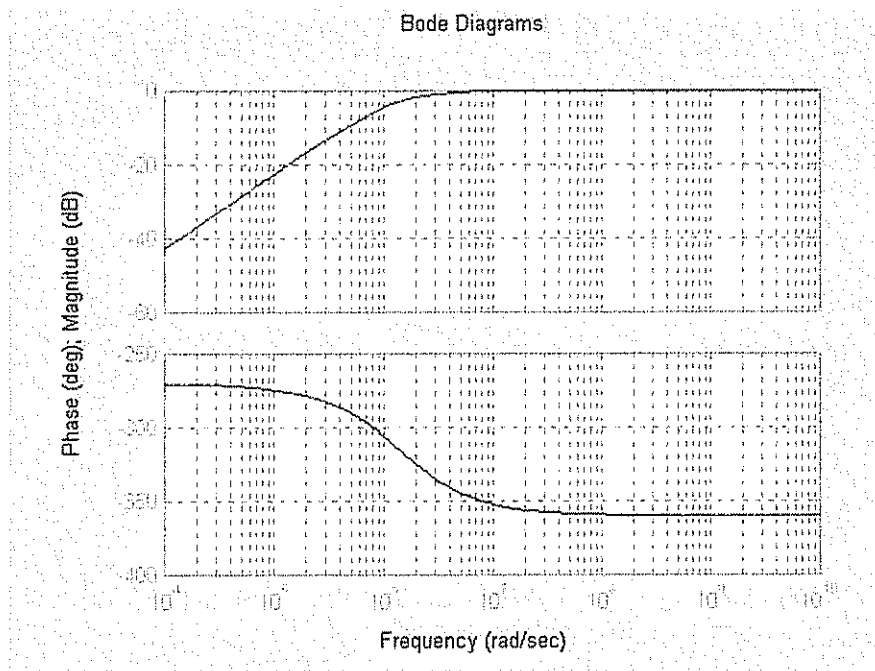


Figura 2.7: faixa de passagem do sistema de medição.

Observa-se que o circuito encontrado pela corrente tem características de um filtro passa-altas. Para os valores de capacitâncias utilizados, o circuito tem frequência de corte inferior em torno de 280 kHz.

A ocorrência de uma descarga neste sistema de medição faz surgir um pulso de tensão  $V_i$  extremamente rápido sobre a capacitância  $C_i$ , como pode ser visto na figura 2.8.

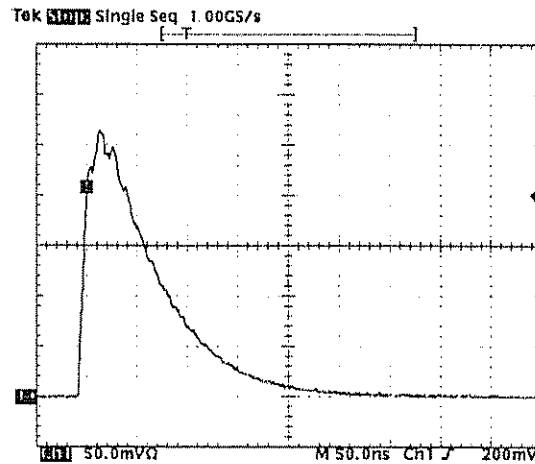


Figura 2.8: resposta do sistema a um pulso de descarga parcial

Este pulso evolui e, devido à presença de  $R_p$ , decai na forma de uma onda exponencial decrescente, dada por:

$$Vi(t) = Vi \cdot e^{-\alpha t} \quad (2.8)$$

onde  $Vi$  é o valor de pico do impulso e  $\alpha = 1 / (R_p \times C)$  é o inverso da constante de tempo de decaimento da onda exponencial. É importante salientar que  $C$  é a associação de todas as capacitâncias presentes no circuito, resultando em uma capacitância que está em paralelo ao resistor  $R_p$ .

Neste ponto é interessante fazer alguns comentários sobre o tipo de avaliação utilizada para inferir o nível de degradação do sistema. Em seções posteriores veremos que existem dois tipos principais de avaliação da degradação do isolamento devido à ocorrência de descargas parciais: a avaliação relativa à fase da tensão de alimentação e a relativa aos parâmetros temporais do pulso. A avaliação relativa à fase tem como principal parâmetro o valor de pico da tensão que surge sobre o resistor  $R_p$ . Esta é uma avaliação menos dependente da faixa de passagem e mais adequada para medições em ambientes com alta incidência de ruídos, desde que se obtenha uma calibração adequada do sistema. Em contrapartida, avaliação baseada em parâmetros temporais é altamente dependente da faixa de passagem, uma vez que lida com parâmetros como o tempo de



frente da onda que incide sobre Rp. Estes comentários estão inseridos neste ponto porque o desenvolvimento que se segue aplica-se somente à avaliação em relação à fase da tensão de alimentação ou às avaliações relativas à máxima carga transferida pelos pulsos de descarga. Os requisitos para a avaliação relativa a parâmetros temporais serão introduzidos no capítulo 4.

A associação dos elementos capacitivos em paralelo a Rp determina da faixa de passagem que o amplificador utilizado na detecção das descargas deve possuir. Como a tensão resultante tem a forma de uma exponencial decrescente, o circuito amplificador deve ter faixa de passagem suficiente para responder às componentes de frequência presentes nesta forma de onda. Esta faixa de passagem pode ser calculada por [5]:

$$f = \frac{\alpha}{2\pi} \cdot \text{tg} \frac{\pi F}{2} \quad (2.9)$$

onde  $f$  é a frequência de corte superior, considerando o circuito como um filtro passa baixas.  $F$  representa a fração de energia do pulso que deseja-se adquirir. Por exemplo, para 90% da energia do pulso e com  $\alpha = 1.96 \times 10^5$  :

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \alpha \cdot \text{tg} \frac{180^\circ \cdot 0,9}{2} = 197 \text{kHz}$$

Portanto, a faixa de passagem do amplificador é determinada pelo valor da resistência Rp e pelas capacitâncias que compõem o circuito. Entre estas capacitâncias está a do objeto sob ensaio. Para diferentes equipamentos, diferentes circuitos amplificadores ou diferentes valores de resistores podem ser utilizados, de forma a se manter a faixa de passagem condizente com a necessária e diminuir a susceptibilidade do sistema ao ruído ambiente.

Como Rp e C são determinantes da faixa de passagem do sistema, conseqüentemente eles têm também uma relação direta com a sensibilidade do mesmo.

Circuitos com maior faixa de passagem têm maior sensibilidade, tanto para o sinal gerado pela descarga parcial quanto para o ruído incidente no ambiente.

Os valores de  $R_p$  e  $C$  também são determinantes de outro parâmetro importante do sistema de medição: a resolução. Como visto,  $R_p$  e  $C$  determinam o valor da constante de amortecimento  $\alpha$ , que é o inverso da constante de tempo do circuito:

$$\tau = \frac{1}{\alpha} = R_p \cdot C \quad (2.10)$$

Valores de  $\alpha$  muito pequenos levam a um tempo de decaimento exponencial da tensão muito grande. Neste caso, a ocorrência de dois pulsos de descarga parcial muito próximos acarreta a superposição de duas respostas transitórias, o que pode levar a um erro na determinação do valor de pico ou de parâmetros temporais da tensão. Deve haver um compromisso entre a sensibilidade desejada e a resolução temporal à qual o sistema deve atender. Quanto maior o valor de  $R_p$  utilizado, menor a faixa de passagem requerida, o que reflete-se em maior imunidade a ruídos. Entretanto, maior será o tempo de decaimento da tensão e a resolução relativa a pulsos consecutivos ficará prejudicada

Devido à característica de resposta passa-altas do sistema, a medição de descargas parciais torna-se altamente susceptível ao ruído presente no ambiente ou que possa ser transmitido por condução. Em condições de laboratório este ruído pode ser minimizado a um ponto considerado satisfatório para a aquisição, através de técnicas de compatibilidade eletromagnética [28]. Entretanto, a medição de descargas parciais em campo torna-se uma tarefa muito complicada quando utiliza-se somente o resistor shunt como elemento sensor. Por este motivo, quase todos os sistemas de detecção comerciais utilizam uma indutância  $L$  em paralelo aos elementos  $R_p$  e  $C$  do circuito de medição.

A introdução desta indutância faz com que a resposta da impedância de medição ao impulso não seja mais uma exponencial decrescente. No instante em que ocorre a descarga, a capacitância  $C_i$  é carregada com uma tensão  $V_i$ , como mostrado

decaimento da onda oscilatória e, portanto, na resolução do sistema. Quanto maior o tempo de decaimento pior é a resolução, entretanto menor é a faixa de passagem requerida ao amplificador, o que aumenta a imunidade a ruídos. Novamente deve haver um compromisso entre as duas características desejadas.

Pode-se observar que a faixa de passagem do sistema é determinada pelo amplificador ou instrumento de medição utilizado, que deve responder às componentes de frequência contidas no sinal gerado sobre a impedância de medição. Este desenvolvimento foi feito com base nas componentes presentes na cauda da onda de tensão, ou seja, as componentes de frequência mais baixas presentes naquela onda. Por esta razão, este sistema não pode ser utilizado para a avaliação com relação a parâmetros temporais, uma vez que as componentes de alta frequência estão presentes na frente da onda. Conforme mencionado, a discussão sobre as características do circuito para avaliação temporal será apresentada no capítulo 4.

Outras características ou comentários sobre o circuito de detecção RLC serão deixados somente como referências da literatura [3] porque o sistema de medição utilizado no trabalho baseou-se extensivamente no arranjo RC. Para tanto, utilizou-se um capacitor de acoplamento de 120pF / 35kV isolado a gás e um resistor de medição de 50  $\Omega$ . Como o sistema foi desenvolvido para permitir a análise em fase bem como em tempo, outras considerações sobre os componentes e a faixa de passagem serão apresentadas em seções posteriores.

## **2.4 – Calibração do sistema de medição**

Como visto na seção 2.2, valor de pico da tensão,  $V_i$ , ou, mais especificamente, a variação da tensão  $\Delta E$ , é proporcional à carga aparente transferida pela descarga parcial e, portanto, pode ser utilizado para a sua determinação. O valor de tensão de pico

geralmente é obtido através da leitura direta da tela de um osciloscópio. Ultimamente o uso de equipamentos digitalizadores facilitou a determinação de tal valor, em conjunto com a automação do ensaio, uma vez que os dados adquiridos podem ser armazenados e processados posteriormente.

Para a obtenção da relação entre o valor de pico da tensão adquirida e a carga transferida pelas descargas parciais a escala de leitura do osciloscópio, ou do equipamento digitalizador, deve ser calibrada. Este processo de calibração envolve todo o circuito de medição e é feito através da injeção de um pulso de tensão em um ponto do circuito considerado apropriado. Este pulso deve ter características específicas que serão discutidas posteriormente. A injeção do pulso deve ser detectada pelo instrumento de medição, e a leitura obtida relacionada à carga injetada no circuito.

A calibração do sistema deve ser feita todas as vezes em que se muda o equipamento ou amostra que está sob ensaio, uma vez que cada equipamento possui uma capacitância correspondente. Por este motivo, a cada troca feita, a capacitância total do circuito  $C$  sofre alterações que resultam em modificações na sensibilidade do sistema e, portanto, na relação entre a tensão e carga transferida. Em equipamentos ou amostras considerados semelhantes, a calibração deve ser feita em intervalos de tempo a serem determinados pelo usuário [16].

A injeção do pulso de tensão deve ser feita sobre os terminais do equipamento ou amostra de dielétrico sob ensaio, conforme mostrado na figura 2.10.

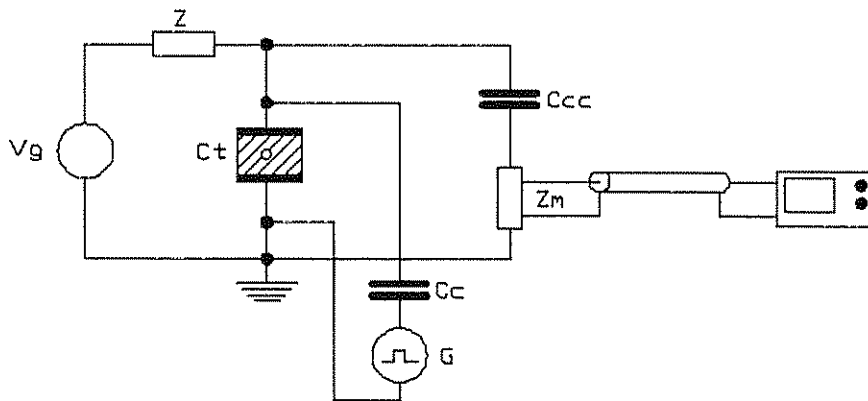


Figura 2 10: calibração do sistema de medição de descargas parciais

O pulso de calibração é obtido através da associação série de um gerador de onda quadrada, de amplitude  $\Delta E$ , e o capacitor  $C_c$ . Nestas condições o sistema é excitado por uma transferência de carga dada por:

$$q = \Delta E \cdot C_c \quad (2.12)$$

A injeção desta carga no sistema faz surgir entre os terminais da impedância de medição uma tensão cujo valor de pico é proporcional àquela. Desta forma consegue-se determinar a relação entre a escala em volts do osciloscópio e a carga transferida devido à ocorrência de uma descarga parcial.

A injeção do pulso de calibração, idealmente, deveria ser realizada com o sistema energizado, como forma de manter as mesmas características encontradas durante o funcionamento do equipamento. Entretanto, este procedimento requer a utilização de uma capacitância de calibração com tensão nominal compatível com a do sistema, o que geralmente torna o procedimento muito difícil. Consequentemente a calibração quase sempre é feita com o sistema de medição desenergizado, usando uma capacitância de baixa tensão, que é retirada antes da energização. Este procedimento é considerado adequado [16] desde que a capacitância de calibração não seja maior do que  $0.1(C_{cc} + C_t)$ .

Como os pulsos de descargas parciais possuem tempos de frente muito rápidos e, conseqüentemente, um espectro de frequências que se estende acima de 100 MHz, os tempos de frente da onda quadrada utilizada para a calibração devem ser comparáveis àqueles gerados pelas descargas. Bartnikas [4] considerou ondas quadradas com tempos de frente da ordem de 10 ns adequadas para a excitação do sistema. Como uma regra geral, em sistemas com faixa de passagem limitada ou sistemas ressonantes, o tempo de subida do pulso de calibração deve corresponder a um espectro de frequências um pouco acima do limite de passagem do sistema. Desta forma assegura-se que a calibração leve em conta todo o espectro que pode ser englobado por esta faixa de passagem, eliminando-se ou diminuindo o efeito do erro de integração encontrado em tais sistemas [6, 37].

Este capítulo apresentou as características relevantes do fenômeno das descargas parciais e do sistema de medição, para que o desenvolvimento do trabalho possa ser melhor compreendido. Características particulares aos sistemas para a avaliação em relação à fase da tensão e em relação a parâmetros temporais da forma de onda serão introduzidas quando for feita a abordagem destes itens. Procedimentos relativos à calibração e avaliação de parâmetros como sensibilidade máxima e resolução serão abordados em capítulos posteriores.

## Capítulo 3

# Análise de Descargas Parciais

### 3.1 – Técnicas de análise de Descargas Parciais

O capítulo 2 apresentou as características determinantes para a ocorrência de descargas parciais em um sistema de isolamento. Como foi visto, o comportamento das descargas depende de uma série de fatores, entre eles o volume da cavidade presente no dielétrico, pressão interna do gás, tipo de material dielétrico, presença ou não de elétrons livres e a deposição e tempo de decaimento de cargas superficiais na paredes do isolamento. A dependência daqueles fatores, sem grandes correlações entre si, faz com que o comportamento das descargas seja frequentemente aleatório, o que torna a sua análise bastante complexa. Durante discussões com técnicos experientes na análise de descargas parciais os autores ouviram relatos de casos de equipamentos que possuem níveis de descargas muito acima do que é permitido por normas baseadas em cargas máximas transmitidas, que no entanto estão operando por vários anos sem problemas aparentes e, o que é também muito importante, sem mudanças nos níveis de descarga. Casos contrários também foram relatados, em que o equipamento encontra-se dentro dos padrões estabelecidos pelas normas e vem a falhar algum tempo depois de realizado o ensaio.

A aleatoriedade no comportamento das descargas parciais fez com que as pesquisas na área evoluíssem para o uso de ferramentas estatísticas aplicadas aos resultados das medições. Alguns pesquisadores [10, 12, 13, 15, 17, 26] têm conseguido

resultados significativos com relação à inferência do nível de degradação presente no isolamento utilizando esta técnica.

As maiores evoluções têm sido observadas em testes de equipamentos que podem ser modelados por circuitos de parâmetros concentrados, como capacitores e disjuntores. Este modelamento torna-se adequado quando os equipamentos são pequenos do ponto de vista elétrico. A análise de cabos de alta tensão também tem evoluído muito, inclusive com o desenvolvimento de novas técnicas e o uso de sensores específicos para este fim [1], instalados nas conexões dos cabos. Entretanto, a análise de descargas em grandes equipamentos, como transformadores, motores e geradores de alta potência, ainda carece de respostas definitivas. Estes equipamentos introduzem dificuldades na aquisição das descargas porque o pulso de corrente gerado deve viajar entre o ponto de origem da descarga e o ponto de medição, em geral localizado externamente ao equipamento. Durante esta viagem o pulso é muito degradado, principalmente em suas componentes de frequência mais altas, o que tende a diminuir a sua amplitude e requer um sistema de medição muito sensível. Como também foi visto no capítulo 2, o aumento na sensibilidade do sistema frequentemente abre as portas para a incidência de ruídos, o que acaba por impossibilitar a medição. Devido a estes fatos, há muito o que evoluir ainda na área de medição e análise de descargas parciais em grandes equipamentos.

Em conjunto com as técnicas de medição das descargas parciais, as técnicas de análise de degradação do isolamento vêm evoluindo com o tempo. Atualmente, duas destas técnicas têm se mostrado mais eficientes para o propósito: a análise em fase (phase-resolved) e a análise em tempo (time-resolved). A primeira pode ser utilizada com um equipamento de detecção de descargas parciais tradicional, que possui faixas de passagem de algumas centenas de kHz e geralmente baseia-se na detecção utilizando filtros ressonantes. Este método busca inferir o nível de degradação presente no



isolamento através do estudo da distribuição da ocorrência dos pulsos com relação ao ângulo de fase da senóide de alimentação, como pode ser visto na figura 3.1.

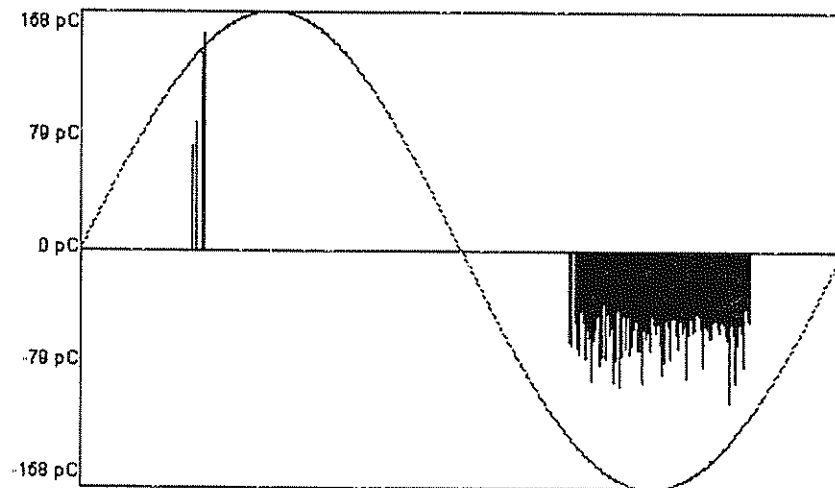


Figura 3.1: padrão de descargas parciais relativo à fase da tensão de alimentação

O segundo método estuda as mudanças que ocorrem em parâmetros da forma de onda do pulso, como tempo de subida e tempo de meia onda, e busca relacionar estas mudanças com o nível de degradação presente no isolamento. Por necessitar adquirir os sinais de corrente com a menor distorção possível, o método de análise em tempo torna-se altamente dependente da faixa de passagem do sistema de medição (que inclui o próprio objeto sob ensaio). Portanto, ele é de difícil utilização em ambientes com ruídos e é ineficiente em equipamentos considerados grandes do ponto de vista elétrico, uma vez que nestes equipamentos o pulso de descarga se degrada até atingir o ponto de medição. O método de análise em fase é quase sempre o escolhido para a avaliação de equipamentos com grandes capacitâncias e em ambientes ruidosos.

Neste trabalho, análise em tempo foi realizada através de histogramas dos tempos de subida e tempos de meia onda dos pulsos, como pode ser visto na figura 3.2.

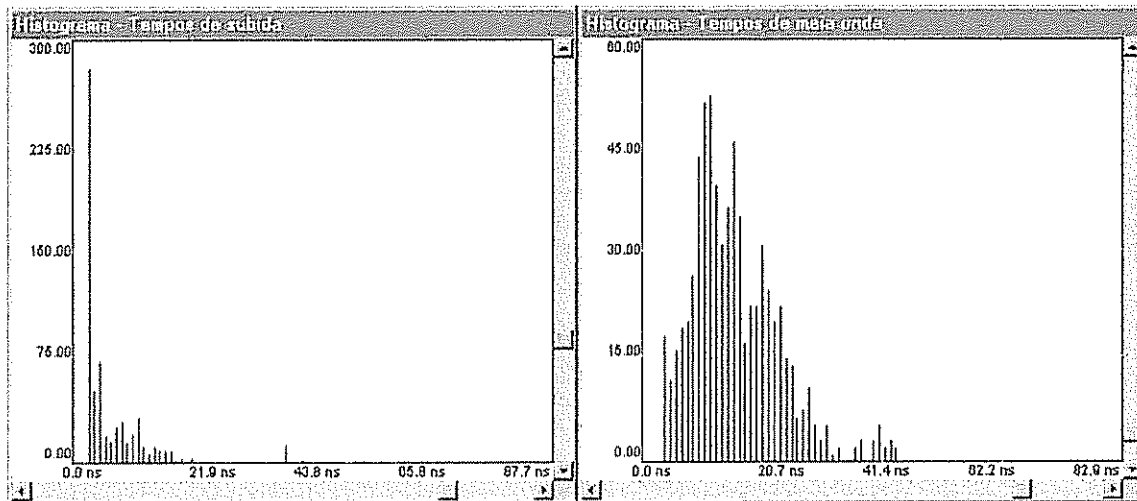


Figura 3 2: histogramas de tempos de subida e tempos de meia onda

O trabalho desenvolvido buscou possibilitar o uso de ambas as análises em um mesmo sistema de medição. As características necessárias ao instrumento de medição e do sistema como um todo serão explanadas em capítulos posteriores, bem como as características particulares da aquisição de descargas em ar e em sólidos.

### 3.2 – Aquisição de conhecimento sobre o fenômeno

A capacidade de inferir o tipo de defeito e o nível de degradação presentes em um sistema de isolamento é obtida através de anos de experiências com ensaios realizados nos laboratórios de alta tensão. Em geral, os técnicos responsáveis pelas avaliações nestes laboratórios conseguem perceber nuances presentes nos resultados das medições que passariam despercebidas a um leigo e, com isso, conseguem determinar se o equipamento está em bom estado ou deve ser retirado para manutenção. Frequentemente, estas análises levam em conta parâmetros como as cargas máximas transferidas, o formato da distribuição das descargas, o tempo de uso do equipamento, fabricante e modelo, entre outros. Estes parâmetros fazem parte da base de

conhecimento sobre a qual o técnico trabalha e que permite que ele possa fornecer o diagnóstico.

Para que um sistema de diagnóstico automatizado consiga atingir este nível de especialização são necessários também anos de experiência do engenheiro responsável pelo seu desenvolvimento. Além disto, o método de desenvolvimento do sistema deve estar baseado em uma sólida base científica, sendo que a metodologia aplicada deve ser explícita e bem documentada.

A metodologia que foi proposta para o desenvolvimento deste trabalho, visto em sua totalidade, baseia-se em 3 estágios de informação [17]: detecção, classificação e localização. Estes três estágios representam uma visão ampla do desenvolvimento, uma vez que qualquer sistema que se preste a avaliar um isolamento e realizar um diagnóstico sobre seu estado deve possuir estas três possibilidades.

O sistema de avaliação de descargas parciais desenvolvido está fortemente relacionado aos dois primeiros estágios relatados. Os métodos de detecção das descargas foram apresentados no capítulo 2, sendo que características particulares às detecções em gases e sólidos serão apresentadas em capítulos subsequentes, onde será mais conveniente. O estágio de classificação dos resultados é feito com base no estudo do comportamento das descargas parciais em diversas configurações de campo elétrico, em modelos de laboratório ou através da inserção de defeitos em equipamentos reais. Este estágio também está dividido em três etapas, que serão apresentadas na próxima seção. Os resultados obtidos de tais estudos, juntamente com informações particulares do equipamento sob ensaio, formam a base de conhecimento utilizada pelo sistema para efetuar diagnósticos sobre o estado do isolamento. A terceira etapa não foi abordada neste trabalho.

A etapa de classificação dos defeitos é, com grande ênfase, a mais complexa das três. Para atingir o ponto de realizar diagnósticos precisos baseados em uma aquisição esporádica, o banco de dados do sistema deve possuir informações muito vastas, caracterizando defeitos diferentes em diferentes tipos de isolamento e, o que é com certeza mais complexo, qual o nível de degradação correspondente à medição realizada. Este nível de especialização é obtido somente após anos de experiência e quando há a possibilidade de trabalhos contínuos na área, como é o caso em laboratórios de alta tensão, em que frequentemente são realizados ensaio de avaliação.

O método de levantamento do conhecimento para classificação das descargas parciais é apresentado na seção seguinte.

### **3.3 – Classificação de padrões de Descargas Parciais**

#### *3.3.1 – Classificação de padrões*

A classificação de padrões de descargas parciais visa relacionar o resultado obtido do ensaio de um equipamento de alta tensão real com medições realizadas anteriormente em modelos de defeitos estilizados. Como será visto a seguir, este modelamento de defeitos é realizado em três etapas. O intuito deste procedimento é permitir que o resultado do ensaio possa ser comparado ao resultado obtido do modelo e, assim, que se possa determinar qual é o defeito presente no isolamento e se o nível de degradação está crítico ou não.

Como visto na seção 3.1, dois tipos de análises serão utilizadas para a avaliação do isolamento: a análise em fase e em tempo. A análise em fase gera uma distribuição de descargas parciais relativa à fase da tensão de alimentação, enquanto a análise em tempo gera histogramas dos tempos de subida e tempos de meia onda. Estas

modificações na geometria da cavidade e, conseqüentemente, no campo elétrico presente. Desta forma, entende-se que uma distribuição de descargas pode ser utilizada na identificação de um defeito específico e, mais ainda, da evolução do arvorejamento presente no dielétrico. Pelo fato de os padrões gerados poderem identificar o tipo de defeito presente, estes passaram a ser conhecidos como “fingerprints”, ou impressões digitais. As figuras 3.3 e 3.4 apresentam dois padrões de descargas parciais, obtidos em ar e em sólido. Pode-se observar grandes diferenças no comportamento das descargas, para os dois tipos de isolamento, que podem ser usadas na classificação do tipo de dielétrico em que estas ocorrem.

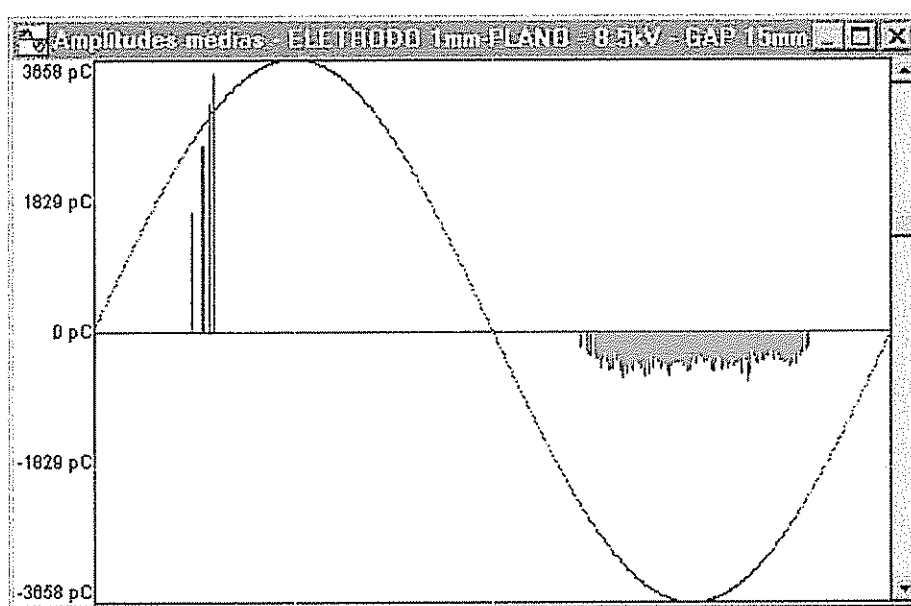


Figura 3 3: distribuição de descargas parciais no ar.

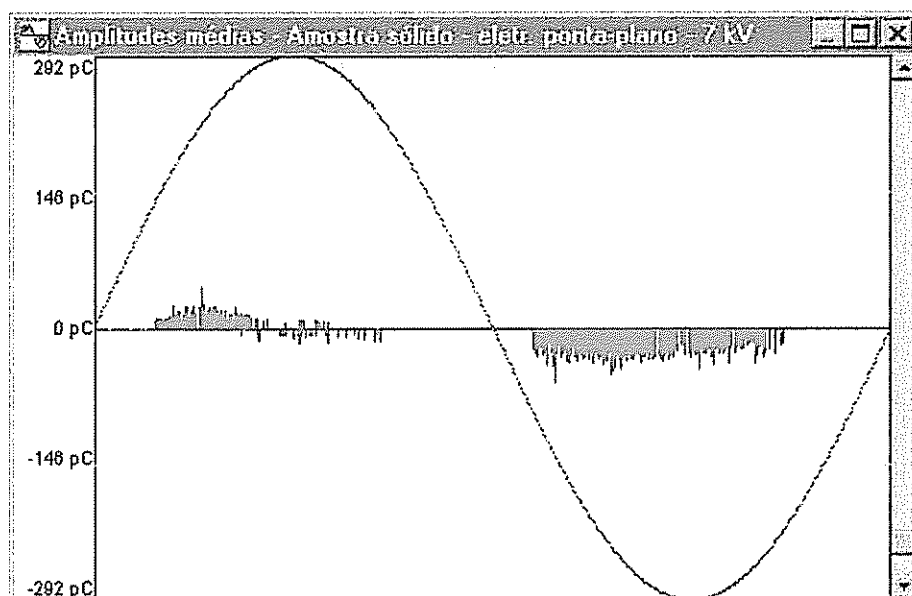


Figura 3 4: distribuição de descargas parciais em isolamento sólido

A classificação dos padrões, portanto, busca relacionar o formato das distribuições obtidas de um ensaio em um equipamento real com distribuições obtidas de defeitos estilizados, inferindo assim qual o defeito presente e o nível de degradação do dielétrico. O relacionamento entre os padrões é feito através de ferramentas estatísticas que permitem que se possa transformar em números as variações observadas naqueles. As ferramentas estatísticas utilizadas no trabalho são descritas no apêndice 1.

Atualmente, sistemas completos de análise de descargas parciais têm utilizado algoritmos de inteligência artificial com o intuito de automatizar o processo de classificação dos padrões e, portanto, gerar um diagnóstico automático do isolamento sob ensaio. Alguns autores têm relatado resultados positivos com estes sistemas [30, 31, 32]. De modo geral, o método utiliza os padrões gerados pelos defeitos estilizados no treinamento das redes de inteligência artificial, sendo considerados a base de conhecimento da rede. Por fim, a rede é submetida a um padrão genérico, obtido do ensaio de um equipamento, e deve gerar o diagnóstico do seu isolamento. Um dos objetivos deste trabalho é iniciar a construção de um banco de dados para o treinamento

futuro de uma rede de inteligência artificial, bem como possibilitar a sua expansão através de novos ensaios.

### 3.3.2 – Modelagem de defeitos

O processo de modelagem de defeitos que possam estar presentes no isolamento dos equipamento elétricos também é bastante complexo, tendo em vista que o comportamento das descargas parciais varia com uma série de parâmetros independentes e que vários tipos de imperfeições na construção de um equipamento podem gerar campos localizados e proporcionar a ocorrência das descargas. A estratégia utilizada neste trabalho baseia-se em três níveis de modelamento, propostos por Kreuger em 1993 [17]:

- a) Caracterização de defeitos estilizados: estes defeitos são criados em pequenas amostras de materiais utilizados no isolamento dos equipamentos e buscam representar as situações reais que possam ocorrer nos mesmos. Procura-se, nesta fase, modelar o defeito real e ao mesmo tempo manter uma situação em que se tem controle sobre uma maior parte das variáveis envolvidas na medição das descargas. Esta fase também é importante para a aquisição de experiências e o estudo acadêmico do fenômeno. A relação com o sistema real é pequena, porém o estudo serve de base para os níveis posteriores.
- b) Modelos industriais: são modelos de defeitos inseridos em equipamentos reais, tais como cavidades em cabos coaxiais ou partículas suspensas em sistemas isolados a gás. Nesta fase ocorre uma maior aproximação entre o modelo fabricado e a situação real. Algumas variáveis reais passam a fazer parte do processo de medição, como por exemplo os efeitos de atenuação e reflexão de onda em equipamentos eletricamente grandes. Outros tipos de avaliações podem ser estudadas, como a presença de múltiplas fontes de descargas ou o efeito da mudança do local de medição do sinal. Os modelos podem ser construídos o mais próximo possível das situações reais, porém não é possível garantir que todas as variáveis estejam sob

controle. Deste modo, estes modelos se aproximam da situação real, mas não englobam todas as possibilidades que possam ocorrer

- c) Medições em equipamentos reais: nesta fase o conhecimento e os dados adquiridos nas fases a) e b) são testados em situações reais. Medições feitas em equipamentos sob suspeita são analisadas utilizando-se os dados adquiridos anteriormente e um diagnóstico do estado de degradação do isolamento é obtido. A possibilidade de confirmação da veracidade do diagnóstico nem sempre é possível, uma vez que isto pode implicar na abertura do equipamento ou mesmo a destruição de algum componente. No entanto, sempre que isto for possível deve ser feito, como forma de se obter continuamente dados e conhecimento, possibilitando a evolução do sistema. Outra estratégia utilizada é a comparação do diagnóstico obtido com o emitido por um especialista. Obviamente, caso os diagnósticos sejam conflitantes, alguma forma de averiguação torna-se necessária. Esta fase requer vários anos de experiência prática já que nem sempre se tem a oportunidade de atuar no equipamento para verificação do diagnóstico.

O trabalho desenvolvido até este ponto relaciona-se à primeira fase do processo de classificação, ou seja, a caracterização do comportamento das descargas parciais em defeitos estilizados. Conforme será visto no capítulo 5, o comportamento das descargas parciais em ar foi estudado através da construção de um conjunto de eletrodos de vários diâmetros, para que as variações na distorção do campo elétrico possam ser relacionadas aos padrões de descargas observados. O comportamento das descargas parciais em materiais sólidos será estudado através da inserção de bolhas entre dois eletrodos localizados no interior do isolamento. Este estudo busca caracterizar as descargas nos sólidos bem como identificar as modificações que possam ser percebidas nos padrões devido ao crescimento de arvorejamentos. O estudo de sólidos é relatado no capítulo 6.



### 3.4 – Operadores estatísticos

Como mencionado em seções anteriores, a análise do tipo de defeito presente no isolamento do equipamento de alta tensão é feita com base no formato dos padrões gerados pelas descargas parciais, tanto com relação à fase quanto ao tempo. Entretanto, para efeito da comparação dos formatos e, principalmente, para a caracterização da evolução de arvorejamentos através das modificações observadas naqueles, é necessária alguma forma de quantização desta variação. Esta quantização visa traduzir em números as variações observadas, de forma a permitir a sua detecção ou comparação com padrões gerados anteriormente.

A quantização do formato das distribuições das descargas foi obtida utilizando-se ferramentas estatísticas aplicadas à distribuição [17, 34]. As ferramentas utilizadas são largamente aplicadas no campo da estatística para o estudo de distribuições de frequência e a determinação de sua similaridade com a distribuição normal ou gaussiana, que é a mais observada quando se lida com variáveis aleatórias. Dependendo do grau de similaridade da distribuição em relação à normal, outras ferramentas podem ser aplicadas sobre a mesma, bem como pode-se fazer inferências sobre a população em estudo. Por exemplo, se for determinado que a distribuição é do tipo normal, pode-se dizer que cerca de 95 % das amostras estão no intervalo de  $\pm 2$  desvios padrões. Entretanto, se a distribuição não for similar à normal esta afirmação não é mais válida.

Entre os vários operadores que poderiam ser utilizados alguns foram escolhidos, com base no tipo de informação obtido. Os operadores escolhidos basicamente retornam informações sobre o formato das distribuições e a localização do seu centro em relação ao período da senóide de alimentação. A definição de cada operando, bem como comentários e explicações sobre seus valores de retorno, podem ser encontrados no Apêndice 1.

Este capítulo, juntamente com o capítulo 2, buscou apresentar a base teórica para a medição de descargas parciais e a sua posterior análise para a determinação do estado de degradação a que o isolamento está sujeito. Foram apresentadas as técnicas de análise utilizadas no desenvolvimento do trabalho, em fase e em tempo. Os procedimentos adotados para a aquisição do conhecimento sobre o fenômeno, nos quais o trabalho se baseia, foram explicitados. Por fim, foi apresentado o conceito de classificação de padrões e como esta ferramenta pode ser utilizada na avaliação do estado do isolamento. Os capítulos subsequentes relatam o desenvolvimento do trabalho e os resultados obtidos em ar e em isolamentos sólidos.

## Capítulo 4

# Sistema de aquisição de Descargas Parciais

### 4.1 - Introdução

O sistema de aquisição de descargas parciais desenvolvido baseou-se em um osciloscópio digital programável controlado por computador através de uma interface de comunicação GPIB. Este sistema permitiu a digitalização dos sinais de descargas parciais e seu armazenamento para posterior processamento. Foi desenvolvida uma interface gráfica que permite a configuração de parâmetros do osciloscópio e do ensaio, de forma a automatizar completamente o processo de coleta dos dados. Esta interface apresenta também os resultados dos ensaios na forma de uma série de gráficos de distribuição em fase e histogramas. Por fim, a análise estatística das distribuições é apresentada através dos operadores estatísticos citados no capítulo 3.

Este capítulo apresenta o sistema de aquisição desenvolvido, relatando o controle do osciloscópio, o desenvolvimento da interface gráfica e os resultados obtidos. Problemas e limitações observados com relação ao sistema serão abordados.

## 4.2 – O método de aquisição utilizado

Em capítulos anteriores foi relatado que os pulsos de corrente gerados pelas descargas parciais possuem tempos de frente muito pequenos, da ordem de nanosegundos. O espectro de frequências associado a pulsos deste tipo atingem facilmente a casa das centenas de megahertz, razão pela qual o sistema de medição deve ser muito bem projetado, através do cuidado com as conexões, com o aterramento e com o elemento sensor. Da mesma forma, para possibilitar a análise no tempo dos pulsos de descargas, o equipamento digitalizador do sinal deve possuir características técnicas condizentes com o espectro gerado, de forma a não limitar as frequências de ordem mais alta e distorcer o sinal a ser adquirido.

O sistema desenvolvido tem a possibilidade de adquirir pulsos cujo espectro de frequências esteja próximo a 500 MHz [20]. Como poderá ser observado a seguir, esta faixa de passagem é bastante satisfatória para a aquisição de descargas parciais quando o meio dielétrico é o ar. Porém, foram observados alguns problemas com relação às descargas em sólidos, que também serão relatados.

Além da alta faixa de passagem analógica, o medidor precisa ter taxas de aquisição condizentes com o espectro de frequências a ser adquirido, de forma a atender ao critério de Nyquist [27, 19]. Como a taxa de aquisição máxima do osciloscópio é de 1 GS/s e a sua faixa de passagem é de 500 MHz, considerou-se desnecessário o uso de filtros anti-aliasing, uma vez que o próprio medidor filtra o espectro de frequências na metade de sua taxa de aquisição.

Entretanto, a utilização de taxas de aquisição tão elevadas introduz um novo problema para a aquisição de descargas parciais: o volume de dados gerado é muito grande. Por exemplo, utilizando-se a taxa de 1GS/s, teoricamente a cada segundo o osciloscópio gera 1 GB de dados, que devem ser transferidos para o computador e processados. Para realizar a aquisição de um sinal durante um segundo seria necessário

ter 1 GB de memória local do osciloscópio, além de uma interface de comunicação e barramentos que trabalhassem com taxas de transferência altíssimas. De acordo com o padrão IEEE 488.2, a taxa máxima da interface GPIB é de 1 MB/s, fazendo com que a transferência deste volume de dados torne-se um gargalo no desempenho do sistema. Além disto, o tempo decorrido até a conclusão do ensaio aumentaria muito e tornaria o sistema pouco operacional.

O osciloscópio utilizado possui somente 250 kB de memória local, fazendo com que o intervalo de tempo máximo em que se consegue fazer uma aquisição contínua, à taxa de 1 GS/s, seja:

$$t = \frac{250kB}{1GB/s} = 250\mu s \quad (4.1)$$

Portanto, a esta taxa de aquisição e com este montante de memória local, é impossível adquirir um ciclo de senóide completo, que possui período de aproximadamente 16,7 ms (60 Hz).

Duas soluções poderiam ser adotadas para resolver o problema: a primeira seria o aumento da capacidade de memória local do osciloscópio. Esta solução foi descartada devido ao alto custo envolvido e ao fato de que o osciloscópio possui uma limitação de no máximo 2MB de memória, o que permitiria a aquisição contínua de apenas 2 ms, ou seja, 1/8 do período da senóide. A outra solução seria reduzir a taxa de aquisição. Embora este procedimento possa ser utilizado na avaliação em fase das descargas parciais, a avaliação em tempo ficaria comprometida porque a taxa de aquisição estaria abaixo da necessária para atender ao critério de Nyquist. Portanto, as duas opções foram consideradas insatisfatórias para o problema.

A solução adotada foi a divisão do período da senóide de alimentação em janelas temporais, que possuem curto tempo de duração, portanto pequeno número de

pontos adquiridos. Entretanto, a taxa de aquisição destes pontos permanece a mais alta possível, de forma que a aquisição para análise em tempo é garantida. A técnica de divisão em janelas temporais é ilustrada na figura 4.1.

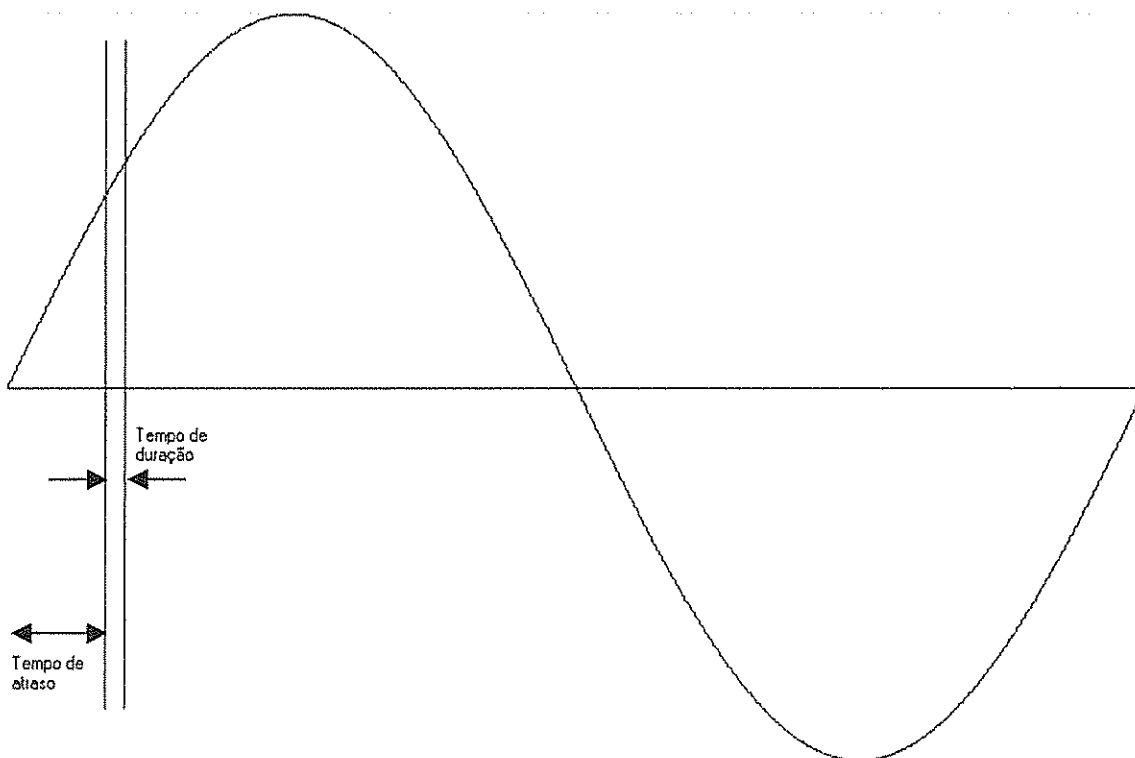


Figura 4.1: Divisão do período da senoide em janelas temporais

Esta técnica foi implementada através do uso do “disparo atrasado” (Delayed Trigger), um dos recursos disponíveis no osciloscópio. O início da aquisição ocorre quando a tensão de alimentação (senoidal) passa por 0V. O atraso é inicializado em 0s. Após o primeiro disparo, dados são adquiridos, transferidos para o computador, processados e armazenados. O atraso do trigger é então configurado para que a próxima aquisição se inicie somente frações de segundo depois de a senoide atingir novamente o nível de 0V. Decorrida esta fração de tempo, inicia-se a nova aquisição e, em seguida, os novos dados são transferidos para o computador. Desta forma, as aquisições são feitas sempre em uma janela de tempo que possui largura constante e se desloca em

relação ao ponto de cruzamento da senóide com o nível de 0V. O procedimento é repetido até que todo o ciclo da senóide seja varrido.

A largura da janela, ou o tempo de duração da aquisição, depende do número de pontos adquiridos e da taxa escolhida. O programa permite que o instrumento seja configurado para adquirir pulsos de descargas em várias taxas diferentes. Desta forma, é feito um ajuste do número de pontos de acordo com a taxa desejada, de modo que o tempo de duração da janela permaneça constante. Ficou estabelecido que o período da senóide fosse dividido em 1667 janelas, cada uma com 10  $\mu$ s.

Outra estratégia foi adotada para possibilitar a redução do volume de dados gerados. A cada aquisição feita em uma janela, o programa verifica a ocorrência de pulsos de descargas parciais e, ao encontrar um pulso, determina o seu valor de pico, o tempo de subida e o tempo de meia onda. Este procedimento é feito para cada pulso detectado no vetor adquirido, uma vez que vários pulsos podem ocorrer no intervalo de 10  $\mu$ s da janela temporal. Após a análise do vetor, os dados de amplitude, tempos de frente e meia onda são armazenados em disco, e uma nova aquisição é feita. Desta forma, os parâmetros relevantes para a análise das descargas parciais são determinados em tempo real, sendo desnecessário o armazenamento dos dados adquiridos do osciloscópio, o que diminui consideravelmente o volume de dados armazenados.

A análise das descargas parciais é feita com base nas médias das amplitudes medidas em cada janela temporal. Quando um arquivo de dados, armazenado previamente, é aberto, o sistema faz o cálculo de tais médias e apresenta o resultado em um gráfico (veja seção 4.3). Assim, amplitudes individuais não tornam-se significativas, mas sim o resultado do conjunto obtido em cada janela. O fato de que o procedimento na realidade faz amostragens em partes da senóide de alimentação não invalida a análise final.

A figura 4.2 apresenta um vetor do osciloscópio contendo descargas parciais geradas em ar.

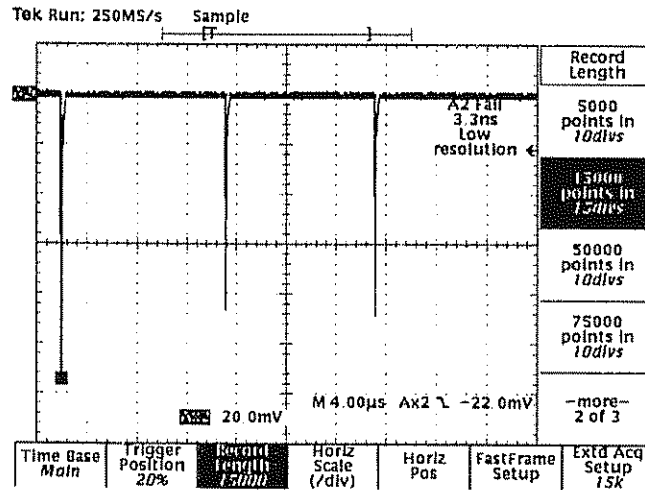


Figura 4 2: descargas parciais medidas em ar à pressão atmosférica

O uso das taxas de aquisição relatadas parece ser suficiente para a aquisição de dados de descargas parciais em ar. Entretanto, a aquisição em isolamentos sólidos mostrou-se estar muito próxima do limite de operação do equipamento. A figura 4.3 apresenta um pulso de descarga parcial adquirido em sólido. A aquisição é apresentada através da intensificação as amostras obtidas, a uma taxa de 1 GS/s.

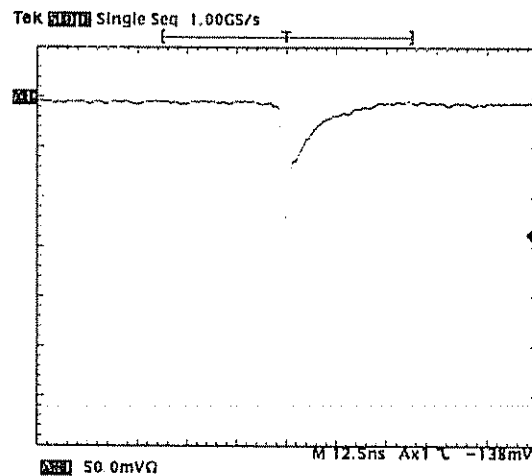


Figura 4 3: pulso de descarga parcial adquirido em sólido a 1 GS/s



Na frente da onda o número de aquisições é muito pequeno, da ordem de 2 aquisições, devido ao tempo de frente ser muito reduzido. Na figura aparecem cerca de cinco pontos, porque o osciloscópio apresenta os pontos intermediários utilizados para a interpolação, mas ocorreram apenas duas amostras. Este pequeno número de aquisições pode resultar em erros grandes no cálculo do tempo de frente, que é feito com base na técnica de 30-90 % . Esta limitação relaciona-se à taxa máxima de aquisição disponível no equipamento, sendo portanto impossível contorná-la, a não ser pela troca do mesmo. Com o sistema trabalhando no limite, a determinação de parâmetros temporais dos pulsos adquiridos em isolamento sólido precisa ser melhor avaliada.

### **4.3 – Interface gráfica**

Uma interface gráfica foi desenvolvida para permitir que se fizesse de maneira facilitada o controle do ensaio, a apresentação dos dados coletados e dos resultados obtidos da análise estatística. A figura 4.4 apresenta a tela de entrada da interface, com um arquivo de dados aberto.

Os valores de amplitude das descargas parciais coletados durante o ensaio são apresentados em um gráfico através de pontos verdes posicionados em relação à fase da tensão de alimentação. Este gráfico pode ser visualizado na figura 4.4, sendo o que está na parte superior esquerda da interface.

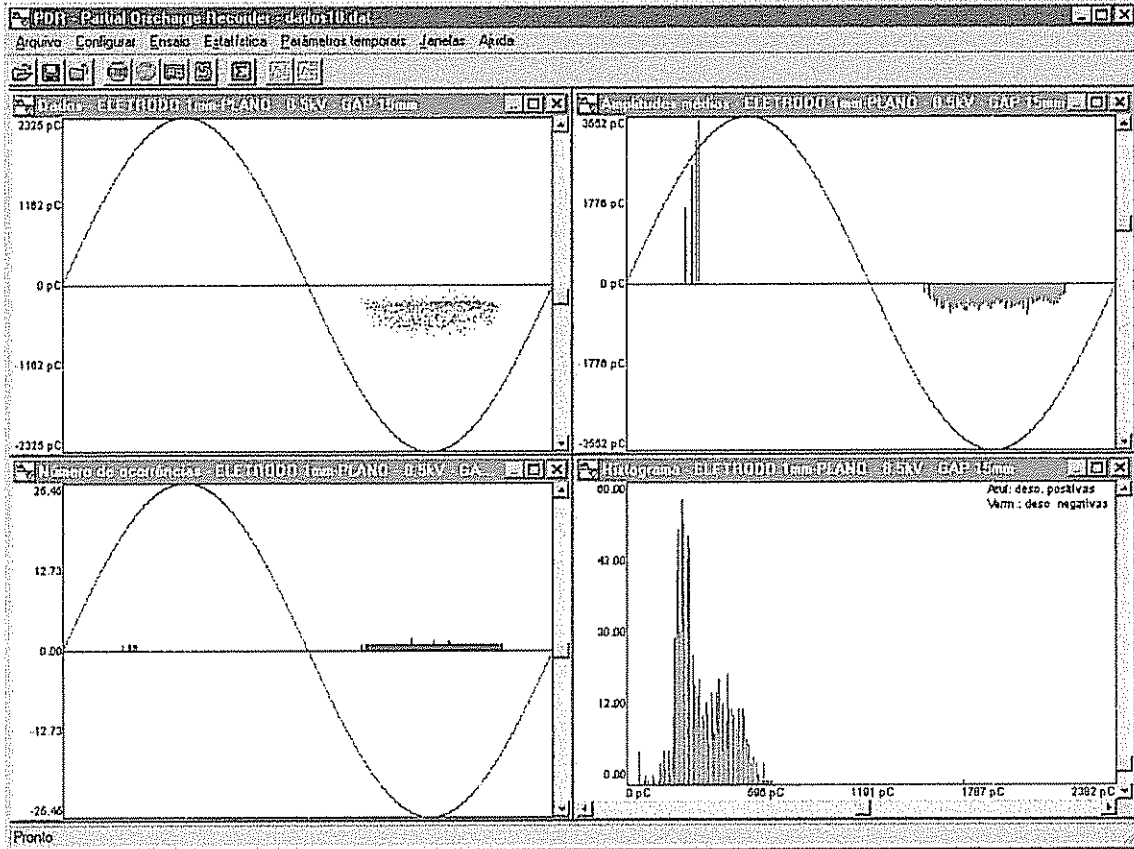


Figura 4 4: interface gráfica

Para cada janela temporal coletada durante o ensaio são calculados a média das amplitudes e o número de ocorrências de descargas. Estes dados são apresentados em dois gráficos separados, um em vermelho, na parte superior direita da interface, e outro em azul, na parte inferior esquerda. A análise estatística dos dados, como o cálculo do skewness, kurtosis e correlação cruzada (apêndice 1), é feita com base nestas duas distribuições, e não sobre a distribuição dos dados originais. Este procedimento é adotado para diminuir o volume de dados sobre os quais os operadores são aplicados e, assim, reduzir o número de operações matemáticas realizadas. Caso contrário, como o número de pulsos de descargas parciais pode chegar à ordem de milhares, dependendo das condições do ensaio, o cálculo dos operadores estatísticos poderia levar muito tempo.

A figura 4.5 apresenta em maiores detalhes os gráficos da distribuição das médias e número de ocorrências por janela de fase

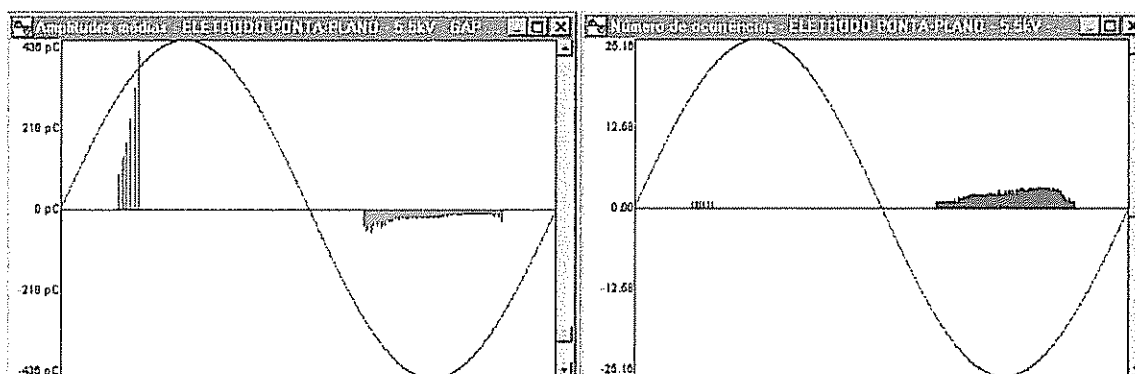


Figura 4.5: distribuição de amplitudes médias e número de ocorrências por janela de fase Descargas parciais em ar a pressão atmosférica

Em adição às distribuições em fase das descargas parciais, um quarto gráfico apresenta um histograma das amplitudes coletadas. Este gráfico foi inserido por razões históricas e para que o operador possua mais uma ferramenta de análise do equipamento sob ensaio. A análise estatística discutida no capítulo 3 e realizada através dos operadores apresentados no apêndice 1 não se aplica a este histograma. A figura 4.6 mostra o histograma correspondente à distribuição apresentada na figura 4.5.

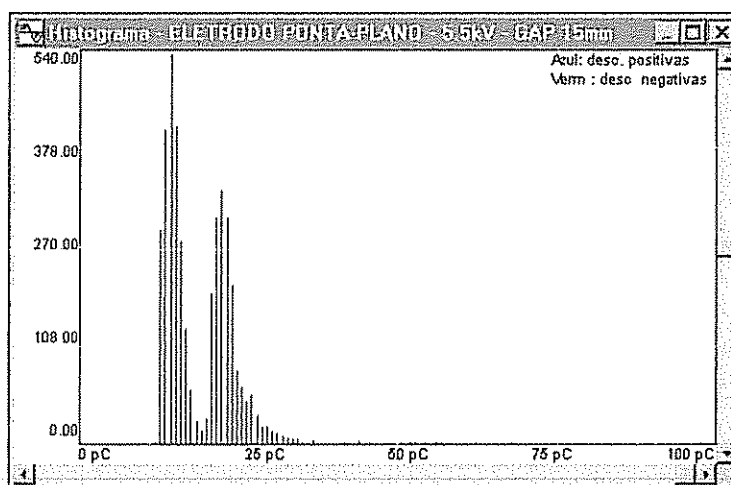


Figura 4.6: distribuição de frequência das amplitudes das descargas parciais referentes à figura 4.5

Por fim, a análise no tempo dos parâmetros dos pulsos é feita através de dois histogramas de tempos de subida e tempos de meia onda. Estes gráficos podem ser observados na figura 4.7. A análise destes parâmetros através dos histogramas parece ser a mais correta porque permite avaliar quais tempos de subida e meia onda ocorrem com maior frequência. O deslocamento destas distribuições ao longo do eixo horizontal e a mudança em suas formas podem caracterizar a evolução de arvorejamentos no sólido, podendo permitir a sua detecção.

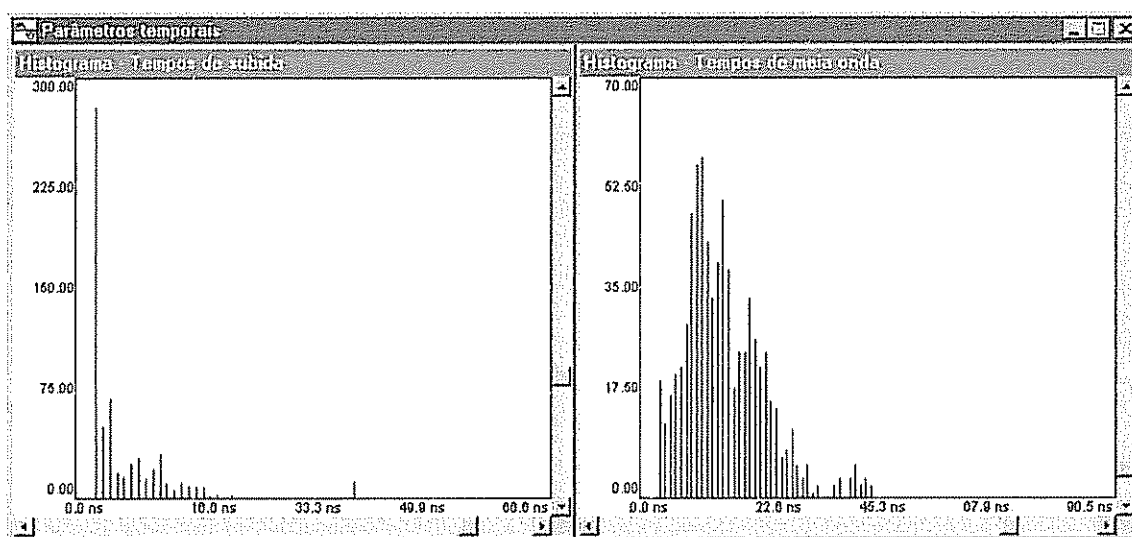


Figura 4.7: histogramas dos parâmetros temporais dos pulsos.

#### 4.4 – Procedimento de ensaio

A interface gráfica apresentada pelo programa incorpora todo o controle do ensaio. Os parâmetros relevantes para configuração do osciloscópio e do ensaio são introduzidos em caixas de diálogo e posteriormente utilizados durante a aquisição dos dados.

O primeiro passo para a realização de um ensaio de descargas parciais é a determinação da calibração do sistema. Este procedimento foi apresentado no capítulo 2 e será melhor detalhado nos capítulos 5 e 6, que tratam da aquisição de descargas

parciais em gases e sólidos. Esta calibração é feita separadamente, utilizando-se somente o osciloscópio. Após a determinação da constante de proporcionalidade, deve-se anotá-la para inserção em uma caixa de diálogo apresentada a seguir.

Ainda antes do início do ensaio deve-se determinar os níveis de descargas parciais que serão detectados. Este passo busca definir qual a escala vertical que será utilizada pelo osciloscópio, com base nas máximas amplitudes observadas, e qual deve ser o limite inferior que determina se o sinal adquirido é um ruído ou uma descarga parcial. Este limite inferior será utilizado pelo algoritmo para determinar a ocorrência de uma descarga em um vetor de dados adquirido.

Uma vez determinados estes parâmetros, pode-se iniciar o ensaio. O primeiro passo executado pelo procedimento é a abertura de uma caixa de diálogo que permite a escolha do nome do arquivo de dados a ser salvo. Logo após, é apresentada a caixa de diálogo vista na figura 4.8. Nesta caixa são introduzidos os dados de configuração do osciloscópio. Entre as opções disponíveis, as mais relevantes para o ensaio são a escolha da taxa de aquisição, dos canais onde serão adquiridos as descargas parciais, a tensão de alimentação e a configuração das escalas verticais destes canais. A configuração do canal das descargas parciais permite determinar a posição vertical do traço do canal. Esta possibilidade é particularmente interessante na aquisição de descargas parciais em gases, situação na qual observou-se que os pulsos possuem a mesma polaridade da tensão de alimentação aplicada. Assim, durante o ciclo positivo da senóide pode-se posicionar o nível de 0V do canal na parte de baixo do display do osciloscópio, o que permite o uso de uma escala menor e aumenta a resolução da aquisição. Durante o ciclo negativo pode-se inverter o processo. De forma geral, este procedimento também pode ser utilizado na aquisição de dados quando o meio dielétrico é sólido. Entretanto, neste caso observa-se a ocorrência de pulsos com polaridades invertidas com relação à tensão aplicada, o que demanda que o usuário tenha certo cuidado para que a escala escolhida não seja ultrapassada.

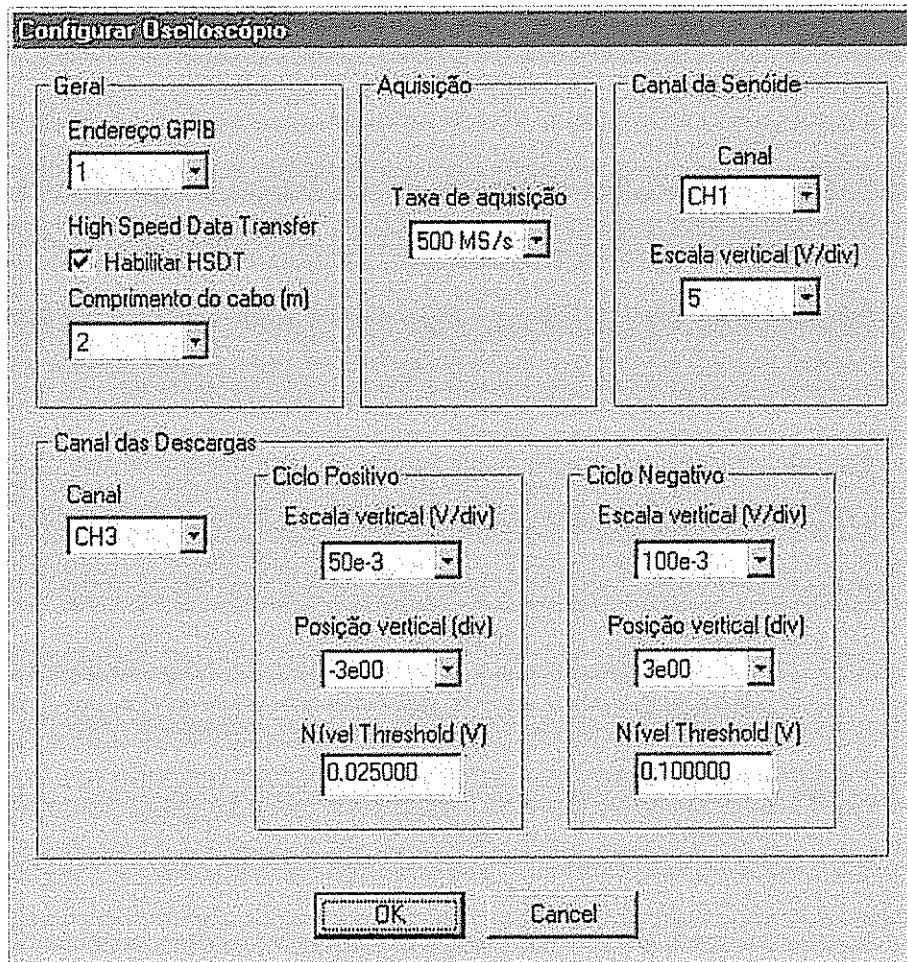


Figura 4 8: caixa de diálogo “Configurar Osciloscópio”

O sistema permite a aquisição dos dados utilizando a técnica de transferência de dados em alta velocidade (HSDT). Esta técnica foi desenvolvida pelo fabricante da interface de comunicação GPIB, que afirma possibilitar atingir taxas de transferência de até 8 MB/s. A habilitação deste processo é feita informando ao sistema o comprimento do cabo de comunicação entre o computador e o osciloscópio.

Os níveis de “threshold” inseridos nesta caixa de diálogo são utilizados em uma das subrotinas do programa para determinar a ocorrência de descargas parciais, como pode ser visto na figura 4 9. A subrotina faz uma varredura do vetor de dados adquirido, comparando as amostras com o nível fornecido. Caso a amostra ultrapasse o

valor do nível, o algoritmo registra a ocorrência de um pulso de descarga e determina o seu valor de pico, bem como os tempos de subida e meia onda.

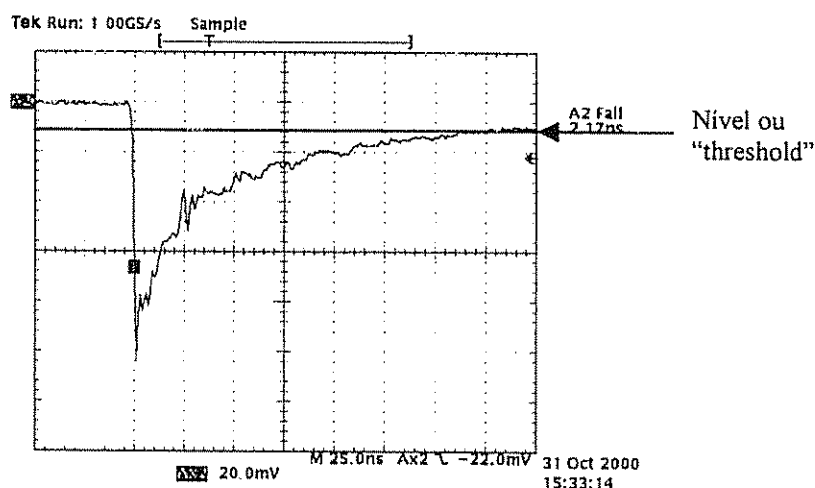


Figura 4 9: descarga parcial em ar e o nível utilizado para a detecção

Após a configuração do osciloscópio, o programa apresenta a caixa de diálogo vista na figura 4.10. Esta caixa permite a inserção de dados relativos ao ensaio corrente. Pode-se inserir um título, bastante útil para a identificação do tipo de amostra sob ensaio, entre outros dados relevantes. A constante de calibração do sistema, determinada anteriormente, é inserida nesta caixa de diálogo. O item “número de aquisições por janela de fase” permite que o programa realize de 1 a 15 aquisições consecutivas em cada janela de fase, de forma a aumentar o volume de dados adquiridos e melhorar o cálculo da média em cada janela. O aumento do número de aquisições tem como desvantagem o aumento do tempo de conclusão do ensaio, o que pode resultar em mudanças no comportamento das descargas durante o mesmo. O uso de 5 aquisições por janela tem se mostrado satisfatório. Por fim, a frequência da rede de alimentação pode ser escolhida entre 50 Hz e 60 Hz, o que permite maior flexibilidade do sistema caso este venha a ser utilizado em outros países da América do Sul.

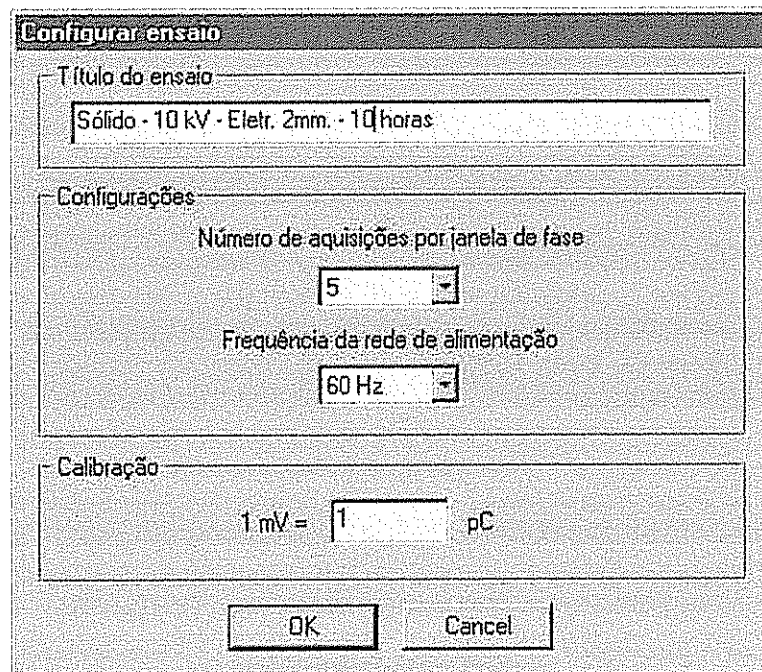


Figura 4 10: caixa de diálogo “Configurar ensaio”

Terminada a etapa de configuração, a subrotina realiza a medição do valor eficaz da tensão de alimentação aplicada ao sistema. O programa ajusta o osciloscópio para mostrar a senóide, o valor de tensão eficaz e de pico, para que o usuário possa ajustar a fonte de alimentação. O usuário deve, portanto, verificar **na tela do osciloscópio** os valores desejados e efetuar o ajuste necessário. O algoritmo aguarda a confirmação do ajuste através de uma caixa de diálogo.

Realizada a confirmação, o sistema inicia o procedimento de ensaio propriamente dito. O osciloscópio é configurado para realizar a aquisição utilizando o “delayed trigger” e os dados começam a ser adquiridos. A evolução do ensaio é apresentada através de uma barra de evolução, como pode ser visto na figura 4 11.



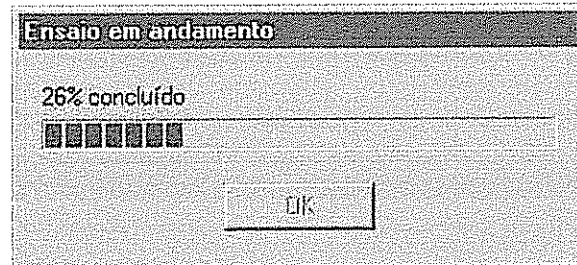


Figura 4.11: evolução do ensaio de descargas parciais

A parte de aquisição dos dados, iniciada após a etapa de configuração, foi montada em uma “thread”<sup>1</sup> diferente da principal, por dois motivos. Primeiro, o uso de diferentes threads otimiza a execução em um sistema operacional multitarefa, porque o sistema divide o tempo disponível pelo processador de forma igual entre as diversas tarefas que estão em execução. Segundo, e mais importante, caso a multitarefa não fosse utilizada, o programa ficaria indisponível para o usuário enquanto estivesse realizando a aquisição. Como um ensaio completo leva entre 10 e 50 minutos para ser realizado, dependendo do número de aquisições escolhido para cada janela, o programa ficaria dedicado à aquisição por todo este tempo. O uso da multitarefa permite ao usuário utilizar qualquer outra ferramenta do programa, como por exemplo abrir arquivos já gravados em disco, realizar análises estatísticas e gravar os dados em outro arquivo. Porém, não é possível iniciar um novo ensaio, uma vez que já há um em andamento.

O término do ensaio é relatado pela mesma caixa de diálogo apresentada na figura 4.11. Este procedimento pode ser visto na figura 4.12.

---

<sup>1</sup> Uma “thread”, ou “tarefa”, é uma parte de um programa computacional que executa de forma independente do programa principal, como se fosse um outro programa. Esta técnica permite otimizar ao máximo a execução de ambas as partes. N do a

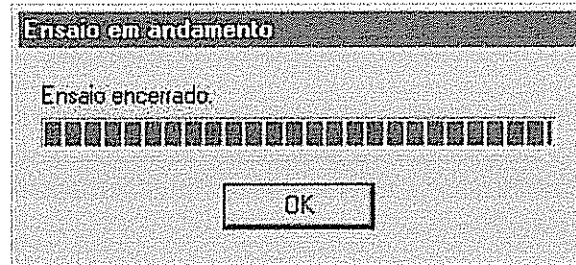


Figura 4 12: caixa de diálogo relatando o término do ensaio

Todo o programa foi desenvolvido em linguagem C++ [7], mas apenas em parte foi escrito numa visão de programação orientada a objetos, implementada pelo uso de uma lista encadeada para a determinação dos parâmetros dos pulsos adquiridos. O sistema utiliza o interface gráfica do Windows 95, 98, NT, através do uso das funções da sua API [29].

#### 4.5 – Relato das análises estatísticas

Como discutido no capítulo 3, a análise dos dados resultantes do ensaio de descargas parciais é feita com base em operadores estatísticos, que fornecem uma quantização do formato das distribuições e do seu posicionamento em relação ao ângulo de fase da tensão de alimentação. A interface gráfica apresenta o resultado destes operadores em uma caixa de diálogo, que pode ser vista na figura 4.13.

O sistema fornece, ao todo, 19 resultados de operadores para cada distribuição obtida de um ensaio, considerando-se a análise feita para os ciclos positivo e negativo da senóide separadamente, bem como o uso das distribuições de amplitude média e número de ocorrências. Além de apresentar os resultados, a caixa de diálogo oferece a opção de salvamento dos dados em um arquivo em disco, para que possam ser utilizados futuramente na automação do diagnóstico do ensaio.

Os resultados de análises estatísticas serão relatados no capítulo 7, após a análise da aquisição em ar e isolamentos sólidos.

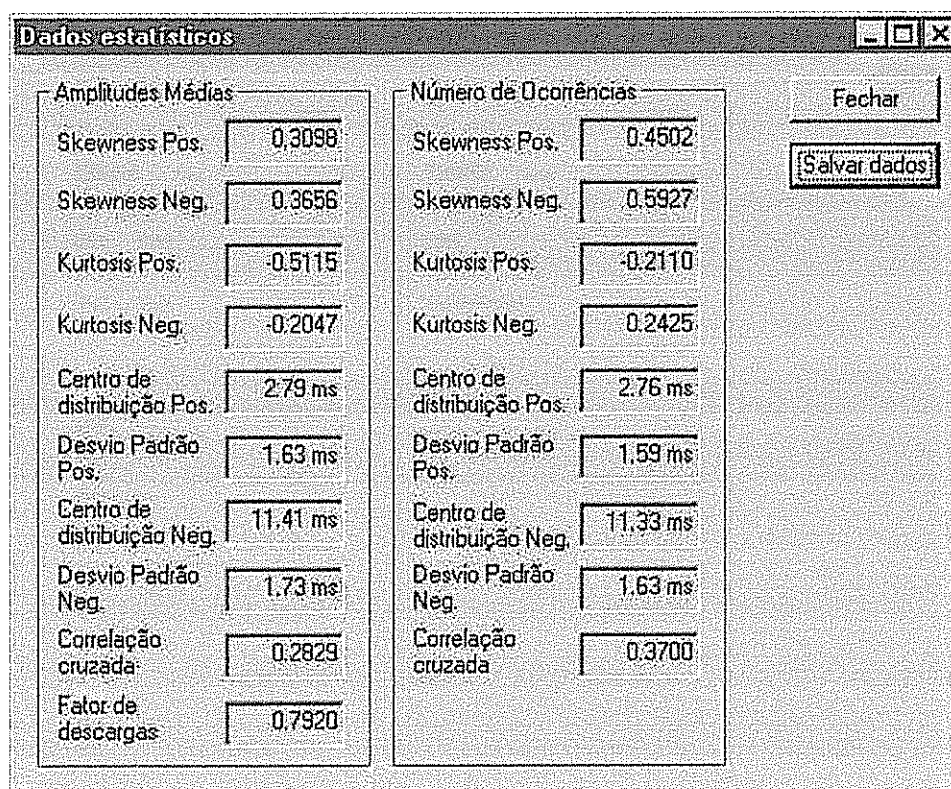


Figura 4 13: Caixa de diálogo “Dados estatísticos”

Neste capítulo o sistema de aquisição e análise dos dados de descargas parciais foi introduzido, para que posteriormente as análises em ar e dielétricos sólidos possam ser compreendidas. Foi apresentado método de aquisição utilizado e as razões para o seu uso. A interface gráfica foi introduzida, apresentando todas as informações decorrentes de um ensaio de descargas parciais. O procedimento de ensaio foi detalhado para possibilitar o uso do sistema futuramente com o mínimo de dúvidas possível. Enfim, foi feita a apresentação de resultados de ferramentas estatísticas aplicadas aos padrões coletados. Os capítulos seguintes relatam a aquisição de descargas parciais em ar e sólidos, feitas utilizando-se o sistema desenvolvido.

## Capítulo 5

# Medição de Descargas Parciais em ar

### 5.1 – Sistema de medição

#### 5.1.1 – Considerações gerais

No capítulo 2 foram apresentados os tipos de circuitos de medição utilizados para a detecção de descargas parciais. No trabalho desenvolvido utilizou-se o circuito apresentado na figura 2.2 (b) daquele capítulo. Por conveniência e para possibilitar um maior detalhamento do mesmo, o circuito é novamente apresentado na figura 5.1.

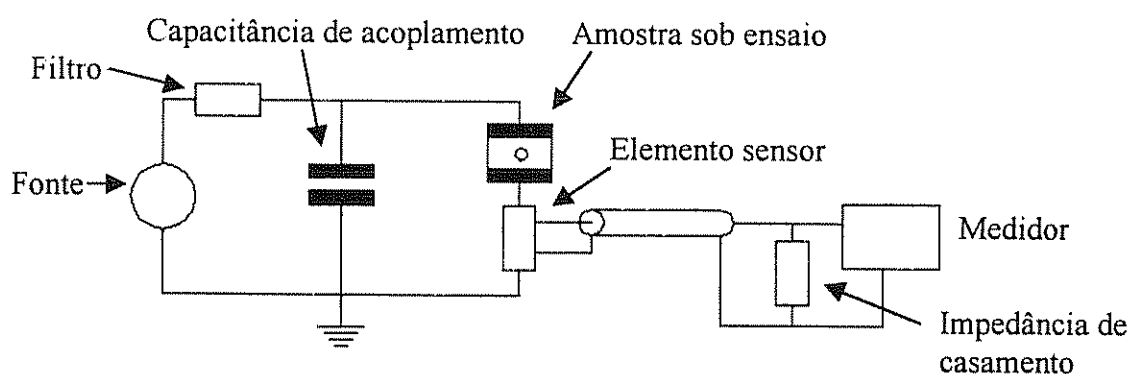


Figura 5.1: Circuito de medição de descargas parciais

Este circuito foi alimentado através de um transformador com relação de 110V / 15kV. Este foi alimentado no primário por um autotransformador, de forma a permitir o controle do nível de tensão aplicado. Este transformador é um equipamento especial, que possibilita baixa geração de ruídos eletromagnéticos e baixa distorção

harmônica da senóide no secundário. Além disso o seu tamanho reduzido proporcionou que o sistema completo ocupasse pouco espaço físico.

Para a filtragem de ruídos ou descargas parciais geradas na fonte de alimentação foi instalada uma bobina em série com um resistor. Este último permite a limitação da corrente no circuito caso ocorra alguma falha de isolamento. O resistor é composto simplesmente de um tubo de PVC cheio de água, com dois eletrodos esféricos instalados em suas extremidades. O seu projeto pode ser visto na figura 5.2. A utilização da bobina em série com o resistor insere uma alta impedância para componentes de frequência mais alta, que estão presentes em ruídos e descargas parciais. Assim previne-se que estes sinais, que porventura possam ocorrer na fonte de alimentação, atinjam o sistema de medição.

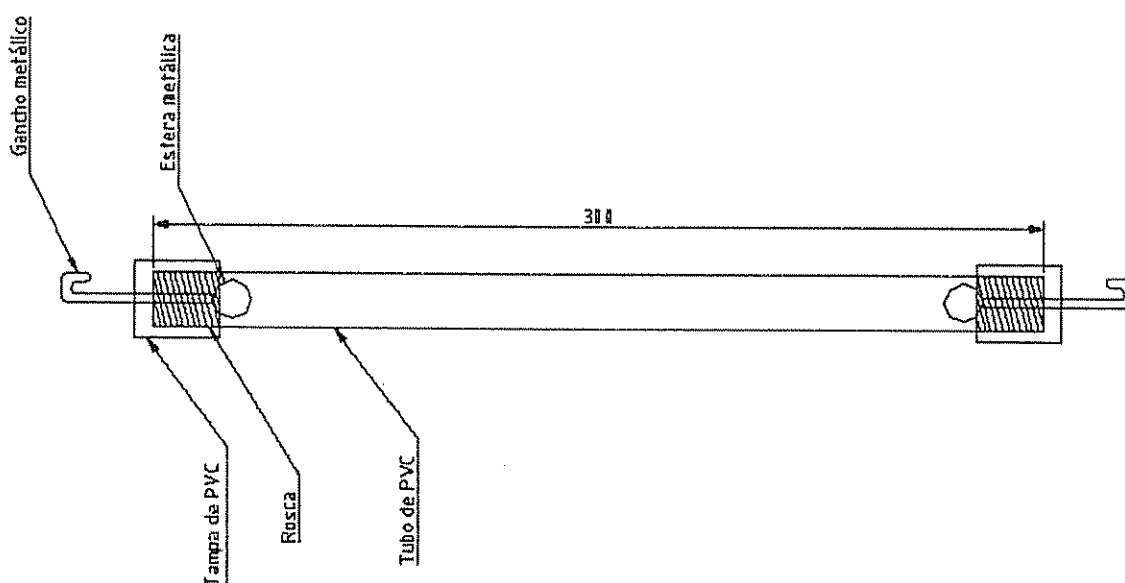


Figura 5 2: projeto do resistor de água

O capacitor de acoplamento utilizado é um capacitor com tensão nominal de 35 kV isolado a gás carbônico. O elemento sensor é um resistor de 50  $\Omega$  instalado no final do cabo coaxial que liga o osciloscópio ao sistema. Considerações a respeito deste resistor e a sua conexão ao sistema serão apresentadas em seções posteriores. Como

apresentado no capítulo 4, o medidor é um osciloscópio digitalizador com faixa de passagem analógica de 500 MHz e taxa de aquisição máxima de 1 GS/s.

A aquisição de pulsos de descargas parciais em ar foi feita através da montagem de diversas configurações de eletrodos metálicos no interior de uma câmara. Conforme será visto posteriormente, esta câmara também é utilizada na confecção das amostras de isolamento sólido. A aquisição de descargas em sólidos foi feita utilizando-se uma célula de medição com altíssima faixa de passagem, apresentada no capítulo 6.

Uma visão geral do sistema de medição é dada pela fotografia da figura 5.3. Nesta foto observa-se o transformador, a ponta de prova para medição da tensão da fonte e a câmara para medição de descargas em ar. O osciloscópio encontra-se instalado à esquerda da câmara, não podendo ser visualizado. Pode-se visualizar também o resistor de água. O circuito ainda apresentava-se sem a instalação da bobina e do capacitor de acoplamento.

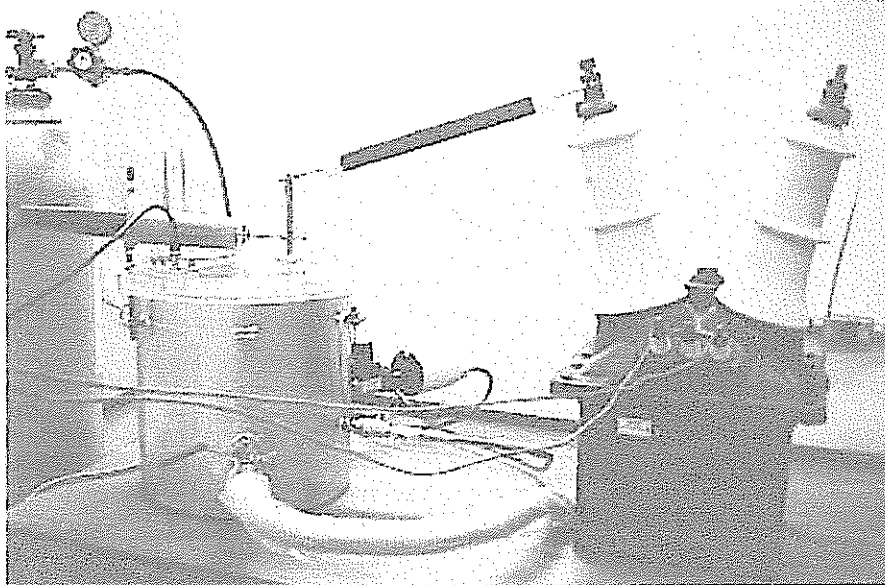


Figura 5 3: fotografia da montagem para geração de DPs em ar

Alguns cuidados devem ser tomados durante a montagem de um circuito de medição de descargas parciais, sobretudo caso seja objetivo do trabalho a análise temporal dos pulsos. A característica de alta faixa de passagem do sistema, apresentada no capítulo 2, baseia-se no circuito teórico visto na figura 2.6. Muito embora este circuito considere a presença de capacitâncias parasitas em paralelo ao transformador e à entrada do medidor, ele ignora a presença das indutâncias parasitas dos fios, sendo uma aproximação limitada do sistema real. Obviamente, o circuito de medição possui um limite de faixa de passagem superior, que é ditado por tais indutâncias parasitas. Embora geralmente este limite seja muito elevado para causar problemas em uma medição de descargas parciais ordinária, a aquisição de pulsos que permitam a análise temporal das descargas deve levar em conta estas características. Isto se deve ao fato de que os tempos de frente dos pulsos de corrente gerados pelas descargas correspondem a espectros de frequência que atingem facilmente a casa das centenas de megahertz. Caso o sistema não possua faixa de passagem condizente com este espectro a medição fica comprometida.

Para que a característica de alta faixa de passagem do sistema não seja prejudicada, as conexões entre os componentes devem ser muito bem feitas e com as menores distâncias possíveis. Deve-se utilizar condutores que possibilitem diminuir a indutância parasita do caminho percorrido pelo pulso de corrente. Para tanto, foram utilizadas fitas de cobre para conectar o capacitor de acoplamento à amostra e este conjunto ao aterramento.

O aterramento utilizado deve apresentar resistência de terra a menor possível. O uso de um único ponto de aterramento elimina problemas relacionados a loops de terra, que podem introduzir erros na determinação da tensão [28, 33].

Por fim, a transmissão do sinal até o medidor deve ser feita observando-se o correto casamento de impedância no final da linha de transmissão. Este procedimento elimina problemas de reflexão de onda que também introduzem erros na determinação do valor de tensão.

Em situações em que o ruído ambiente é muito elevado, impedindo a observação dos pulsos de descarga no sinal adquirido, pode-se optar pela blindagem do laboratório ou pela utilização de outras técnicas de compatibilidade eletromagnética que permitam a sua redução. No caso do sistema montado, considerou-se que o nível de ruído estava aceitável, como pode ser observado na figura 5.4. Desta forma, nenhuma outra providência precisou ser tomada para a medição das descargas.



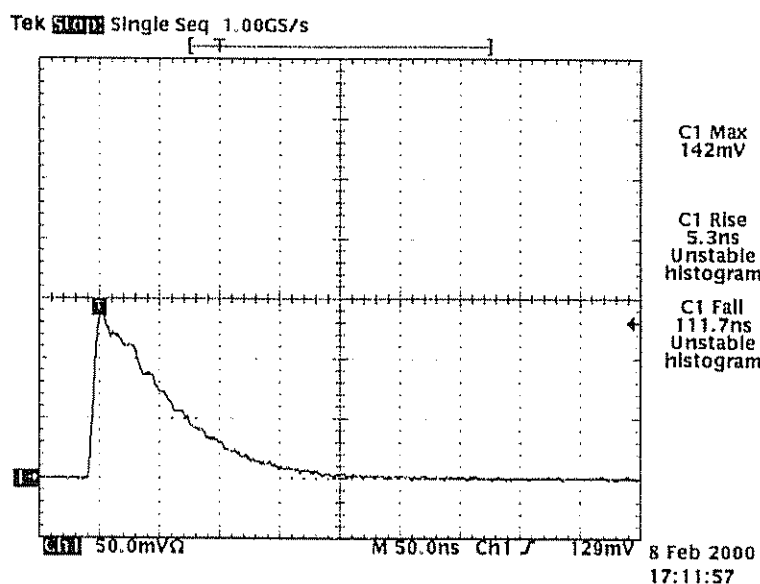


Figura 5 4: pulso de descarga parcial em ar a pressão atmosférica

### 5.1.2 – Sensibilidade e resolução

A sensibilidade do sistema foi avaliada durante o processo de calibração e posteriormente durante a aquisição de pulsos de descargas parciais reais. O sistema apresentou a possibilidade de medição com uma escala de 5 pC por divisão da escala do osciloscópio, utilizando o critério de julgamento de uma relação sinal-ruído  $\geq 2 / 1$  [5]. Esta sensibilidade foi considerada bastante satisfatória, uma vez que a sensibilidade de sistemas comerciais, utilizando sensores baseados em filtros RLC ressonantes, encontra-se atualmente na faixa de 1 pC/mV.

A figura 5.4 será novamente útil na apreciação da resolução do sistema. Como pode-se observar, o tempo de decaimento da resposta ao impulso é da ordem de 150 a 200 ns, para uma descarga parcial em ar. Considerando que a tensão é reduzida de 98% do seu valor original em 200 ns, correspondente a 4 constantes de tempo do sistema [25], temos:

$$\begin{aligned} 4\tau &= 200ns \\ \tau &= 50ns = R_p \cdot C \end{aligned} \quad (5.1)$$

como o resistor utilizado foi  $R_p = 50 \Omega$ ,

$$C = \frac{50ns}{50\Omega} = 1nF \quad (5.2)$$

Conforme discutido no capítulo 2, quanto menor o tempo de decaimento da onda de tensão melhor a resolução do sistema a pulsos de descargas parciais consecutivos. Entretanto, maior é o espectro de frequências a que o amplificador deverá responder, abrindo caminho para a passagem de sinais expúrios. Como os objetivos do trabalho incluem a avaliação de parâmetros temporais da forma de onda, a faixa de passagem a qual o amplificador deve responder deve ser a maior possível. Sendo assim, considerou-se que a resolução e a faixa de passagem do sistema estão satisfatórias. Desta forma, pulsos de descargas parciais que ocorram em intervalos maiores que 200 ns são perfeitamente detectados, sem a superposição de respostas.

### 5.1.3 – Calibração

A calibração do sistema foi obtida através da injeção de um degrau de onda quadrada gerado por um gerador de degrau padrão. O processo utilizado foi o recomendado na norma IEC 60270 [16]. O capacitor de calibração utilizado foi de 39 pF. Este valor reduzido foi utilizado para manter a calibração válida após a sua retirada do circuito, como comentado na seção 2.4. Desta forma, foi injetado no sistema de medição uma carga dada por:

$$\begin{aligned} q &= \Delta E \cdot C \\ q &= 320mV \cdot 39pF \\ q &= 12pC \end{aligned} \quad (5.3)$$

A leitura do osciloscópio registrou um valor de pico da tensão de aproximadamente 10 mV. Assim, ficou determinado que o sistema possui uma relação de:

$$Cal = \frac{12 pC}{10 mV} = 1.2 pC/mV \quad (5.4)$$

A figura 5.5 apresenta as formas de onda do degrau de tensão injetado no sistema e as respostas obtidas sobre a impedância de medição. A figura mostra no canal A1 o degrau de tensão, com amplitude de 320 mV. Os canais 1 e R1 apresentam, respectivamente, a resposta do sistema com a impedância de medição conectada em série com a capacitância de acoplamento (fig. 2.2a) e em série com a amostra sob ensaio (fig. 2.2b). As duas medições foram feitas para avaliar eventuais discrepâncias que pudessem surgir entre os dois métodos recomendados pela norma.

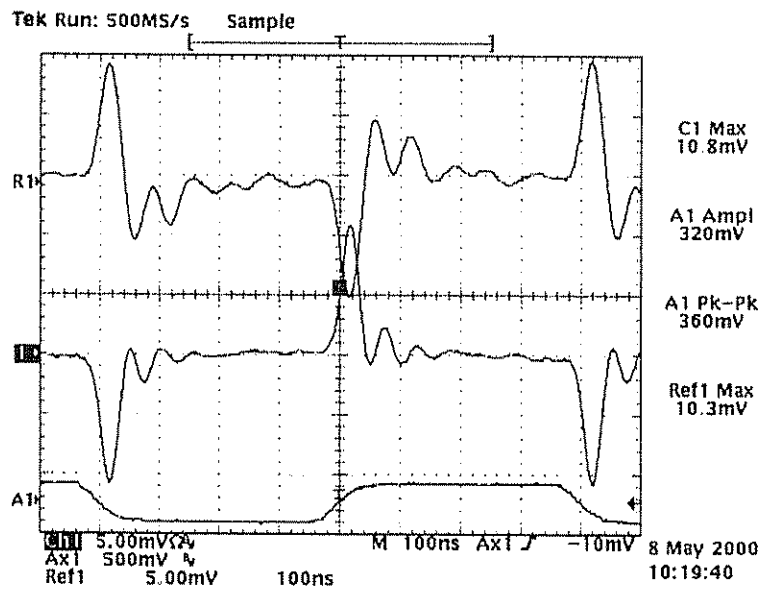


Figura 5 5: resposta do sistema ao pulso de calibração

Pode-se observar que nenhuma diferença significativa foi introduzida no valor de pico da tensão, exceto a inversão da sua polaridade. Isto deve-se ao fato de que a troca da localização da impedância de medição faz com que a corrente circule em

sentido inverso em relação ao anterior. Observa-se somente uma diferença na amplitude das oscilações amortecidas que ocorrem na cauda do pulso. Estas oscilações foram introduzidas somente durante processo de calibração, provavelmente devido a indutâncias inseridas no sistema quando da conexão do gerador de funções. Uma vez retirado o circuito de calibração, o sistema responde ao pulso de descarga como um sistema de 1ª ordem.

#### 5.1.4 – Faixa de passagem do medidor

O manual de referências técnicas do osciloscópio utilizado (Tektronix TDS 520 C) informa, como característica garantida, uma faixa de passagem analógica de 500 MHz. O tempo de subida mínimo, também segundo o manual, é calculado utilizando-se a seguinte equação:

$$T_s = \frac{0.4}{BW} = 0.8ns \quad (5.5)$$

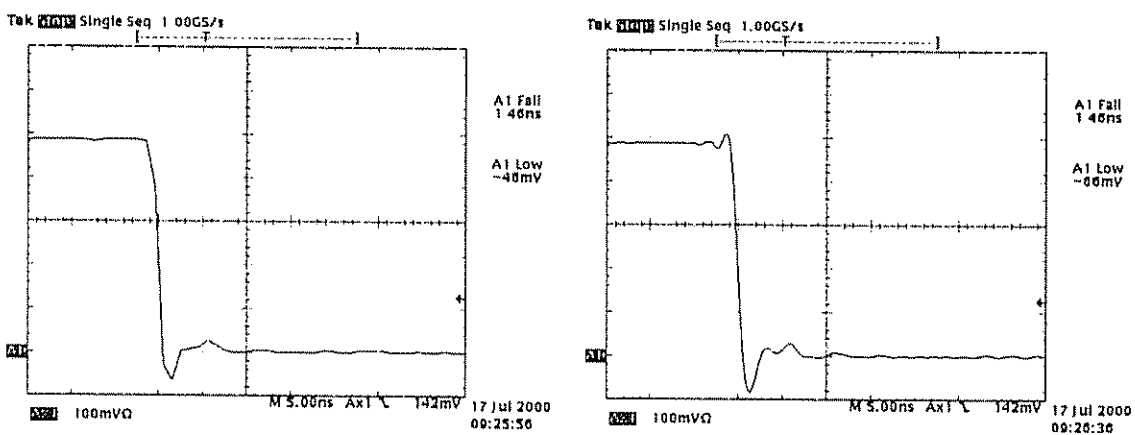
onde BW representa a faixa de passagem do equipamento. Acredita-se que esta seja uma avaliação bastante conservadora, uma vez que normalmente os tempos de subida dos osciloscópios são calculados pela equação

$$T_s = \frac{0.35}{BW} \quad (5.6)$$

Além disto, esta equação baseia-se na faixa de passagem de um filtro passa baixas do tipo gaussiano. Estudos relatam [20] que esta avaliação estaria relacionada ao pior caso possível, uma vez que os osciloscópios geralmente apresentam respostas ao degrau do tipo de 2ª ordem ou de ordens superiores, com menor faixa de transição, pequenas sobretensões e oscilações amortecidas. Apesar disto, o estudo da faixa de passagem do sistema foi feito levando-se em conta os dados do manual.

Com base nos limites impostos pelo osciloscópio observou-se que o gerador de sinais utilizado gera um degrau de tensão de 500 mV com tempo de transição de 1,2 ns. Idealmente, este tempo de transição deveria ser menor do que o do sistema de medição, o que permitiria avaliar a sua verdadeira faixa de passagem. Porém, não há disponibilidade de um equipamento mais adequado. Foram avaliados três geradores de sinais. O que apresentou melhor performance, surpreendentemente, foi o gerador embutido no próprio osciloscópio, que é utilizado para calibração das pontas de provas do mesmo.

A figura 5.6 apresenta a forma de onda do gerador no instante de transição. A transição negativa apresentou melhor forma do que a positiva, portanto é a que será utilizada na avaliação.



a) b)  
 Figura 5.6: forma de onda do gerador no instante de transição  
 a) Utilizando interpolação linear  
 b) Utilizando interpolação tipo  $(\sin x) / x$

A avaliação dos tempos de transição, feita com base em 20 medições, com interpolação linear e  $\sin x / x$ , resultou em um tempo médio de 1,2 ns, com sobretenção de 10 % e tempo de acomodação em torno de 7 ns.

A utilização da interpolação do tipo  $\sin x / x$  introduz oscilações no instante de início da faixa de transição que podem ser significativas na medição de pulsos mais

rápidos. Para o tempo de transição da onda do gerador estas oscilações não introduziram diferenças significativas, mas foi utilizada a interpolação linear em todas as situações como forma de se evitar erros aleatórios.

## **5.2 – Geração e medição de Descargas Parciais em ar**

### *5.2.1 – Uso de eletrodos estilizados*

O estudo do comportamento das descargas parciais em ar foi feito através da variação do campo elétrico ao qual o gap de ar estava sujeito. Esta variação foi obtida através de 3 variáveis do sistema:

1. O diâmetro dos eletrodos.
2. O comprimento do espaço intereletródico.
3. O nível de tensão aplicada.

Foi construído um conjunto de eletrodos metálicos com diâmetros de 100 $\mu$ m, 1, 2, 3, 5 e 10 mm. Este conjunto proporciona verificar a variação do comportamento das descargas relativa à distorção do campo elétrico, podendo proporcionar a identificação de concentrações de campo que porventura possam estar presentes em equipamentos reais. O projeto de alguns dos eletrodos pode ser visto na figura 5.7.

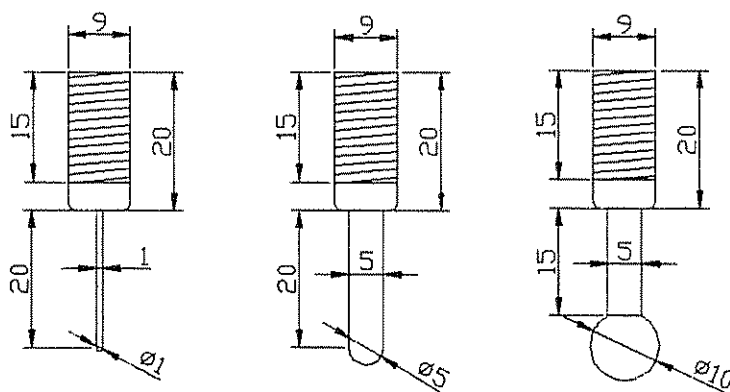


Figura 5 7: projeto de alguns eletrodos metálicos

Este conjunto foi instalado no interior de uma câmara, utilizando-se uma haste metálica posicionada na tampa daquela. Esta câmara pode também ser utilizada na fabricação de amostras de isolamento sólido e no ensaio de descargas parciais em outros gases, como por exemplo  $SF_6$ . Ela foi construída durante um trabalho anterior [24], que visava o estudo do decaimento de cargas superficiais depositadas na superfície de isolamentos sólidos.

Uma foto da câmara de vácuo é apresentada na figura 5.8. Nesta foto ela está montada para a aquisição de dados de cargas superficiais. Entretanto pode-se visualizar a haste de sustentação dos eletrodos estilizados.

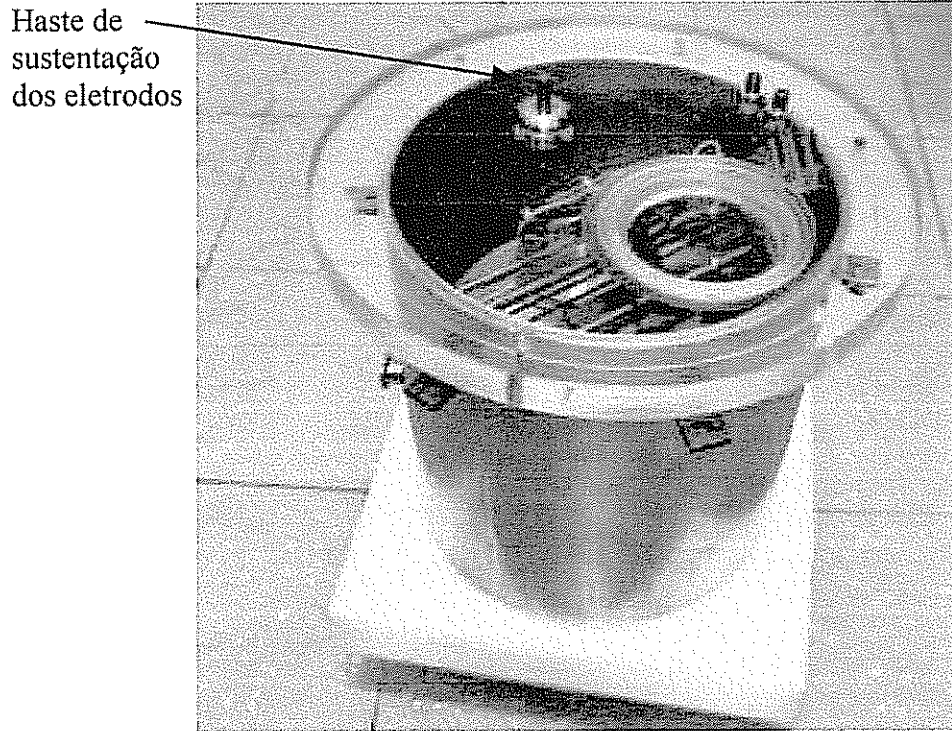


Figura 5 8: câmara de vácuo para aquisição de DPs em ar

O circuito para aquisição em ar compõem-se, portanto, dos componentes representados na figura 5.9.

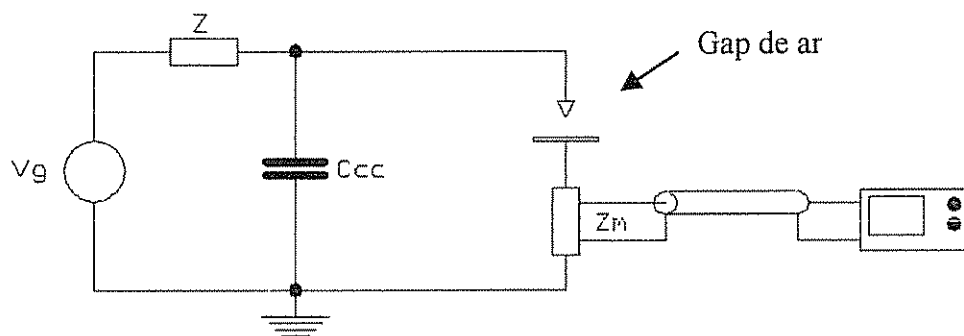


Figura 5.9: circuito de medição de DPs em ar



5.2.2 – Faixa de passagem do elemento sensor e aspectos relativos.

Além dos cuidados descritos anteriormente com relação às conexões e condutores utilizados no circuito, a ligação do elemento sensor ao sistema deve ser feita observando-se algumas características. O sensor utilizado inicialmente era um resistor de  $1200 \Omega$  comum, sem nenhum tratamento específico. Ele estava conectado diretamente ao eletrodo de baixa tensão do gap, com seu outro terminal conectado à terra através de cordoalhas. O sinal de tensão que surge nos terminais deste elemento era transmitido à entrada do osciloscópio através de um cabo coaxial, sendo a entrada ligada diretamente ao sensor. A impedância de entrada do osciloscópio utilizada era de  $1 M\Omega$ . A aquisição de um pulso de tensão, decorrente de uma descarga parcial, com este sistema pode ser vista na figura 5 10.

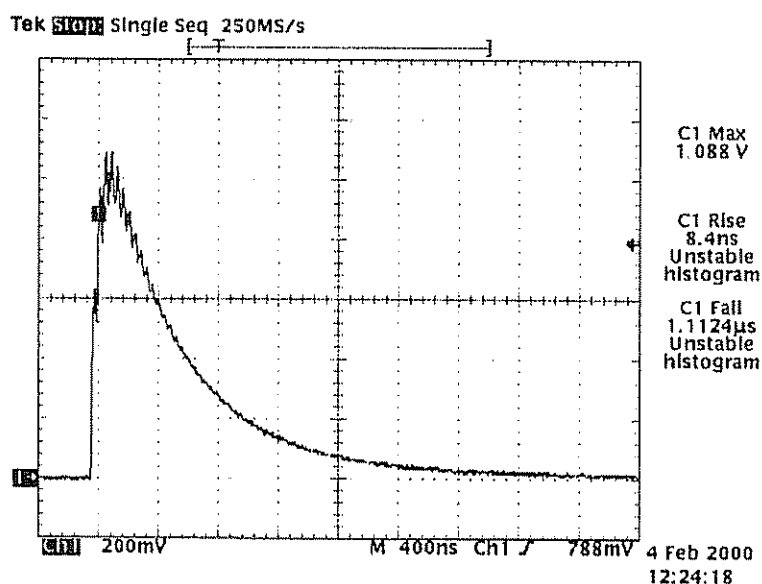


Figura 5.10: pulso de descarga distorcido devido ao erro no casamento de impedância

Como era de se esperar, o uso de um valor de resistência maior aumenta a constante de tempo do sistema e torna o decaimento da onda mais lento. Entretanto, observou-se o aparecimento de oscilações na frente de onda e próximas ao pico, bem

como aumento no tempo de frente. Além disso, o valor de pico da onda mostrou-se alterado com relação a medições realizadas posteriormente, com o circuito já corrigido.

Os problemas observados relacionam-se ao fato de que os pulsos decorrentes de descargas parciais possuem espectros de frequência que facilmente atingem a ordem de centenas de megahertz. Consequentemente, dependendo do comprimento do cabo coaxial utilizado, a transmissão deste sinal até a entrada do medidor deve ser feita tomando-se as precauções necessárias para evitar a ocorrência de reflexões de onda. As oscilações observadas na frente de onda ocorrem em função das reflexões sucessivas decorrentes da falta do casamento.

Este problema pode ser resolvido de duas formas: pela mudança da impedância da entrada do osciloscópio para  $50 \Omega$ , valor da impedância característica do cabo coaxial utilizado, ou pela redução da linha de transmissão, o que requer que o osciloscópio seja instalado próximo ao elemento sensor. A segunda opção é, portanto, impraticável. A utilização da entrada do osciloscópio em  $50 \Omega$  faz com que a impedância de medição do circuito seja determinada por esta e não pelo resistor de  $1200 \Omega$  utilizado, tornando-o inútil.

A solução para o problema foi obtida da seguinte forma: o elemento sensor passou a ser uma terminação de cabo coaxial de  $50 \Omega$ . Esta terminação foi instalada junto à entrada do osciloscópio, através de um conector coaxial do tipo “T”. A impedância da entrada do osciloscópio foi então mantida em  $1 M\Omega$ . Desta forma, o sinal gerado pela descarga é transmitido pelo cabo coaxial até o sensor e detectado pelo medidor sem a ocorrência de reflexões de onda, uma vez que a linha de transmissão entre o sensor e o medidor foi reduzida a poucos milímetros. Este procedimento também permite uma maior segurança para o medidor caso ocorra uma ruptura no isolamento da amostra sob ensaio, uma vez que a sua impedância de entrada permanece em  $1 M\Omega$ . Maiores detalhes sobre este estudo e sobre o levantamento da faixa de passagem do elemento sensor podem ser obtidos em [23].

Após estas medidas serem tomadas, observou-se problemas com relação à conexão do cabo coaxial ao eletrodo de baixa tensão. Como era de se esperar, a exposição do núcleo do cabo para conexão ao eletrodo faz com que a sua faixa de passagem seja degradada, causando o aumento no tempo de frente da onda, devido às distorções causadas pela assimetria do campo elétrico no início do cabo. Portanto, esta conexão deve ser muito bem estudada para minimizar este efeito. Este fenômeno, apesar de causar problemas à medição, proporcionou a observação de características importantes para o embasamento do estudo utilizando a célula de medição em amostras de isolamentos sólidos. Em seções posteriores veremos que o uso da célula elimina este problema uma vez que o núcleo da linha de transmissão não é exposto.

Para a aquisição de sinais provenientes de descargas parciais em ar a diminuição do comprimento do núcleo exposto ao um mínimo possível mostrou-se satisfatória. Esta avaliação foi realizada através da inserção do degrau de tensão de 1,2 ns de tempo de frente na linha de transmissão utilizada, da mesma forma feita durante a avaliação da faixa de passagem do medidor. Como pode ser visto na figura 5.11, o comprimento do núcleo do cabo coaxial exposto pareceu não mais comprometer a medição.

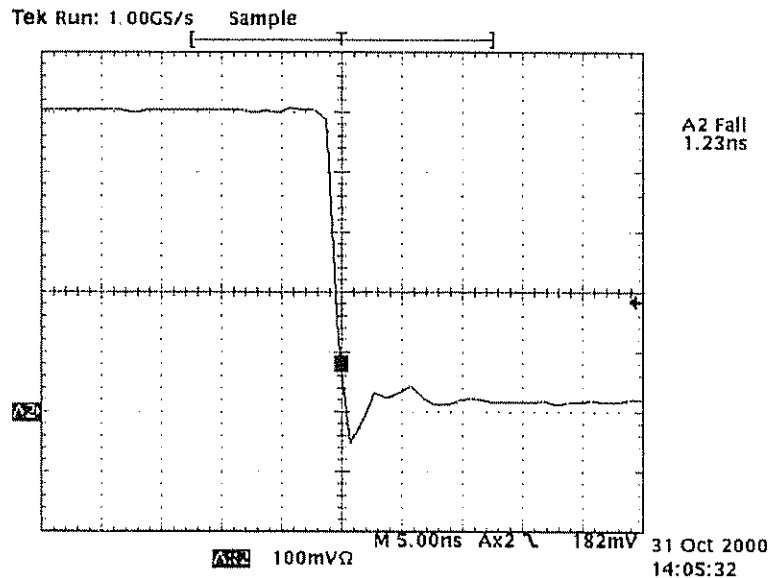


Figura 5.11: degrau de tensão aplicado à linha de transmissão

A comparação entre o degrau inserido através de uma conexão otimizada e através da conexão ao eletrodo de baixa tensão, incluindo o cabo coaxial, mostrou que esta última introduz pouca ou nenhuma distorção no sinal. Tempos de transição da ordem de 0,9 ns foram observados durante a aquisição deste degrau, o que indica que a faixa de passagem do sistema está muito próxima do limite imposto pelo medidor, não limitando, portanto, o espectro de frequências associado às descargas parciais.

### 5.3 – Padrões de descargas parciais no ar a pressão atmosférica

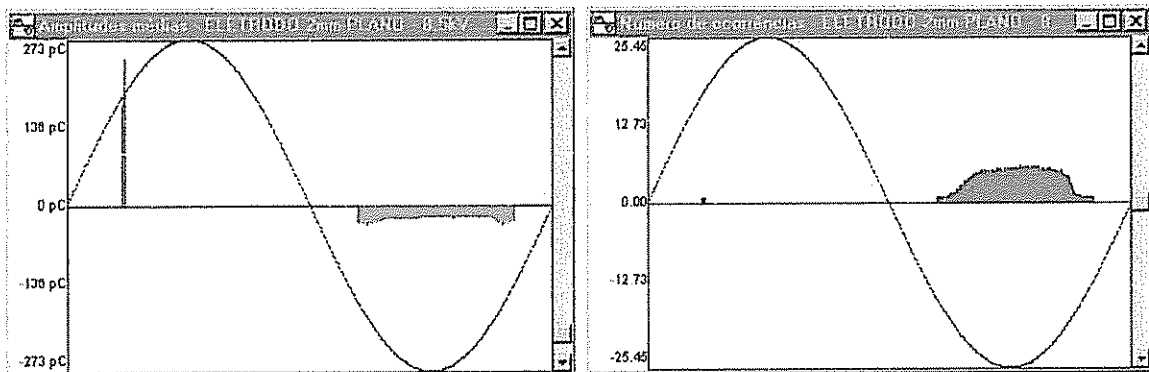
O sistema de aquisição desenvolvido e relatado no capítulo 4 foi utilizado na caracterização de descargas parciais no ar. Como mencionado na seção anterior, foram utilizadas várias configurações de eletrodos, vários espaçamentos inter-eletródicos e vários níveis de tensão, para caracterizar diversas configurações de campos elétricos.

O banco de dados gerado inicialmente, através o uso destas diversas configurações, possui 21 arquivos. Nas medições realizadas foram utilizadas configurações de eletrodos ponta plano com pontas de 100  $\mu\text{m}$  até 10 mm. Observou-se no decorrer dos ensaios que a utilização de pontas de 5 e 10 mm não proporcionava descargas parciais devido à grande homogeneidade do campo gerado. Com o aumento do nível de tensão aplicado ao gap, observa-se o rompimento completo do mesmo antes do início de ocorrência das descargas parciais, o que está de acordo com a teoria. Estas observações levaram ao abandono destas duas configurações. Assim, utilizou-se para a caracterização de descargas parciais em ar os seguintes conjuntos:

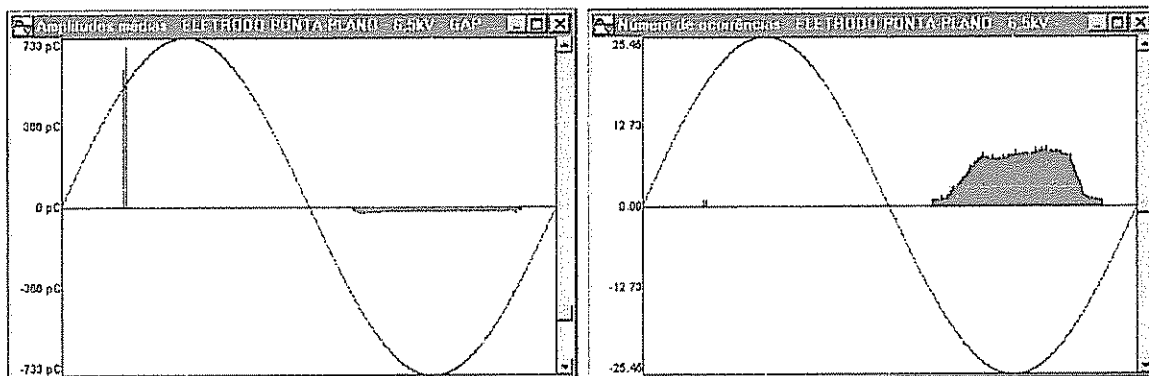
1. Eletrodos de 100  $\mu\text{m}$ , 1 e 2 mm
2. Gaps de ar de 5, 10 e 15 mm.
3. Tensão de alimentação de 4,5 a 8,5 kV.

Os níveis de tensão escolhidos basearam-se nas tensões mínima para a ocorrência de descargas parciais com a configuração eletródica em uso e a máxima suportável pelo isolamento do gap. A tensão foi variada de 1 em 1 kV.

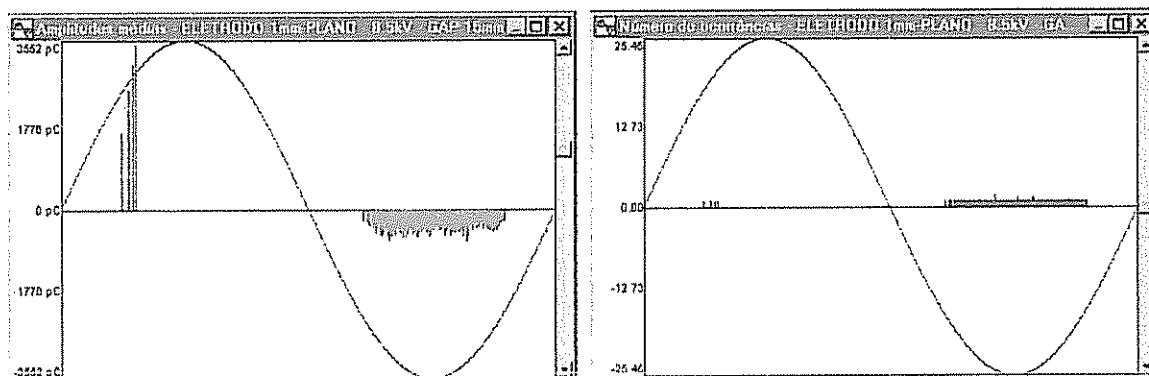
Alguns resultados obtidos são apresentados na figura 5.12. É interessante salientar que a configuração eletródica em uso e o nível de tensão aplicado é relatado no menu da janela do gráfico, para que o conjunto utilizado possa ser identificado.



a) Eletrodo 2mm-PLANO – 8,5 kV – GAP 15 mm



b) Eletrodo 100 μm-PLANO – 6,5 kV – GAP 10 mm



c) Eletrodo 1 mm-PLANO – 8,5 kV – GAP 15 mm

Figura 5 12: exemplos de resultados obtidos de ensaios no ar

Os resultados da variação dos parâmetros serão melhor detalhados a seguir, porém algumas considerações podem ser generalizadas para todos os padrões adquiridos no ar. São características que podem ser utilizadas na identificação da fonte de geração das descargas.

Em todos os padrões obtidos pode-se observar que o ciclo positivo da tensão de alimentação (senoidal) apresenta pequena quantidade de descargas, porém com pulsos de grande amplitude. Estes pulsos em geral concentram-se no primeiro quadrante da senóide, ou seja, as descargas no ciclo positivo, na maioria das vezes, ocorrem enquanto a tensão de alimentação está aumentando o valor. A ocorrência de descargas no segundo quadrante da senóide também foi observada, entretanto com uma frequência bem menor que o primeiro caso. Um exemplo desta situação é apresentado na figura 5.13.

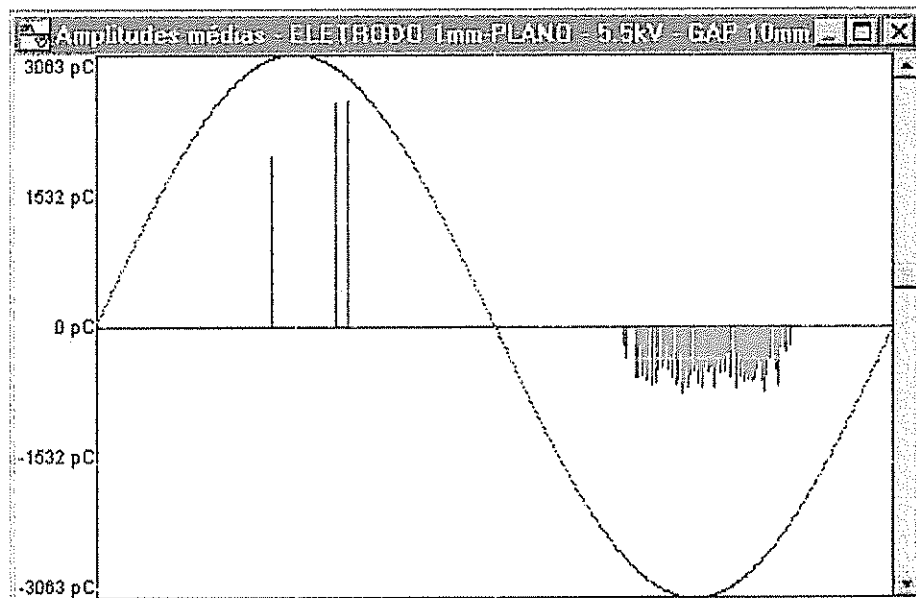


Figura 5.13: padrão apresentando descargas parciais no segundo quadrante da senóide

No ciclo negativo da senóide o comportamento das descargas é caracterizado por um grande número de pulsos, com amplitudes muito menores que os ocorridos no ciclo positivo. Os pulsos possuem uma distribuição bastante simétrica, com centro localizado em torno do instante de pico da senóide.

O formato das distribuições no ciclo negativo varia bastante, principalmente com relação à variação do diâmetro do eletrodo utilizado. Eletrodos com diâmetros menores em geral proporcionam distribuições com forma similar a um caracter  $\cap$ , como

pode ser observado na figura 5.14 (a). O aumento do diâmetro leva à modificação da distribuição para a forma observada na figura 5.14 (b). Estas modificações podem ser relacionadas à maior homogeneidade de campo com eletrodos de maior diâmetro, e são facilmente detectadas através do uso dos operadores estatísticos.

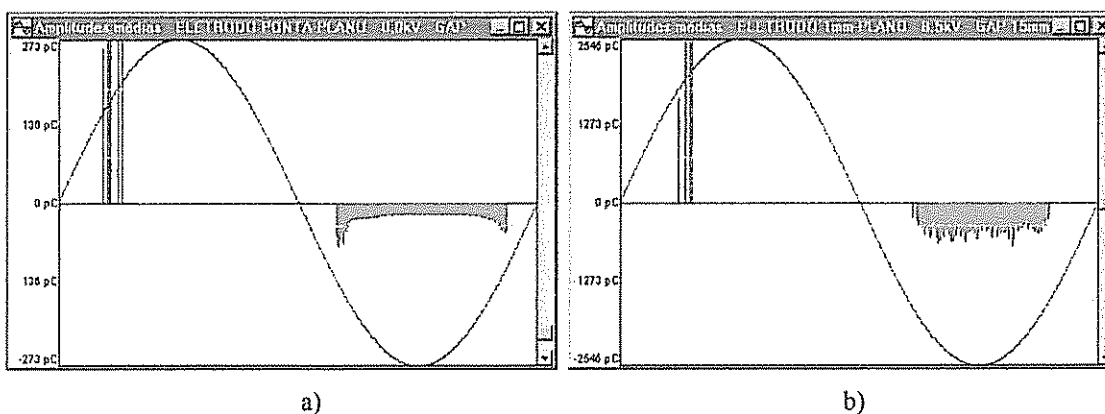


Figura 5.14: modificações observadas com o aumento do diâmetro do eletrodo

Outra característica importante a se destacar é que a polaridade dos pulsos é sempre a mesma da tensão de alimentação, ou seja, descargas no ciclo positivo da senóide possuem polaridade positiva, e no ciclo negativo, negativa.

As distribuições de amplitudes médias são quase sempre muito semelhantes em relação às características citadas. Foram coletados alguns padrões bastante distintos dos anteriores, como o apresentado na figura 5.15, mas geralmente situações atípicas como esta estão relacionadas a configurações de eletrodos que proporcionam baixa ocorrência de descargas, o que degrada o cálculo das médias nas janelas de fase.



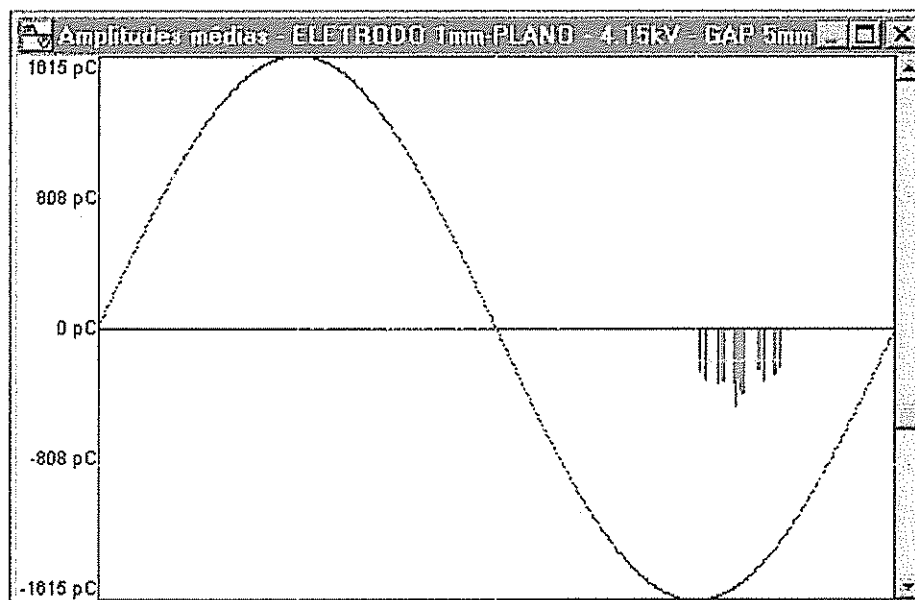


Figura 5 15: Distribuição de amplitudes médias atípica

As distribuições de número de ocorrências por janela de fase são muito heterogêneas no que se refere aos formatos obtidos dos vários ensaios. Obviamente a localização em relação à fase da senoide segue os mesmos padrões da distribuição das amplitudes médias. Devido a esta heterogeneidade, a análise visual destas distribuições em geral traz poucas informações imediatas sobre a configuração de campo utilizada. Entretanto, a sua análise estatística traz informações relevantes

Os comentários feitos nesta seção apresentaram características genéricas do comportamento observado para as descargas parciais em ar. O estudo das modificações no formato das distribuições pode ser melhor organizado quando se faz a quantização destas variações utilizando-se as ferramentas estatísticas implementadas no sistema. O capítulo 7 apresenta o relato deste estudo.

## Capítulo 6

# Medição de Descargas Parciais em isolamentos sólidos

### 6.1 – Sistema de medição

#### 6.1.1 - Introdução

Além de permitir a caracterização do comportamento das descargas parciais neste tipo de isolamento, a medição realizada no ar serviu como fundamento para a observação de características importantes do fenômeno e para a determinação das necessidades às quais o sistema de medição deveria suprir para permitir a sua detecção. Todas as observações relativas aos problemas com a faixa de passagem do sistema foram realizadas durante o seu desenvolvimento para a aquisição em ar. O sistema de medição em isolamentos sólidos é bastante similar ao utilizado para a aquisição no ar, introduzindo diferenças no modo de acoplamento da amostra sob ensaio ao elemento sensor. O novo método de acoplamento proporcionou melhorias em relação à blindagem eletromagnética e na transmissão do pulso de descarga.

Na seção 5.2 foram relatados problemas com a faixa de passagem do sistema até então desenvolvido, devido à exposição do núcleo do cabo coaxial que liga o eletrodo de baixa tensão ao elemento sensor. Até aquele momento, esta distorção havia sido minimizada diminuindo-se a exposição do núcleo a um limite possível somente para conectá-lo ao eletrodo. Entretanto, mesmo otimizando-se ao máximo esta conexão,

componentes de frequências mais altas contidas no sinal de descarga parcial inevitavelmente foram perdidas. Esta parte do sistema de medição é, portanto, o ponto mais crítico do circuito, uma vez que limita a sua faixa de passagem.

### 6.1.2 – Célula de medição

Para otimizar esta conexão e melhorar a faixa de passagem, a medição de descargas parciais em amostras de isolamento sólido foi realizada utilizando-se uma célula fabricada especialmente para a tarefa. Esta célula introduz imediatamente duas vantagens em relação às medições que foram realizadas no ar, a saber:

1. A amostra sob ensaio fica instalada no interior da célula, eliminando a necessidade de se expor o núcleo do cabo coaxial.
2. Como a célula é metálica e totalmente fechada, o caminho percorrido pelas descargas parciais, desde a sua geração até atingir o elemento sensor, mantém-se blindado, o que reduz substancialmente a possibilidade de incidência de ruídos induzidos. Embora esta característica seja interessante, deve-se notar que o sistema não é totalmente imune aos ruídos, uma vez que sinais indesejados podem atingir o medidor por condução através do eletrodo de alta tensão.

Uma foto da célula pode ser vista na figura 6.1. Ela foi construída em alumínio com o objetivo de reduzir seu peso total. O condutor interno foi feito em latão. O isolamento do eletrodo de alta tensão foi feito utilizando-se dois cilindros de Teflon.

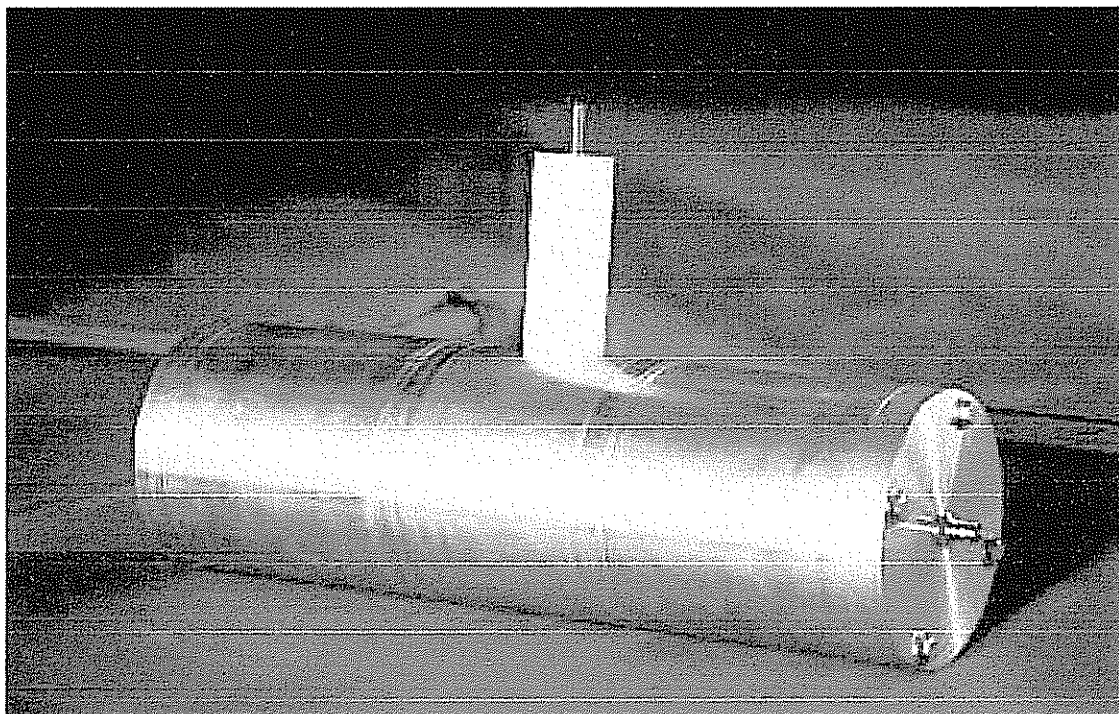


Figura 6 1: foto da célula de medição de descargas parciais em sólidos

A célula foi projetada com base na teoria de linhas de transmissão. O dispositivo é um cabo coaxial cujos diâmetros dos condutores interno e externo aumentam gradativamente, mantendo fixa a relação entre ambos. Os condutores possuem a forma de dois cones, centrados sobre o mesmo eixo, como pode ser observado na figura 6.2. Esta figura apresenta o projeto da célula através de um corte lateral.

O fato de os diâmetros dos condutores do cabo coaxial aumentarem gradativamente permite que, em certo ponto, o cabo possua uma seção reta grande o suficiente para comportar a instalação de uma amostra de dielétrico em seu interior. Desta forma, o núcleo do cabo coaxial não fica exposto em nenhum ponto, otimizando ao máximo a sua conexão ao eletrodo de baixa tensão. Quando um pulso de descarga parcial ocorre, ele encontra um caminho formado por uma linha de transmissão perfeitamente casada, desde o ponto de geração da descarga até o ponto de medição.

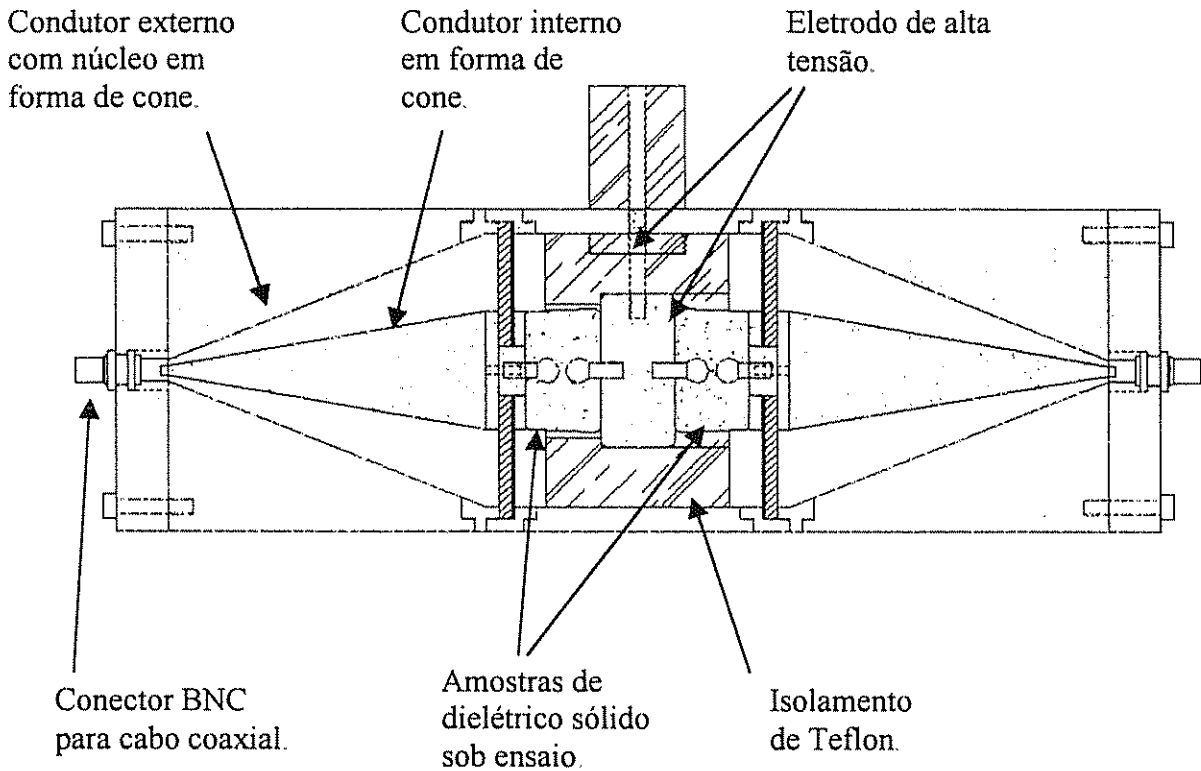


Figura 6 2: corte lateral da célula de medição

A relação de crescimento dos diâmetros dos dois condutores é dada pela conhecida fórmula para o cálculo da impedância característica de linhas de transmissão coaxiais, eq. 6.1.

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \frac{R_B}{R_A} \quad (6.1)$$

Na equação,  $Z_0$  é a impedância característica da linha, em ohms,  $\mu$  é a permeabilidade, em henrys/metro, e  $\varepsilon$  é a permissividade, em farads/metro, do meio.  $R_B$  é o raio do condutor externo e  $R_A$  o do condutor interno. Assim, mantendo-se a impedância característica da linha constante a 50  $\Omega$ , chega-se à relação de raios indicada na equação 6.2.

$$50 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7}}{8.85 \times 10^{-12}}} \ln \frac{R_B}{R_A} \Rightarrow \frac{R_B}{R_A} \cong 2.3 \quad (6.2)$$

O ângulo de abertura dos condutores cônicos pode ser qualquer um, desde que a relação entre os raios em qualquer seção reta do cone obedeça a relação acima. Uma abertura muito grande permite uma taxa de crescimento dos raios maior, o que diminui o comprimento total da célula. Entretanto, este aumento na abertura favorece a ocorrência de eventuais distorções do campo eletromagnético no interior do cabo, o que pode prejudicar a sua faixa de passagem. A célula foi fabricada com os ângulos mostrados na figura 6.3.

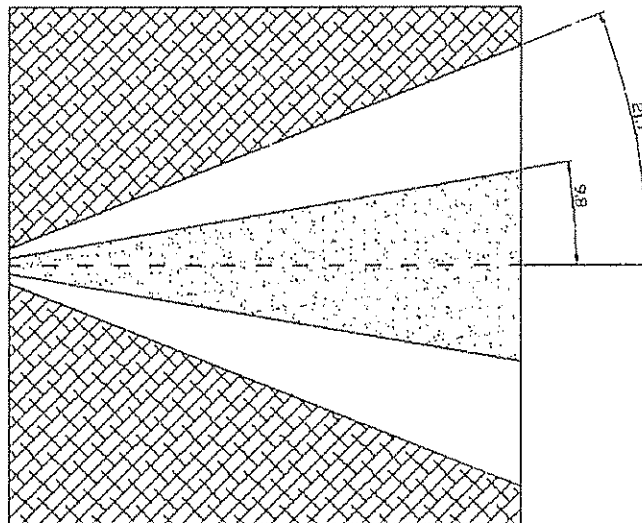


Figura 6.3: ângulos de abertura dos condutores cônicos

A célula foi construída de forma a possibilitar a aquisição através do circuito balanceado, mostrado na figura 2.3. A capacitância de acoplamento é obtida através de outra amostra, similar à que está sob ensaio, sem no entanto possuir uma cavidade interna. Esta amostra pode ser vista à esquerda na figura 6.2. Como visto naquele capítulo, este circuito proporciona uma grande imunidade a ruídos devido ao método de medição diferencial que é utilizado.

As amostras de material sólido são fixadas no interior da célula de medição através de uma conexão ao eletrodo de alta tensão. Este eletrodo possui formato cilíndrico e é suportado pelo condutor externo da célula. O isolamento entre ambos é feito por um outro cilindro de Teflon. A alimentação do circuito é fornecida através de um tirante, também isolado do condutor externo por um cilindro de Teflon. O condutor central da célula é suportado por dois discos de acrílico, que também auxiliam na sustentação da amostra. Todo este conjunto pode ser observado na figura 6.2.

### 6.1.3 – Faixa de passagem do sistema

A faixa de passagem da célula foi avaliada conectando-se as suas duas seções e medindo a resposta à várias frequências diferentes [8], fig. 6.4.

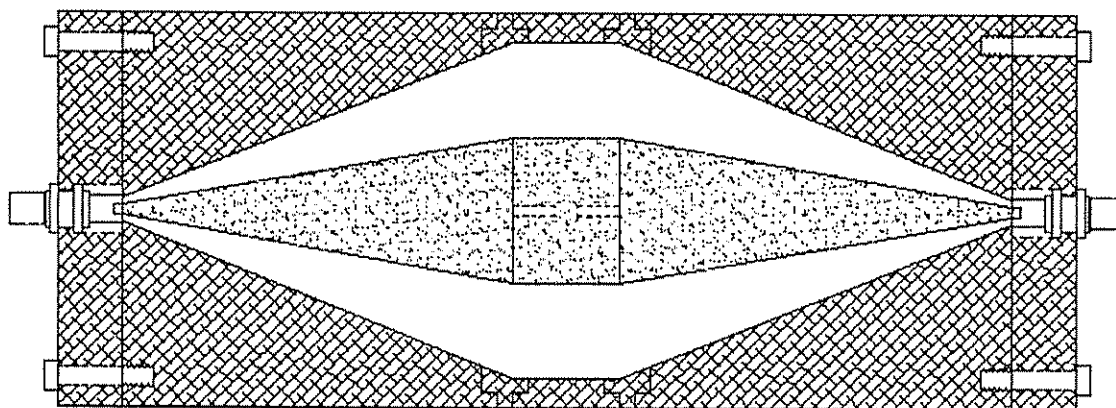


Figura 6.4: conexão para avaliação da faixa de passagem

A avaliação foi feita através da injeção de um sinal senoidal em uma das extremidades da célula e a sua medição na outra extremidade. O gerador de sinais utilizado tinha capacidade de gerar ondas senoidais com frequências de até 1,3 GHz. Entretanto, durante o teste, o osciloscópio utilizado possuía faixa de passagem de 500 MHz apenas, o que determinou o limite de frequência do sistema. Após a medição, os resultados foram apresentados em um diagrama de bode, visto na figura 6.5.

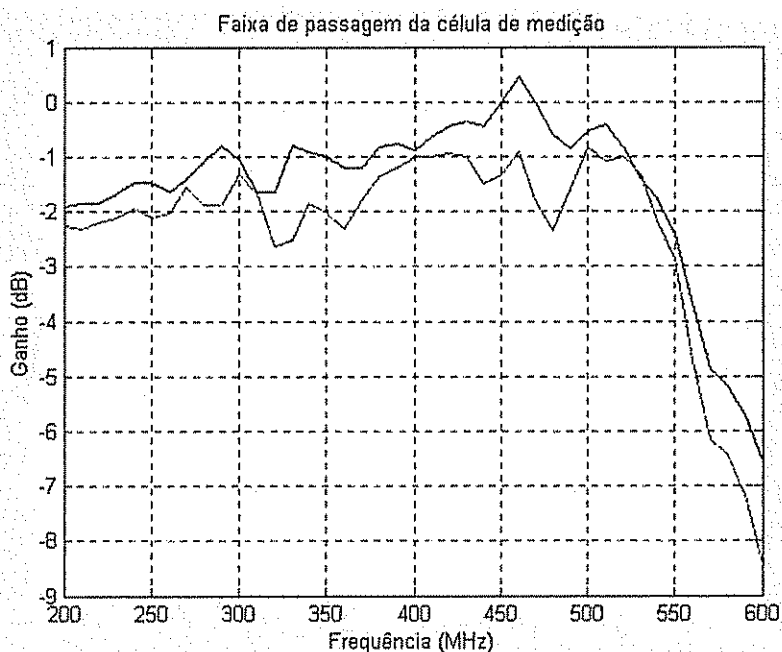


Figura 6.5: faixa de passagem da célula de medição

A avaliação foi feita na faixa de frequências de 200 a 600 MHz. A curva superior, desenhada em azul, apresenta a resposta em frequência do osciloscópio somente. A inferior, em verde, apresenta a resposta com a célula inserida entre o gerador e o osciloscópio. Como pode-se observar, o osciloscópio limita a faixa de passagem um pouco acima do seu valor nominal, de 500 MHz.

Observa-se que a célula introduz uma atenuação em toda a faixa de frequências medida. Entretanto, esta atenuação é praticamente constante e, portanto, independente da frequência. Esta característica e a observação do gráfico permitem-nos assumir que a célula pode transmitir sinais com frequências acima de 500 MHz, embora sua verdadeira faixa de passagem não pudesse ser determinada devido ao osciloscópio utilizado. Pelo fato de a atenuação ser independente da frequência do sinal, ela pode ser corrigida durante a calibração do sistema ou por uma compensação digital posterior à aquisição do sinal, sendo ambos os métodos de correção fáceis de implementar. A faixa



de passagem observada foi considerada satisfatória para um sistema de medição de ultra largura de faixa.

Algumas observações devem ser relatadas com relação ao equipamento de medição utilizado. De acordo com o manual de referências técnicas do osciloscópio, a resposta ao degrau do mesmo limita a aquisição em sinais com tempos de frente dados por, no mínimo:

$$T_f = \frac{0.4}{BW} = \frac{0.4}{500 \times 10^6} = 800 \text{ ps} \quad (6.3)$$

Foram observados pulsos de descargas parciais com tempos de frente da ordem de 900 ps, o que indica que o osciloscópio está trabalhando muito próximo do seu limite. Embora este limite esteja acima da faixa de passagem de alguns sistemas encontrados na literatura, dependendo do tipo de isolamento que esteja sob avaliação a análise em tempo pode ficar comprometida. No entanto, a análise em fase não sofre nenhum comprometimento.

A figura 6.6 apresenta um pulso de descarga parcial ocorrido em uma amostra de isolamento sólido. Este pulso é um exemplo de como o osciloscópio está trabalhando próximo ao limite de sua faixa de passagem, uma vez que apresentou tempo de subida de aproximadamente 1 ns.

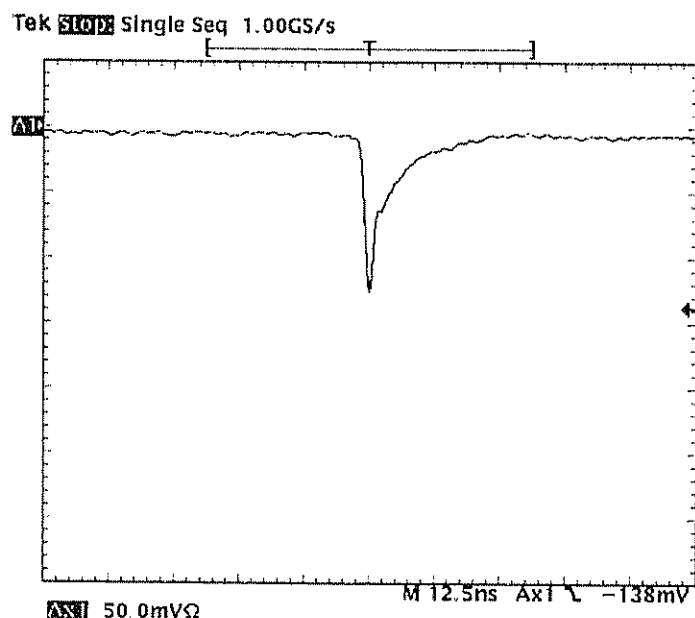


Figura 6 6: descarga parcial em isolamento sólido

## 6.2 – Amostras de material isolante sólido

No capítulo 2 foi introduzido o conceito de que as descargas parciais ocorrem em isolamentos sólidos devido à presença de cavidades no seu interior, que comumente se formam por causa de imperfeições no processo de fabricação das peças. Estas cavidades causam uma intensificação de campo elétrico em um ponto do material isolante, e podem dar origem ao crescimento de um arvorejamento devido ao constante bombardeamento iônico das paredes do dielétrico.

A avaliação de descargas parciais em amostras de isolamento sólido foi feita através da fabricação de amostras que contêm uma bolha inserida entre dois eletrodos geradores do campo elétrico. Algumas configurações de eletrodos foram testadas, como pode ser observado na figura 6.7.

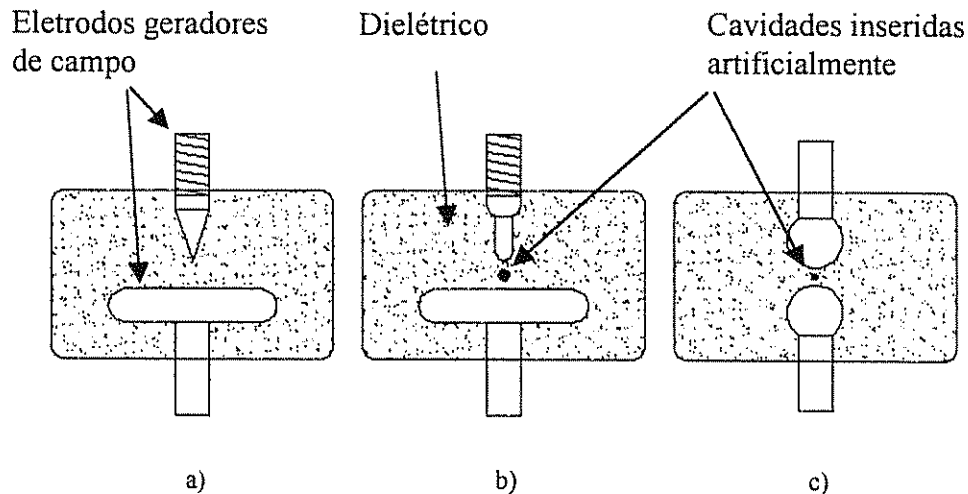


Figura 6 7: algumas configurações de eletrodos utilizados para aquisição de DPs em sólidos

- a) Configuração 100  $\mu\text{m}$  – plano
- b) Configuração 2 mm – plano.
- c) Configuração esfera – esfera

As amostras foram fabricadas utilizando-se uma resina de Epoxi, empregada na fabricação de transformadores de tensão com núcleo com isolamento sólido (Araldite CY 225). O processo de fabricação requer que a resina seja desgaseificada antes da cura, o que foi feito utilizando-se uma bomba de vácuo conectada à câmara apresentada no capítulo 5. Após a desgaseificação, uma bolha de ar é inserida proposadamente na resina ainda líquida e o molde da amostra é lacrado. O conjunto é então levado ao forno para que a cura seja realizada, já com os eletrodos posicionados. O molde e dois eletrodos esféricos podem ser vistos na figura 6. 8.

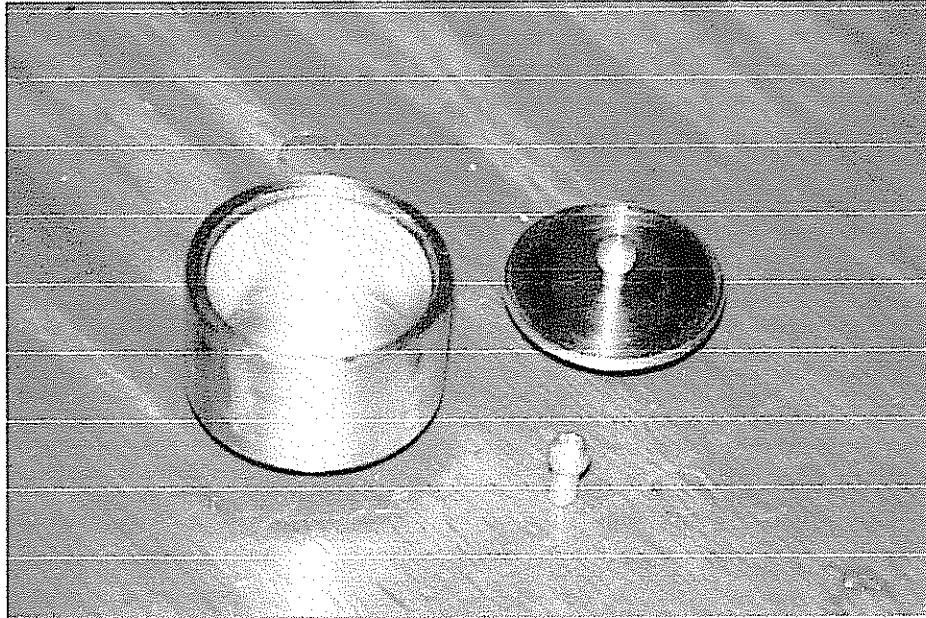


Figura 6 8: molde para fabricação das amostras de dielétrico sólido

A bolha é centrada entre os eletrodos enquanto a peça está sendo curada, através de um arranjo mecânico instalado na porta de abertura do forno [11]. Este arranjo executa um movimento bi-axial no molde, fig 6.9, que faz com que a bolha se posicione no ponto em que se localiza o centro de massa do conjunto. Devido à construção simétrica do molde e do acionamento, este ponto coincide exatamente com o centro da distância entre os dois eletrodos. Assim consegue-se que a bolha seja posicionada no meio da amostra. Uma foto do acionamento instalado no interior do forno é apresentada na fig 6.10.

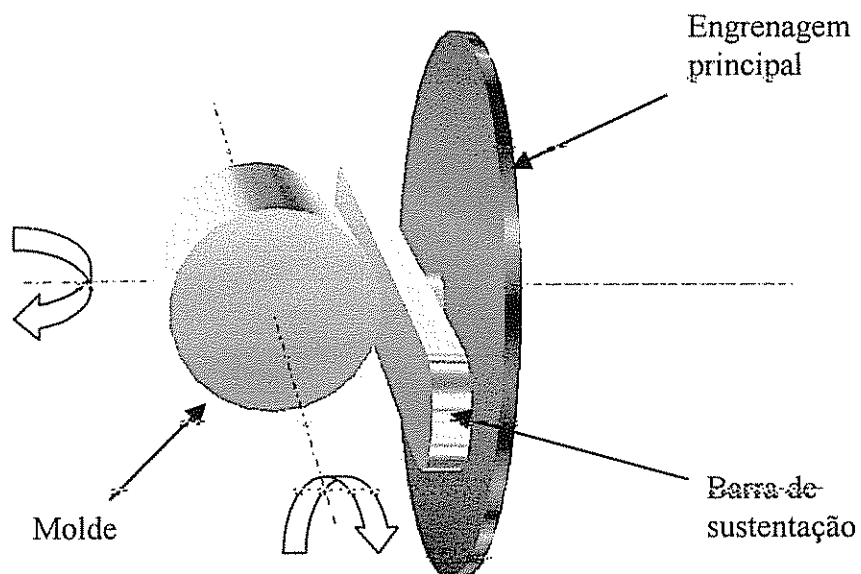


Figura 6 9: movimento bi-axial a que o molde está sujeito durante a cura

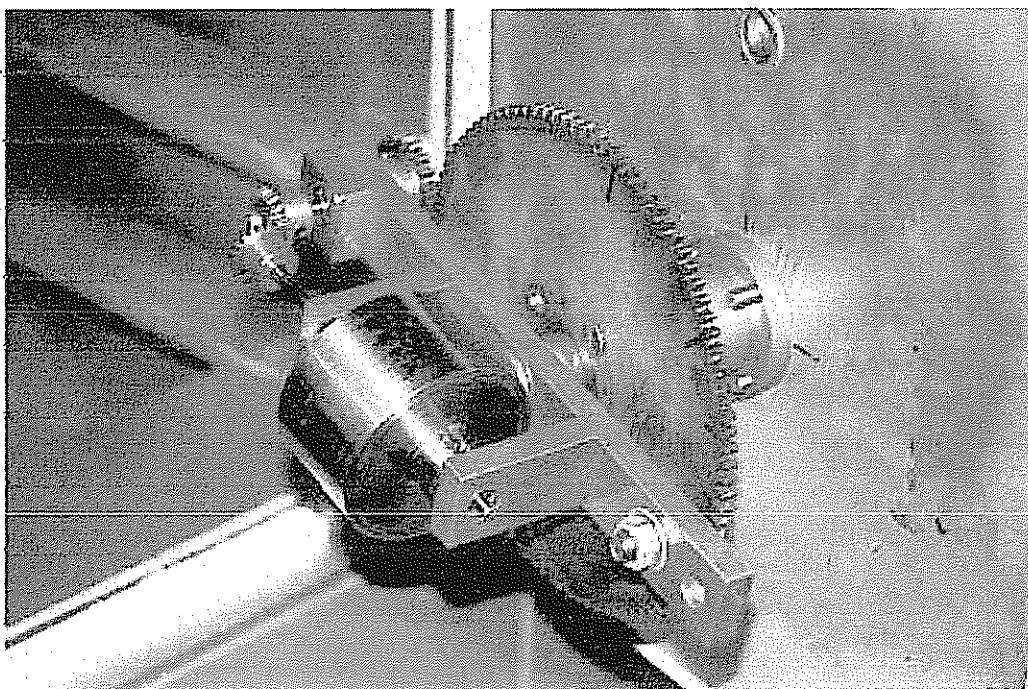


Figura 6 10: foto do acionamento instalado na porta do forno

Este sistema pode ser utilizado na construção de bolhas com outras geometrias, através do uso de engrenagens de tamanhos diferentes e da variação da sua velocidade de rotação. Assim, bolhas com formatos elípticos podem ser inseridas entre os dois eletrodos, e o efeito das mudanças nos formatos pode ser avaliado. Esta possibilidade é interessante para caracterização da variação da distância entre as duas paredes de dielétrico nas quais incide o campo elétrico.

O processo de cura de cada amostra leva entre 6 a 8 horas para ser concluído. Durante a maior parte deste tempo a amostra permanece submetida ao movimento realizado pelo acionamento. Após cerca de 4 horas a resina já apresenta um endurecimento satisfatório para que o acionamento seja desligado sem que a bolha saia da posição central. Nas quatro horas que se seguem a cura pode ser realizada com a peça imóvel. Este prazo final serve para que a resina atinja o ponto ótimo de suportabilidade ao campo elétrico, de acordo com as informações do fabricante. Passadas as 8 horas de cura, a peça já solidificada pode ser retirada do molde.

Durante o desenvolvimento do processo de fabricação das amostras observou-se que o uso de eletrodos com formatos muito diferentes (por exemplo, ponta-plano) não permitia que a bolha pudesse ser posicionada entre os dois eletrodos. Isto ocorre devido ao modo como a resina flui no interior do molde durante seu estado líquido. O uso de eletrodos diferentes faz com que o centro de massa da resina não mais coincida com o centro geométrico da forma, o que faz com que a bolha crie uma tendência a se posicionar em um local do volume da amostra que não coincide com seu centro. Nestes casos normalmente a bolha fixa-se a um dos eletrodos ou à parede da forma. Por este motivo, a maioria das amostras utilizadas na avaliação possuem configurações de eletrodos simétricas. A única exceção foi a investigação de uma configuração ponta-plano sem cavidade entre os eletrodos.

Este modo de inserção da cavidade permite que a amostra que está sob avaliação mantenha características mais próximas de uma situação real. Durante a cura

observou-se que o volume da bolha diminui cerca de 4 vezes do seu valor original, o que indica que provavelmente a pressão do ar dentro da mesma é maior do que a pressão atmosférica. Estes parâmetros são reconhecidamente determinantes no comportamento das descargas parciais, uma vez que a tensão de ruptura de um gás é dependente do produto *pressão x distância eletródica*, como foi estabelecido por Paschen. Assim, as amostras utilizadas caracterizam melhor as situações encontradas nos equipamentos de alta tensão. Em outros métodos encontrados na bibliografia [10, 17, 26] a cavidade é produzida cortando-se a peça de dielétrico em duas partes, fazendo um furo em uma delas e depois unindo-as. Estes métodos parecem não refletir a situação de uma cavidade real devido à pressão interna do gás e à presença de uma interface entre as duas peças, que poderia por si só ser uma fonte geradora de descargas parciais. Esta interface pode inserir novas cavidades no dielétrico, devido às imperfeições na junção entre as peças. Ainda, o comportamento das descargas pode ser alterado devido ao possível acúmulo de cargas superficiais nas paredes do dielétrico no momento de produzir a cavidade.

A figura 6.11 apresenta a fotografia de uma das amostras construídas com o acionamento.

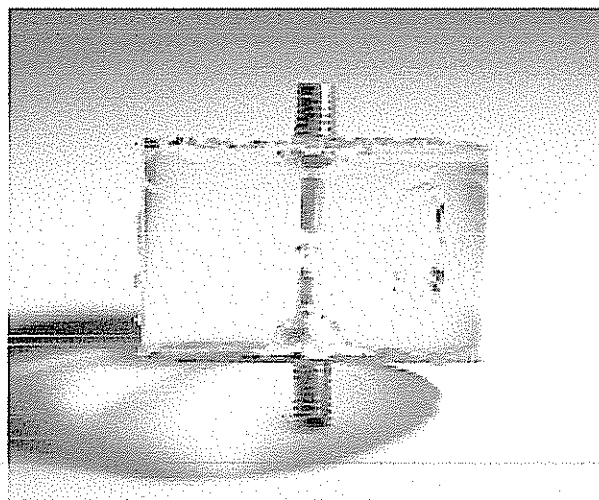
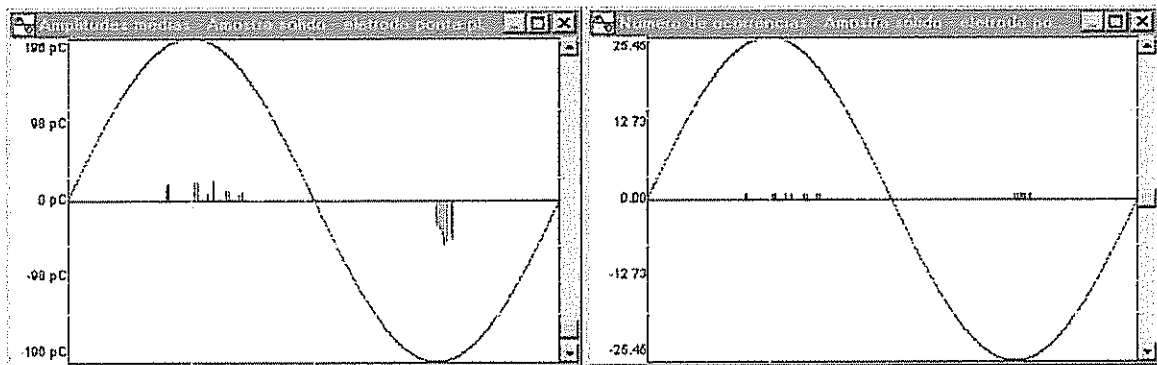


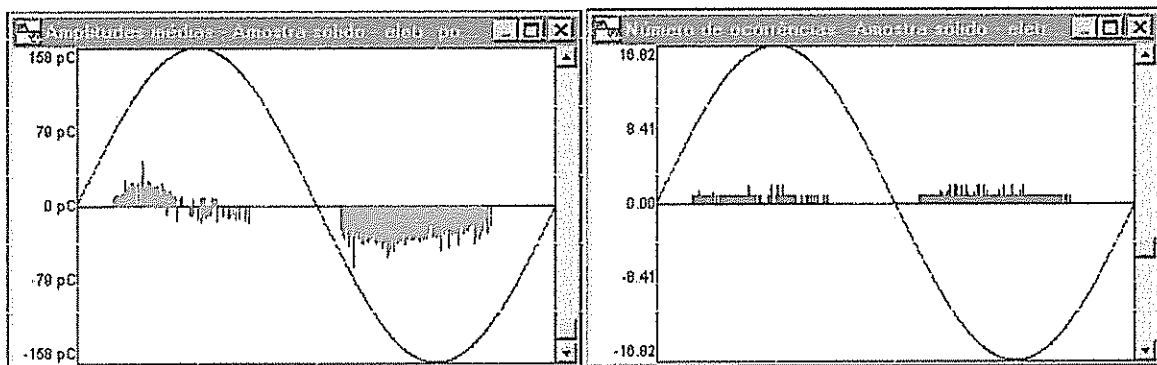
Figura 6.11: amostra de dielétrico sólido contendo cavidade entre os eletrodos

### 6.3 – Padrões de Descargas Parciais em sólidos

A medição de descargas parciais em sólidos foi feita com níveis de tensão 40 a 60 % acima da tensão de início das mesmas. Este procedimento foi adotado para que o isolamento fosse submetido a uma quantidade maior de descargas e consequentemente um arvorejamento ocorresse com mais facilidade. Até a conclusão deste trabalho um banco de dados com 25 ensaios havia sido obtido. Alguns padrões podem ser observados na figura 6.12.

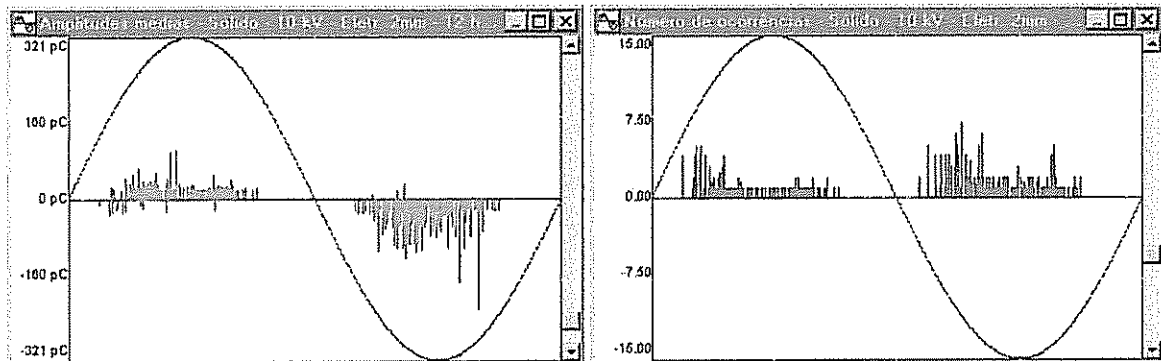


a) Eletrodo 100  $\mu$ m-plano, 7,5 kV



b) Eletrodo 2 mm, 10 kV, 2 horas de ensaio





c) Eletrodo 2 mm, 10 kV, 12 horas de ensaio

Figura 6.12: padrões de descargas parciais em isolamento sólido. Amplitudes médias e número de ocorrências por janela de fase em relação à fase da tensão de alimentação

Os padrões obtidos em sólidos apresentam grandes diferenças dos obtidos em ar. Pode-se observar que a distribuição dos pulsos nos ciclos positivo e negativo da senóide são muito semelhantes, tanto no formato quanto nas amplitudes das descargas. Esta similaridade foi observada em todos os padrões adquiridos, sendo uma característica que permite facilmente a diferenciação entre descargas ocorrendo nos dois tipos de isolamento. Outra característica interessante é a ocorrência de pulsos de polaridade oposta à da tensão de alimentação. Acredita-se que este fenômeno ocorra em isolamentos sólidos devido à deposição de cargas superficiais nas paredes do dielétrico, que fazem com que o campo resultante no interior da cavidade não dependa somente do campo gerado pela tensão de alimentação, mas de uma combinação entre este e o gerado por aquelas. A deposição de cargas pode ser intensa o bastante para gerar um campo resultante que consiga romper a capacidade de isolamento do ar contido na cavidade, causando uma descarga parcial de polaridade oposta à da tensão.

A localização do centro das distribuições nos ciclos positivo e negativo também é uma característica bastante diferenciadora entre os padrões nos dois tipos de isolamento. Nos padrões obtidos em sólidos o centro encontra-se deslocado à esquerda do instante de pico da senóide, levando a supor que um maior número de descargas parciais ocorre nas regiões em que o valor absoluto tensão de alimentação está aumentando, ou seja, no primeiro e terceiro quadrantes da senóide. Como visto no

capítulo 5, a distribuição de descargas em ar geralmente é simétrica em torno do instante de pico da tensão.

A influência destas observações sobre o resultado dos parâmetros estatísticos é relatada no capítulo 7. Estes resultados caracterizam de forma melhor as diferenças observadas nos padrões de pulsos no ar e no sólido.

#### 6.4 – Parâmetros temporais das Descargas Parciais em isolamento sólido

Como citado no capítulo 4, o estudo dos parâmetros temporais dos pulsos de descargas parciais foi feito com base em gráficos conhecidos como histogramas ou distribuições de frequência. Estes gráficos relacionam a quantidade de ocorrências dos tempos de frente e de meia onda dos pulsos, como pode ser observado na figura 6.13.

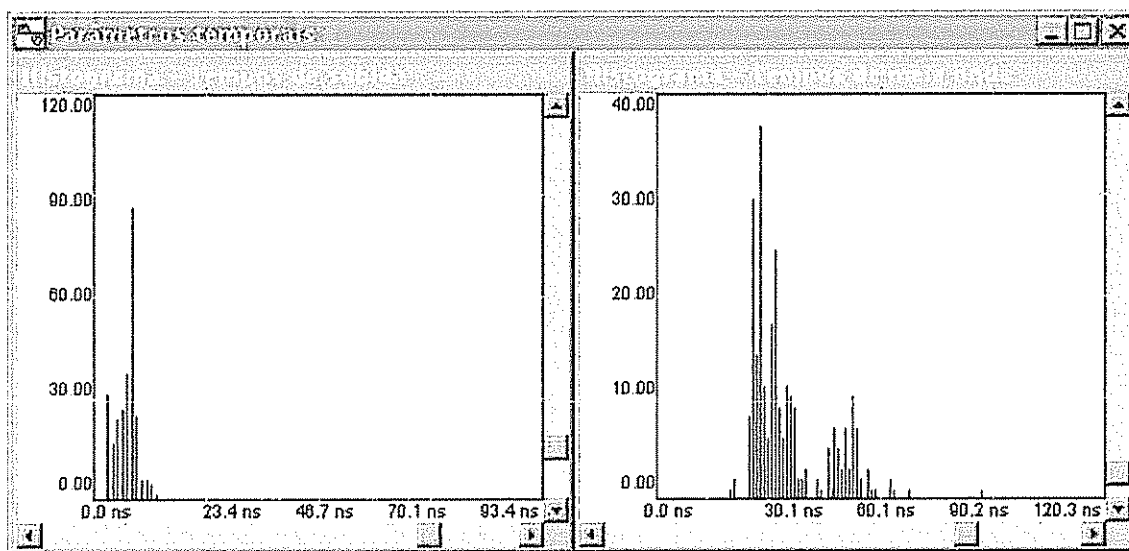


Figura 6.13: distribuição de frequências dos tempos de frente e tempos de meia onda Descargas parciais em ar a pressão atmosférica

As distribuições obtidas para descargas parciais em dielétrico sólido apresentaram-se muito similares. A maior parte dos tempos de frente obtidos foi de 2 a

3 ns, confirmando as observações anteriores, realizadas com o auxílio do osciloscópio. As descargas parciais em dielétrico sólido possuem tempos de frente bem menores do que no ar, fazendo com que o sistema de medição trabalhe bem próximo do limite de sua faixa de passagem.

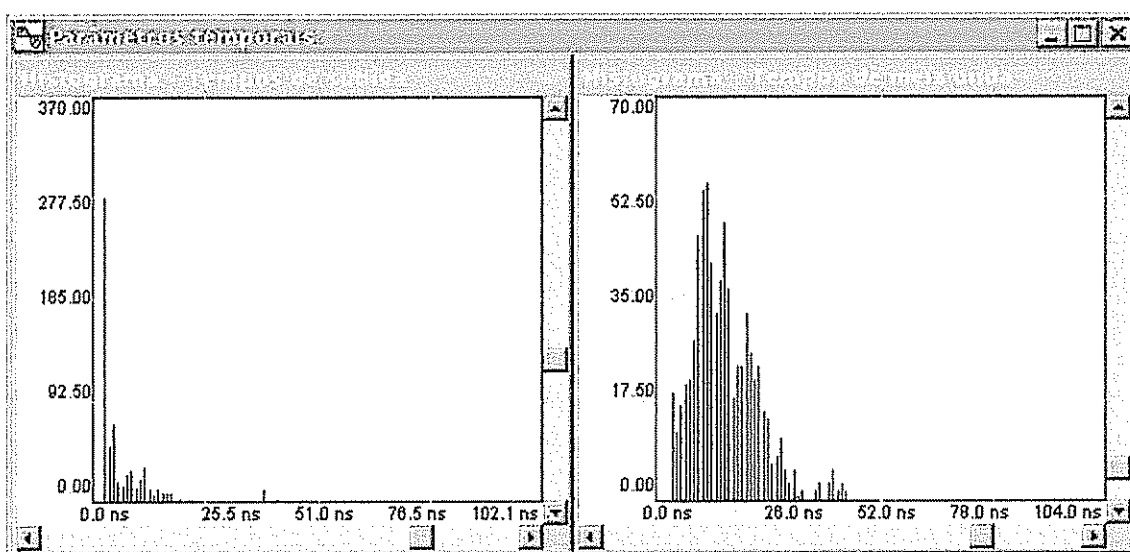


Figura 6 14: distribuição de frequência dos tempos de frente e meia onda. Descargas parciais em dielétrico sólido

Embora a grande concentração dos tempos de frente esteja em torno de 3 ns, as suas distribuições de frequência geralmente se estendem a valores bem maiores, até cerca de 40 ns, o que caracteriza grande variância deste parâmetro. Estes valores superiores apresentam baixa taxa de ocorrência, em geral 1 ou 2 pulsos por distribuição.

As distribuições de tempos de meia onda apresentaram grande concentração em 5 ns, como pode ser observado na figura 6.15. O espalhamento observado também é grande, sendo que algumas distribuições chegaram a valores de 60 ns para este parâmetro. Entretanto, como ocorrido nas distribuições de tempos de frente, valores mais elevados de tempos de meia onda ocorrem com menor frequência, sendo registrados por volta de 1 ou 2 pulsos no limite superior da distribuição.

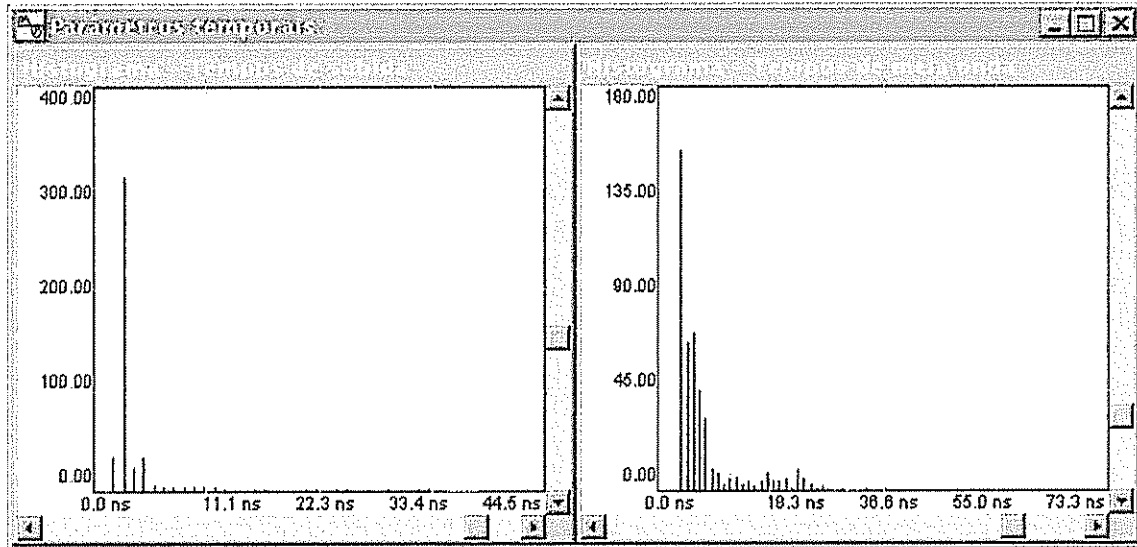
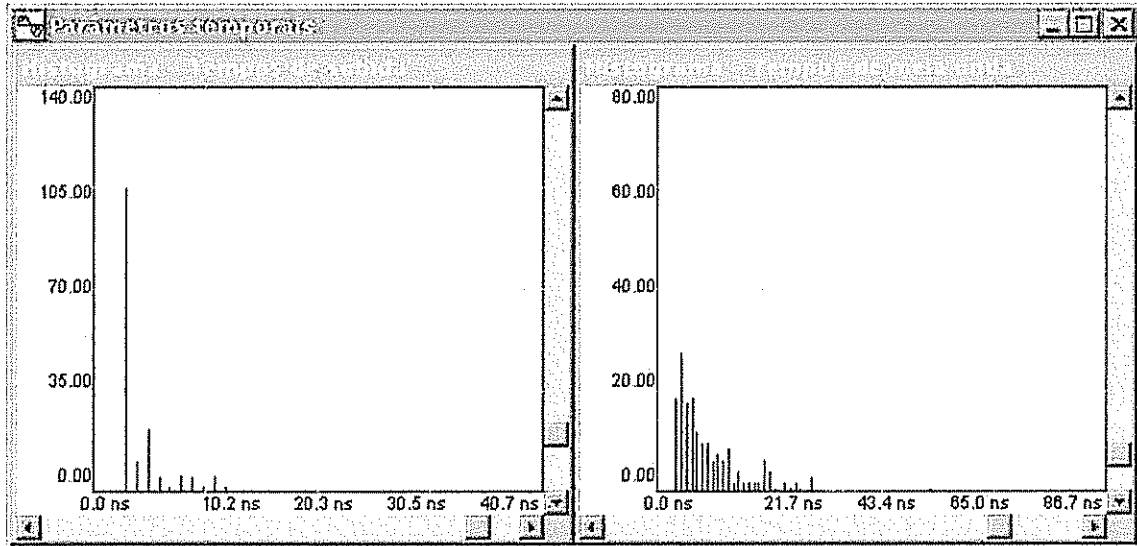
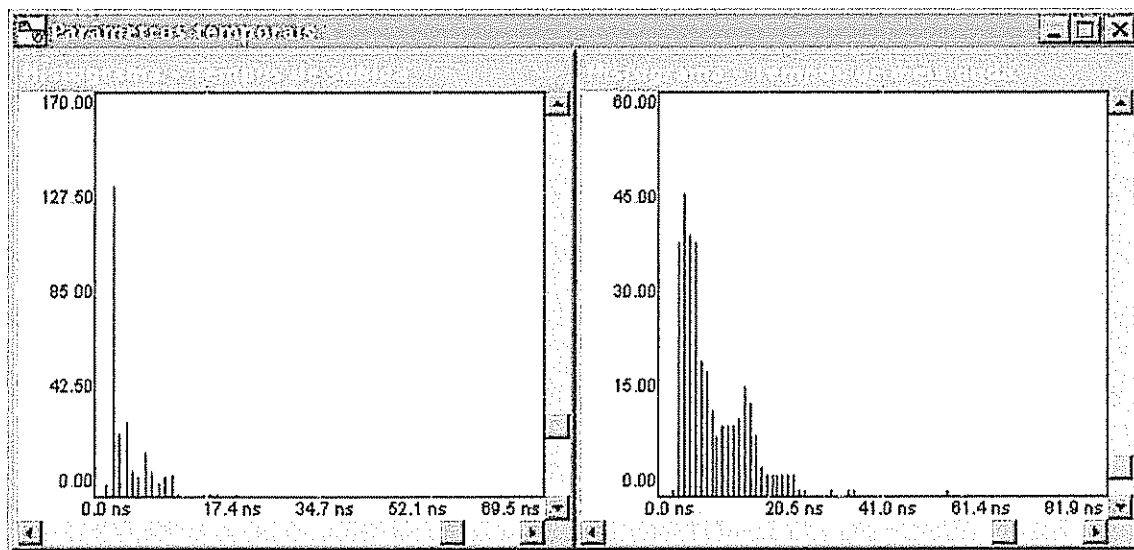


Figura 6 15: distribuição de frequência dos tempos de frente e meia onda. Descargas parciais em dielétrico sólido

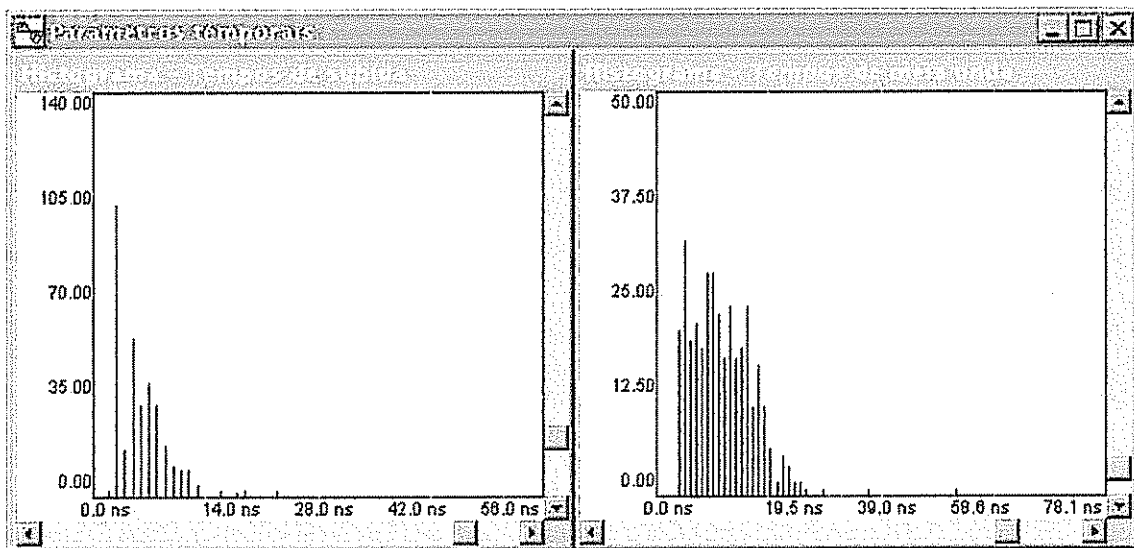
O formato das distribuições de tempos de frente e meia onda apresentaram grande aleatoriedade nos vários ensaios realizados. Esta aleatoriedade tende a dificultar a análise de descargas parciais com base nestes parâmetros. A figura 6.16 apresenta algumas distribuições obtidas em dielétrico sólido. Entretanto, com relação à aleatoriedade dos padrões, algumas características interessantes podem ser observadas. Como citado anteriormente, a grande maioria dos padrões coletados possuem valores de pico em 3 e 5 ns, respectivamente para o tempo de frente e tempo de meia onda. As distribuições possuem formatos bastante distintos, porém os limites estão sempre em torno de 40 e 60 ns, respectivamente. Estas características podem ser utilizadas para determinar a fonte das descargas parciais e a evolução de um arvorejamento no dielétrico.



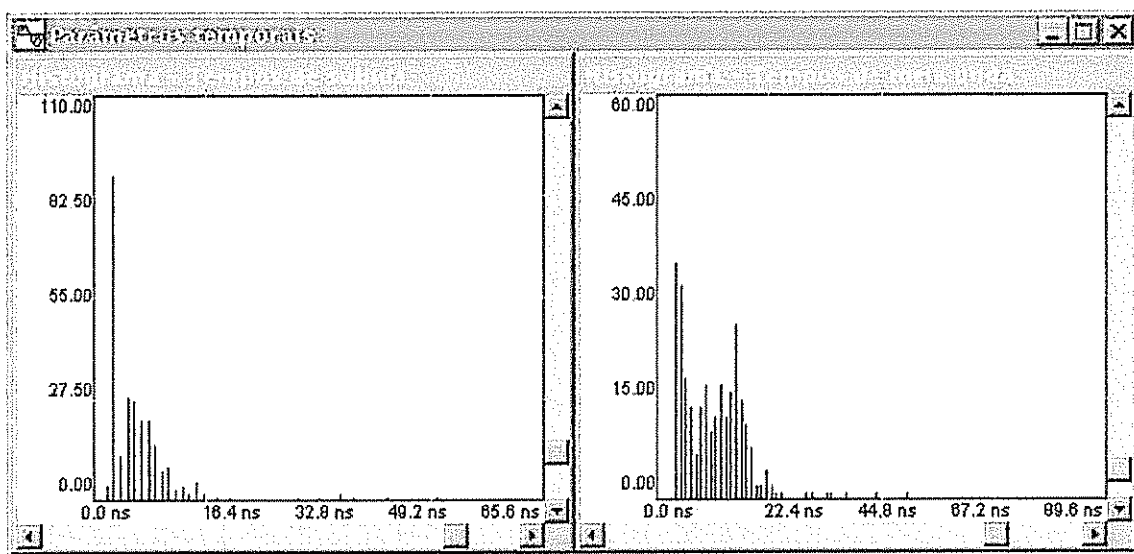
a) 12 horas de ensaio



b) 13 horas de ensaio



c) 14 horas de ensaio



d) 15 horas de ensaio

Figura 6.16: distribuições de frequência dos tempos de frente e meia onda Descargas parciais em dielétrico sólido, tensão de 10 kV

## Capítulo 7

# Resultados e análise dos parâmetros estatísticos

### 7.1 – Resultados dos parâmetros estatísticos para Descargas Parciais no ar

O pequeno número de ocorrências de descargas parciais no ciclo positivo da senóide faz com que a avaliação estatística dos padrões de pulsos no ar baseie-se quase totalmente na distribuição que ocorre no ciclo negativo. O único parâmetro do ciclo positivo relevante para a caracterização dos padrões no ar é o centro de distribuição, que geralmente localiza-se em torno de 2 ms a 3 ms. Esta característica pode ser observada na figura 7.1. Em quase todos os padrões obtidos observou-se este comportamento, sendo portanto um forte indicativo de que as descargas parciais estão ocorrendo no ar.

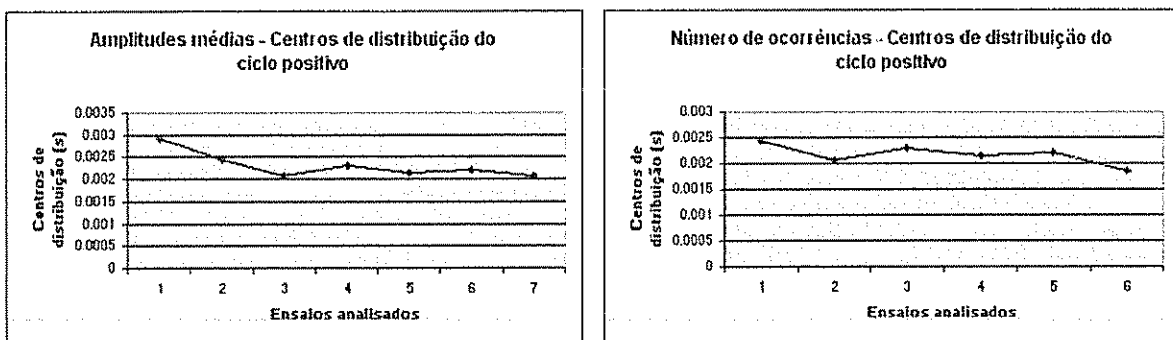


Figura 7 1: centro de distribuição dos gráficos de amplitudes médias e do número de ocorrências no ciclo positivo da senóide, para diversos níveis de tensão aplicada

Outro parâmetro que caracteriza fortemente as descargas parciais no ar é o centro de distribuição no ciclo negativo. Este parâmetro localiza-se em torno de 12,5 ms e permanece sem grandes alterações, independentemente da variação da tensão, diâmetro do eletrodo ou distância inter eletródica. A figura 7.2 apresenta o resultado deste operador para todos os ensaios realizados no ar. A média dos centros de distribuição foi de 12,59 ms com desvio padrão de 0,30 ms, para as distribuições de amplitudes médias. Para as distribuições de número de ocorrências a média foi de 12,72 ms com desvio de 0,18 ms. Estes resultados comprovam a grande estabilidade deste operador para descargas parciais no ar, sendo outro grande indicativo deste meio. Os resultados dos valores médios e desvios padrões dos operadores para todos os ensaios realizados são apresentados em seções posteriores deste capítulo.

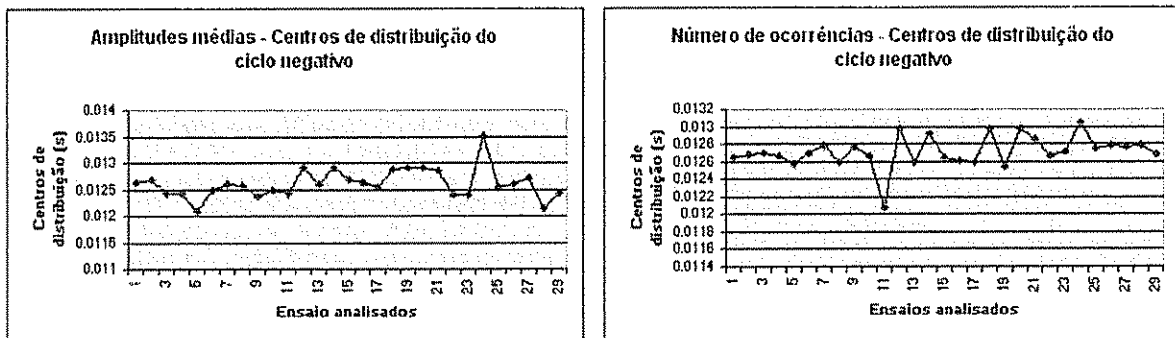


Figura 7.2: centros de distribuição dos gráficos de amplitudes médias e número de ocorrências, para o ciclo negativo da senóide Resultados de todos os ensaios realizados

O terceiro parâmetro bastante característico para descargas parciais no ar é a correlação cruzada entre as distribuições dos ciclos positivo e negativo. Como as duas distribuições são muito diferentes, o resultado deste operador é sempre muito próximo de 0, como pode ser observado na figura 7.3.



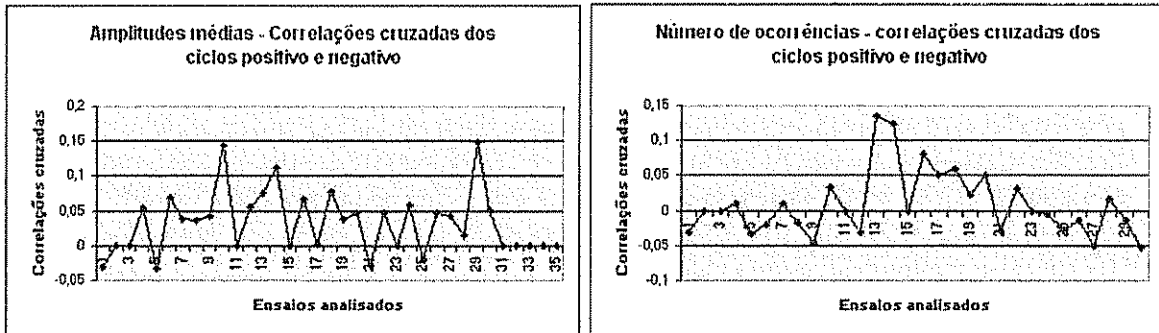
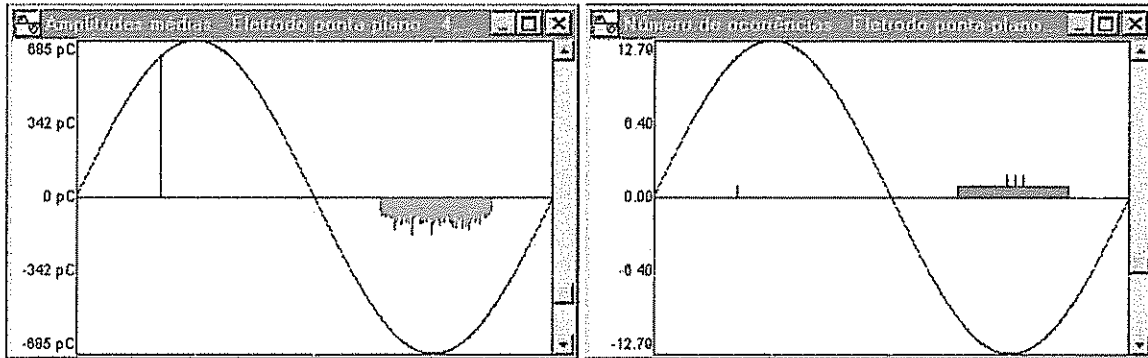


Figura 7.3: correlações cruzadas entre as distribuições dos ciclos positivo e negativo. Resultados de todos os ensaios realizados

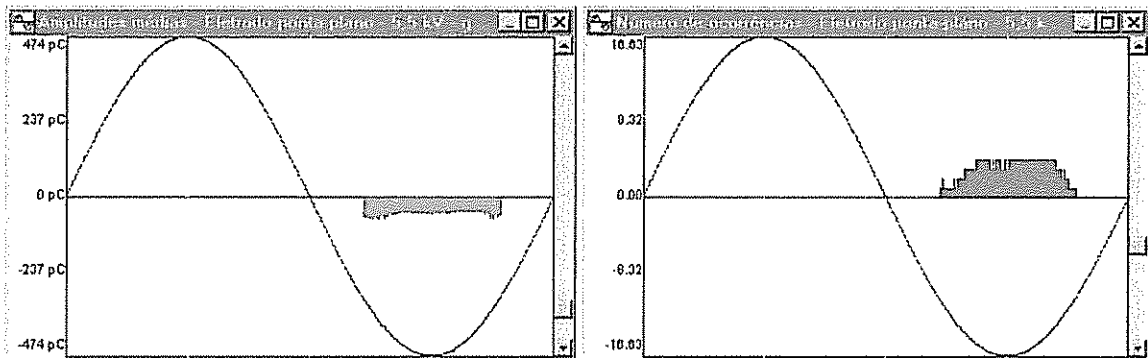
Os valores médios destes operadores foram 0,046 e 0,010, respectivamente para as distribuições de amplitudes médias e número de ocorrências.

#### 7.1.1 – Efeitos resultantes do aumento da tensão de alimentação

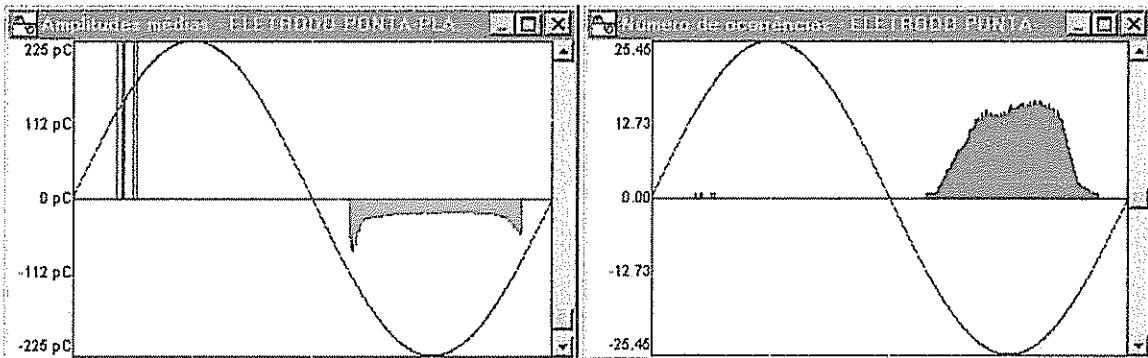
O efeito do aumento do valor da tensão de alimentação foi estudado mantendo-se fixo o diâmetro do eletrodo e a distância inter-eletródica de uma dada configuração. Para todos os dados coletados, observa-se que o aumento desta variável reflete-se em aumento do espalhamento da distribuição em torno da sua média, indicando que as descargas se iniciam em ângulos de fase menores e se extinguem em ângulos maiores. Outra característica observada é o aumento do número de descargas em uma única janela de fase, o que se reflete em maiores amplitudes nos gráficos de distribuição do número de ocorrências. Nota-se também mudanças no formato da distribuição de amplitudes médias no ciclo negativo da senóide, que passa a ter descargas de maiores amplitudes nas extremidades e menores no centro, gerando um padrão que se assemelha a um caracter  $\cap$ . Este comportamento pode ser visto no figura 7.4.



a) Eletrodo 100 $\mu$ m-plano, gap de 10 mm, 4,5 kV



b) Eletrodo 100 $\mu$ m-plano, gap de 10 mm, 5,5 kV



c) Eletrodo 100 $\mu$ m-plano, gap de 10 mm, 8,0 kV

Figura 7 4: efeitos do aumento da tensão de alimentação sobre a distribuição de DPs. Amplitudes médias e número de ocorrências por janela de fase em relação à fase da tensão de alimentação

O aumento do número de ocorrências em cada janela de fase é de se esperar, uma vez que o aumento no valor da tensão faz com que seus valores instantâneos ultrapassem em várias ordens de magnitude o valor suportável pelo gás. Assim, em uma

mesma janela de fase a tensão atinge mais múltiplos do valor de desrupção do gás, fazendo com que ocorra maior número de descargas.

O aumento do espalhamento da distribuição em torno do centro reflete-se na tendência de crescimento do desvio padrão. Este comportamento pode ser observado na figura 7.5. No caso da avaliação feita sobre a distribuição de amplitudes, este parâmetro dobrou seu valor, para os ensaios analisados.

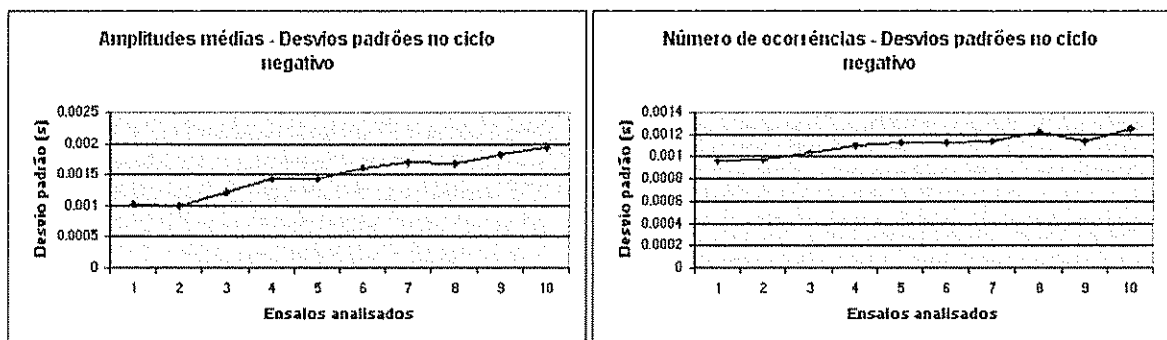


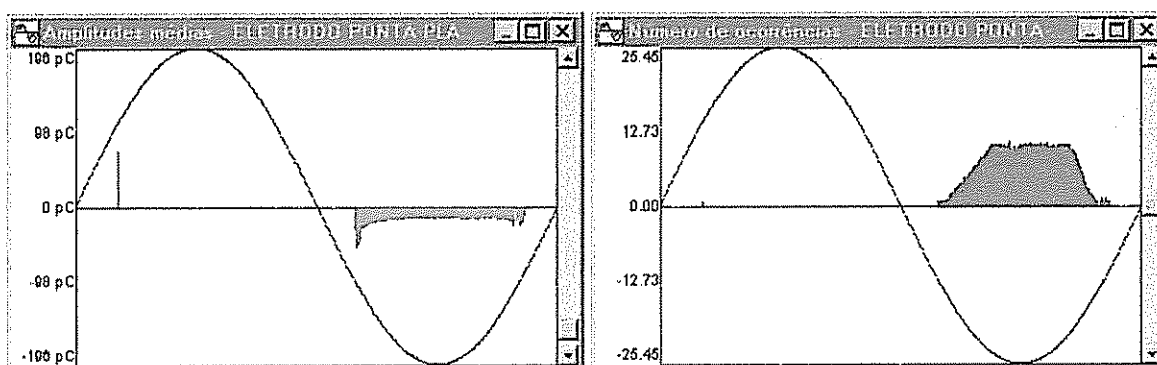
Figura 7.5: desvios padrões das distribuições de amplitudes médias e número de ocorrências no ciclo negativo da senóide

Os resultados dos outros operadores estatísticos apresentaram uma variância muito grande e não foram considerados satisfatórios para caracterizar o aumento da tensão.

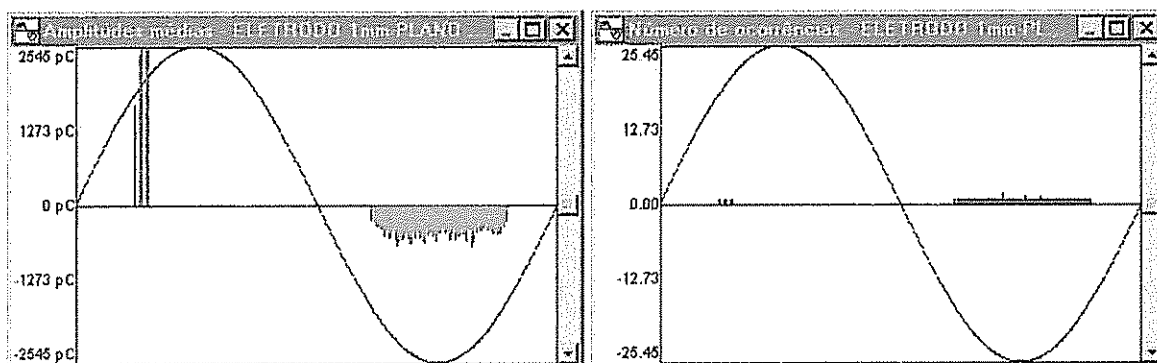
### 7.1.2 – Efeitos resultantes do aumento do diâmetro do eletrodo.

O aumento do diâmetro do eletrodo reflete-se no estabelecimento de um campo elétrico mais homogêneo no gap de ar. Este fato reflete-se nos padrões de descargas parciais através da diminuição do número de ocorrências por janela de fase e aumento das amplitudes dos pulsos. Observa-se também uma diminuição no espalhamento das descargas em torno do centro da distribuição. Todas estas características embasam a suposição de que uma maior homogeneidade de campo dificulta a ocorrência de descargas. Padrões observados para a configuração 100 $\mu$ m-plano apresentaram grande número de descargas de pequena amplitude, com maior espalhamento em torno do

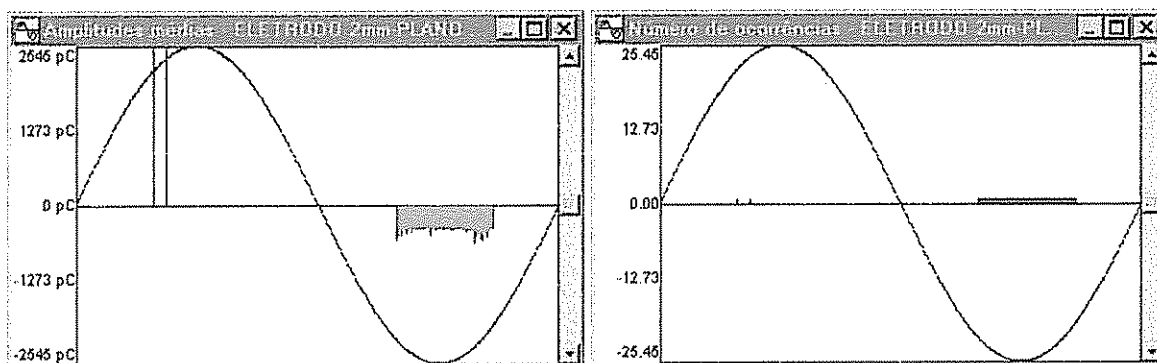
centro da distribuição. O aumento do diâmetro para 1 e 2 mm introduziu mudanças nos padrões, na forma de pequeno número de ocorrências, porém com pulsos de grandes amplitudes, e menor espalhamento. Estas características podem ser observadas na figura 7.6.



a) Eletrodo 100µm-plano, gap de 15 mm, 8,5 kV



b) Eletrodo 1mm-plano, gap 15 mm, 8,5 kV.



c) Eletrodo 2mm-plano, gap 15 mm, 8,5 kV.

Figura 7.6: efeitos do aumento do diâmetro dos eletrodos sobre a distribuição das DPs. Amplitudes médias e número de ocorrências por janela de fase em relação à fase da tensão de alimentação

A diminuição do espalhamento em torno do centro reflete-se em uma diminuição no desvio padrão calculado, exatamente ao contrário do que ocorre quando se aumenta o valor da tensão de alimentação. Este comportamento é apresentado na figura 7.7.

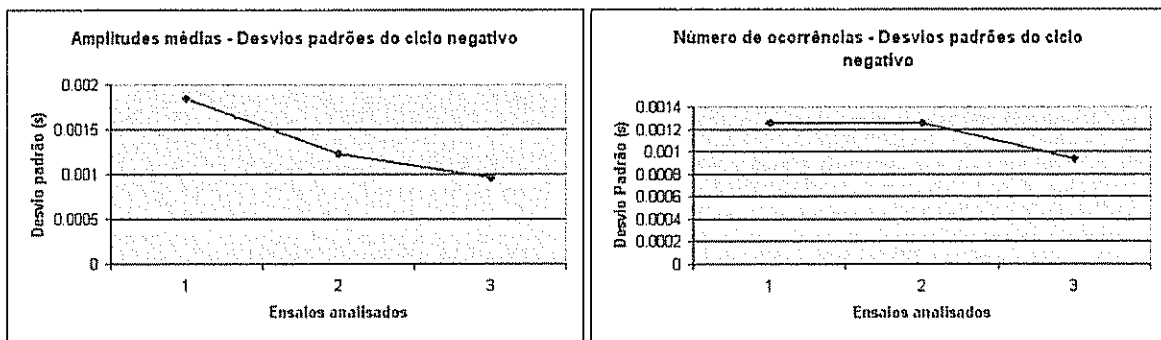


Figura 7.7: diminuição do desvio padrão das distribuições com o aumento do diâmetro dos eletrodos. Cálculo realizado sobre as distribuições de amplitudes médias e número de ocorrências, para o ciclo negativo da senóide

Outro operador que reflete bem o efeito do aumento do diâmetro dos eletrodos é o Kurtosis aplicado ao ciclo negativo das distribuições. O resultado deste operador progride em sentido contrário nas distribuições de amplitudes e número de ocorrências, ou seja, o aumento do diâmetro provoca um aumento do Kurtosis das distribuições de amplitude e uma diminuição das distribuições de número de ocorrências. Este comportamento pode ser observado na figura 7.8.

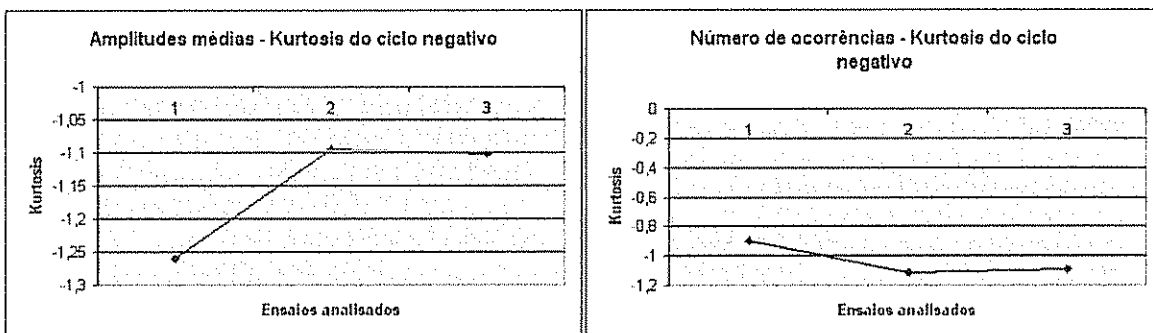
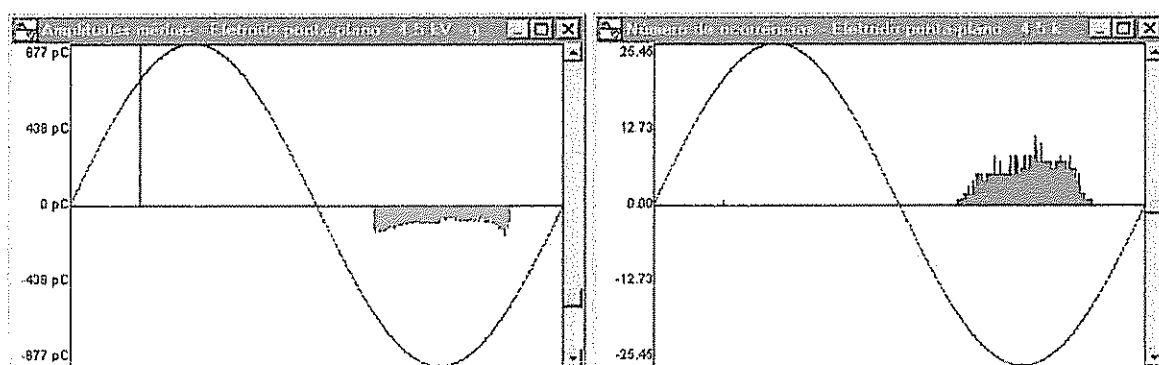


Figura 7.8: evolução dos resultados do operador Kurtosis com o aumento do diâmetro dos eletrodos. Resultados obtidos da distribuição no ciclo negativo da senóide

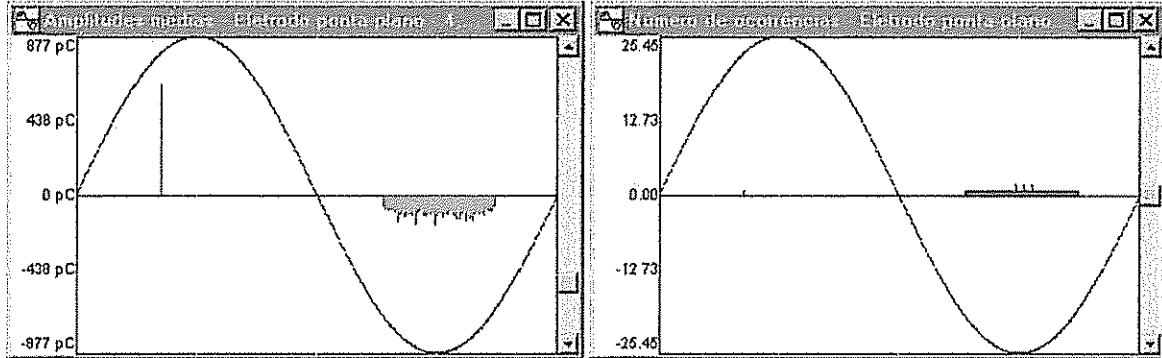
Embora os resultados destes operadores sejam condizentes com as distribuições observadas, a análise do aumento do diâmetro dos eletrodos foi feita com base em somente dois conjuntos de ensaios, com tensões de 7,5 kV e 8,5 kV. Esta análise carece, portanto, de um maior número de ensaios no futuro, talvez com taxas de crescimento do diâmetro também um pouco menores. Os outros operadores não apresentaram resultados significativos para a caracterização do aumento do diâmetro.

### 7.1.3 – Efeitos resultantes do aumento do espaço inter-eletródico.

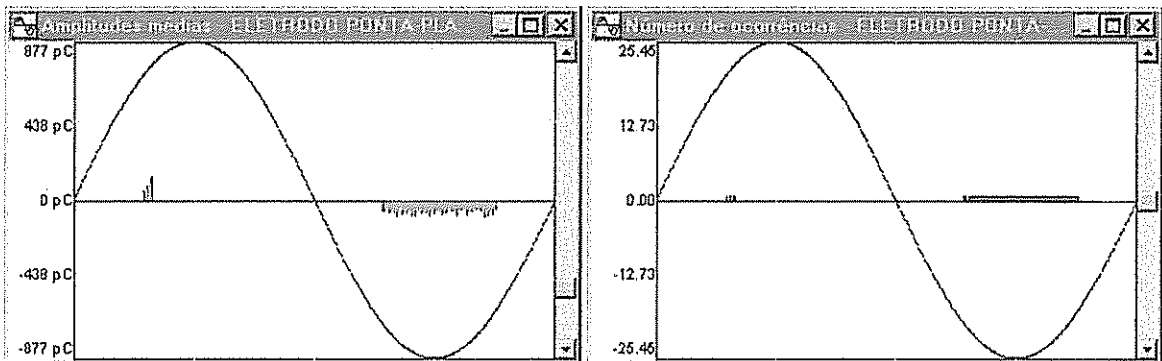
A variação da distância entre eletrodos reflete-se de forma mais discreta nas distribuições dos pulsos de descargas. De forma geral as amplitudes dos pulsos diminuem um pouco, bem como o seu espalhamento em torno do centro de distribuição. No entanto, nota-se grandes diferenças no gráfico do número de ocorrências em cada janela de fase. Este parâmetro tende a diminuir com o aumento da distância inter eletródica, o que indica a maior dificuldade de ocorrência de novas descargas. A figura 7.9 apresenta este comportamento.



a) Eletrodo 100 $\mu$ m-plano, 4,5 kV, gap de 5 mm



b) Eletrodo 100µm-plano, 4,5 kV, gap de 10 mm



c) Eletrodo 100µm-plano, 4,5 kV, gap de 15 mm

Figura 7 9: efeito da variação da distância entre eletrodos na distribuição das descargas parciais Amplitudes médias e número de ocorrências por janela de fase em relação à fase da tensão de alimentação

O operador estatístico que melhor reflete a variação da distância entre os eletrodos é o kurtosis aplicado ao ciclo negativo da distribuição do número de ocorrências. O formato destas distribuições tende a ficar mais “achatado” com o aumento da distância inter-eletródica, o que reflete-se em uma diminuição deste parâmetro. Este comportamento pode ser observado na figura 7 10.

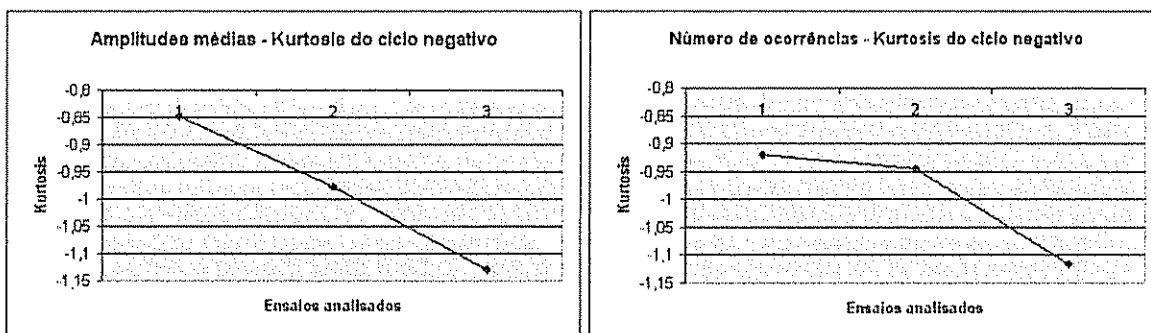


Figura 7 10: Evolução dos resultados do operador Kurtosis com o aumento da distância inter eletródica. Os resultados foram extraídos do ciclo negativo das distribuições

As observações com relação ao aumento do espaço inter-eletródico basearam-se em somente três distâncias: 5 mm, 10 mm e 15 mm. Os resultados observados estão em concordância com a suposição de que o aumento da distância produz maior uniformidade de campo e, portanto, maior dificuldade de geração de descargas. No entanto, um estudo mais detalhado deve ser sugerido, de forma a permitir a caracterização dos padrões de descargas com base em um maior número de dados.

## 7.2 – Resultado geral do comportamento das descargas parciais em ar

O resultado geral de todas as medições realizadas no ar é apresentado nas figuras 7.11 e 7.12. Estas figuras apresentam as médias e os intervalos de confiança de todos os operadores estatísticos utilizados e para todos os ensaios realizados, ou seja, incluindo os três tipos de eletrodos, distâncias de gap e todos os níveis de tensão.

A figura 7.11 apresenta os resultados dos operadores aplicados às distribuições de amplitudes médias. Os operadores que apresentaram menor desvio padrão foram os centros de distribuição positivo e negativo, os desvios padrões positivo e negativo, a correlação cruzada e o fator de descargas. Este resultado coincide com as observações relatadas anteriormente, fazendo crer que estes operadores são os que melhor caracterizam as descargas parciais no ar.



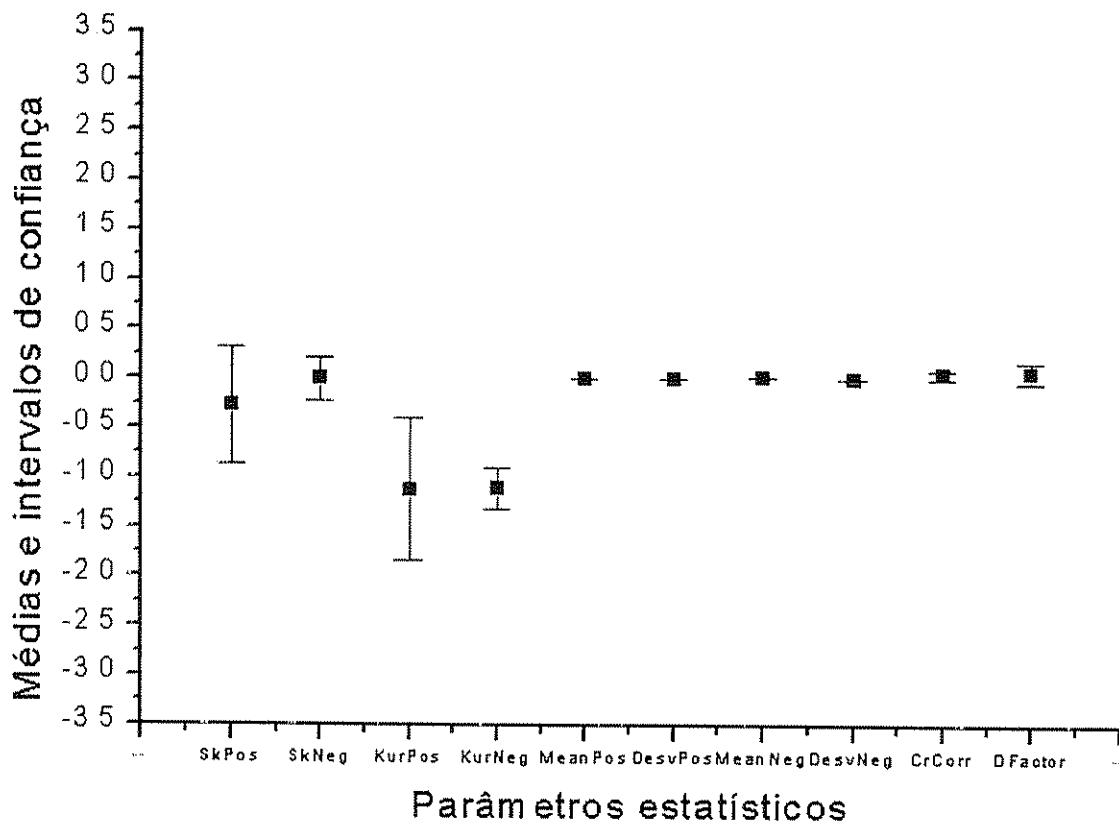


Figura 7.11: Média aritmética e intervalo de confiança dos resultados dos operadores estatísticos, aplicados às distribuições de amplitudes médias.

A figura 7.12 apresenta o resultado aplicado às distribuições de número de ocorrências. Os operadores com menor desvio padrão coincidem com os da figura 7.12, sendo portanto os que melhor caracterizam as distribuições de pulsos em ar.

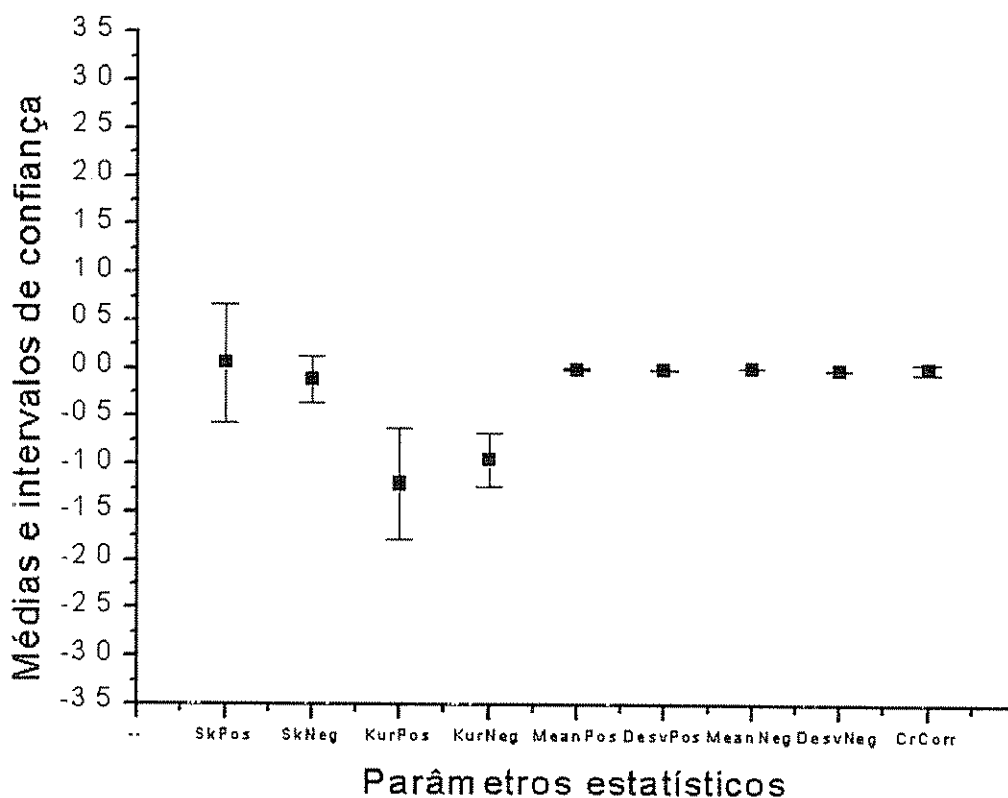


Figura 7.12: Média aritmética e intervalo de confiança dos resultados dos operadores estatísticos, aplicados às distribuições de número de ocorrências

A caracterização das descargas parciais em ar através da aplicação dos parâmetros estatísticos parece ser viável, sobretudo com base nos operadores que apresentaram menor desvio padrão em torno da média. O levantamento do resultado destes operadores foi feito com base em 34 ensaios realizados com as diferentes configurações de eletrodos e níveis de tensão. O estabelecimento de outros parâmetros relevantes pode ser otimizado através de técnicas de inteligência artificial que permitam a verificação da ocorrência de aglomerações em torno de determinadas variáveis, o que permite também a automação desta etapa de classificação dos padrões. Estas técnicas poderiam ser utilizadas, portanto, nas etapas de determinação de parâmetros relevantes para a classificação e, posteriormente, na classificação do resultado de novos ensaios propriamente dita.

### **7.3 – Resultados dos parâmetros estatísticos para Descargas Parciais em dielétricos sólidos**

Os padrões de descargas parciais obtidos em dielétricos sólidos são bastante diferentes dos obtidos no ar, e os resultados dos operadores estatísticos aplicados a estes padrões refletem estas diferenças. O aumento do número de ocorrências no ciclo positivo da senóide permite que a avaliação estatística dos dados seja feita também com base neste ciclo, o que já introduz uma diferença entre os dois tipos de fontes de descargas e melhora a sua identificação.

O resultado geral dos operadores estatísticos possui menor desvio padrão em torno da média, o que indica que as distribuições obtidas são bastante similares. A análise de descargas em sólidos visava a determinação de características que possibilitassem a identificação do crescimento de um arvorejamento. Os ensaios realizados foram identificados com o número de horas a que a amostra está sujeita às descargas parciais, na tentativa de identificar o início do fenômeno. Entretanto, como havia sido citado no capítulo 2, este acontecimento pode levar meses ou mesmo anos para ocorrer, o que impossibilitou a sua observação dentro do prazo disponível para conclusão do trabalho. Por isso observa-se a grande similaridade em todos os padrões obtidos. No entanto, os resultados foram satisfatórios no sentido de diferenciar descargas parciais ocorridas no ar das ocorridas no sólido, como poderá ser observado a seguir.

A figura 7.13 apresenta os resultados das médias e intervalos de confiança dos operadores estatísticos aplicados às distribuições de amplitudes médias dos pulsos. Quando comparado à mesma distribuição obtida em ar, observa-se pequenas diferenças nos resultados dos operadores Skewness e Kurtosis aplicados ao ciclo negativo da senóide. A comparação com resultados do ciclo positivo torna-se muito difícil uma vez

que os resultados neste ciclo para os padrões obtidos no ar é inconsistente devido ao baixo número de descargas.

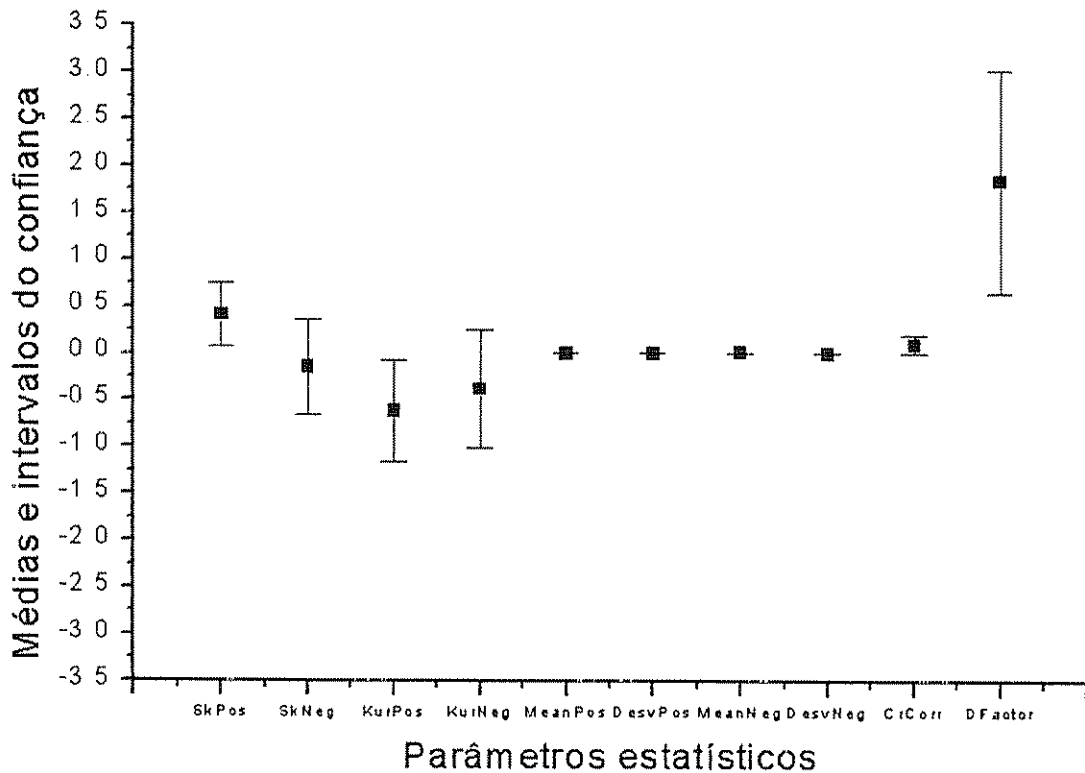


Figura 7.13: médias e intervalos de confiança dos resultados dos operadores estatísticos aplicados às distribuições de amplitudes médias

De forma interessante, a média dos centros de distribuição dos pulsos no ciclo positivo permaneceu bem próxima do resultado obtido no ar. Este último teve média de 2,8 ms, enquanto em sólidos a média foi de 3,1 ms. O centro de distribuição no ciclo negativo sofreu um deslocamento à esquerda, localizando-se, na média, em 11,5 ms, enquanto que no ar este valor estava em 12,6 ms

O espalhamento da distribuição no ciclo negativo da senóide é muito similar para descargas no ar e em dielétrico sólido, não sendo um bom operador para diferenciar as duas fontes. A média das correlações cruzadas cresceu de 0,046, para

descargas no ar, para 0,103, no sólido, refletindo a maior similaridade das distribuições nos ciclos positivo e negativo neste último.

O operador que melhor diferencia os dois tipos de fontes de descargas parciais é o fator de descargas. A média deste operador para descargas no ar foi de 0,079, enquanto que no sólido esta média aumentou para 1,85. Este comportamento reflete o grande aumento de descargas ocorridas no ciclo positivo da senóide quando o meio dielétrico é sólido, uma vez que ele é o resultado da carga média transferida no ciclo positivo dividida pela carga média no ciclo negativo. Embora para ensaios em sólidos os resultados deste operador tenham apresentado maior desvio padrão, ainda assim ele é o que melhor caracteriza as diferenças entre os dois tipos de fontes de descargas.

A figura 7.14 apresenta os resultados obtidos dos operadores aplicados às distribuições do número de ocorrências. Quando comparado ao mesmo gráfico para descargas no ar, os operadores que mais se diferenciam são novamente o Kurtosis e o centro de distribuição do ciclo negativo e a correlação cruzada entre as distribuições nos dois ciclos.

O valor médio para o Kurtosis do ciclo negativo, para descargas no ar, foi de  $-0,979$ , enquanto para descargas no sólido foi de  $0,318$ . De maneira similar ao ocorrido com as distribuições de amplitudes médias, o centro de distribuição do ciclo negativo teve valor médio de  $11,5$  ms, menor do que o valor no ar, que era de  $12,7$  ms. Por fim, a correlação cruzada para descargas em sólidos teve média de  $0,143$ , enquanto para o ar esta média era de  $0,0117$ . Este último parâmetro sofreu um grande aumento, refletindo a maior similaridade das distribuições nos dois ciclos quando a fonte das descargas está em meio sólido. Os outros parâmetros estatísticos apresentaram grandes variâncias e não foram considerados satisfatórios na determinação da fonte das descargas parciais.

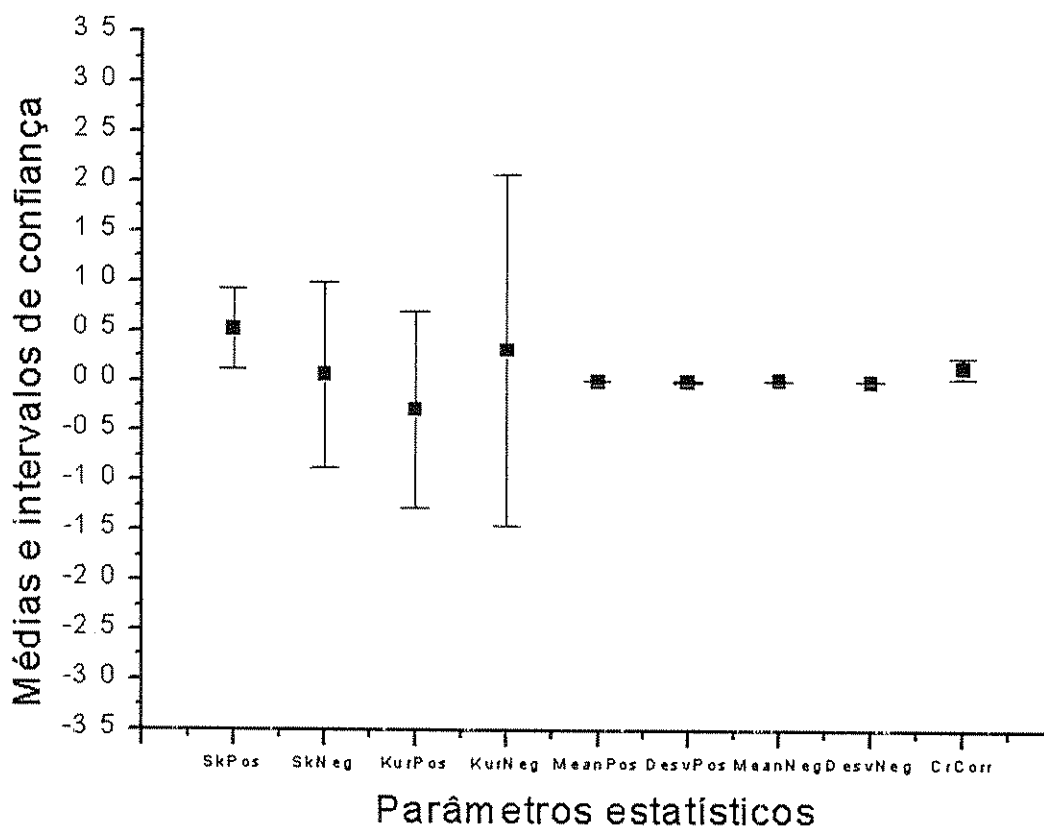


Figura 7 14: médias e intervalos de confiança dos resultados dos operadores estatísticos aplicados às distribuições de número de ocorrências

## Capítulo 8

# Conclusões e propostas de continuidade

A proposta inicial do trabalho era o desenvolvimento de um sistema de medição que permitisse a aquisição e análise de dados de descargas parciais, com o intuito de possibilitar o diagnóstico sobre a degradação do isolamento de equipamentos de alta tensão porventura submetidos à ocorrência do fenômeno.

Os testes realizados com o sistema desenvolvido indicaram que o propósito foi atingido. O sistema permite a aquisição e a análise dos dados, com base nas técnicas relativas à fase da tensão de alimentação e a parâmetros temporais dos pulsos, oferecendo uma série de recursos de visualização para o operador. Estes recursos permitem a análise dos dados adquiridos e a determinação do estado de degradação do isolamento, com base no seu conhecimento pessoal.

As ferramentas de análise estatística implementadas mostraram ser satisfatórias para a caracterização das diferenças existentes entre os diversos formatos de distribuições obtidos. Estas ferramentas proporcionam uma série de benefícios, uma vez que permitem quantizar estas diferenças e, portanto, comparar duas distribuições através de números correspondentes ao seu formato. A quantização das distribuições cria a possibilidade de reter o conhecimento sobre o comportamento das descargas parciais em diversos tipos de sistemas de isolamento, fazendo com que o diagnóstico do ensaio deixe de depender somente da experiência pessoal do técnico do laboratório.

A eficácia do uso das ferramentas estatísticas parece-nos comprovada pelos estudos realizados em descargas parciais no ar e em isolamento sólido. Os resultados obtidos pelo método permitem claramente identificar o tipo de meio em que as descargas parciais ocorrem, com base em parte dos operadores estatísticos implementados. Estes operadores foram os que apresentaram maior estabilidade em determinada configuração, conseguindo caracterizá-la completamente. As observações realizadas visualmente, através das distribuições de pulsos, também confirmaram-se após a aplicação dos operadores, indicando forte coerência entre o que era suposto e o resultado matemático obtido. Ainda, o estudo de diversas configurações de eletrodos em ar mostrou que os operadores podem ser utilizados na identificação de mudanças em variáveis de um mesmo arranjo, como foi observado para o aumento da tensão de alimentação, do diâmetro dos eletrodos e da distância inter-eletródica.

O uso dos operadores estatísticos para a detecção do crescimento de um arvorejamento não foi possível devido à limitação de tempo para a conclusão do trabalho, conforme citado no capítulo 7. Entretanto, com base nas observações realizadas no ar, pode-se supor que esta identificação é possível, desde que o crescimento do arvorejamento resulte em mudanças no formato das distribuições dos pulsos de corrente.

Os estudos realizados até o momento formam um banco de dados inicial, em que tentamos caracterizar o comportamento das descargas em algumas configurações básicas. O número de possibilidades envolvido em um estudo mais amplo é muito grande e, portanto, é deixado como uma proposta de continuidade do trabalho. Este estudo poderia englobar maior número de configurações eletródicas em ar e o uso de cavidades de diversos formatos em isolamentos sólidos. Ainda, seria de grande interesse a investigação de descargas parciais em isolamentos líquidos, como nos óleos isolantes dos transformadores de potência.



A análise de descargas baseada em parâmetros temporais pareceu-nos muito complexa para ser utilizada na prática, em equipamentos eletricamente grandes instalados em seus locais de uso definitivos. Esta situação introduz uma série de restrições que impedem o uso desta técnica, sendo as principais a grande distorção do sinal durante seu curso entre o local de origem e o ponto de medição e a incidência de ruídos eletromagnéticos no local do ensaio. Entretanto, a técnica é interessante na pesquisa do fenômeno em laboratório, até mesmo para a busca de novas formas de medição ou outros fatores que possam melhorar o diagnóstico do estado do isolamento. Nesta situação, em que fatores externos podem ser controlados até certo ponto, a técnica torna-se viável, como ficou demonstrado pelos resultados obtidos neste trabalho. Porém, caso o objetivo seja a avaliação de equipamentos em situações similares à citada acima, o autor sugere o uso da técnica de análise relativa à fase da tensão de alimentação.

## **8.1 – Propostas de continuidade**

Como citado acima, a principal proposta de continuidade considerada pelo autor é a continuação da investigação do comportamento das descargas parciais em diversos tipos de isolamento e configurações eletródicas. Esta investigação permite formar a base de conhecimento necessária para que o sistema consiga atingir o estágio de executar diagnósticos sobre a degradação do isolamento.

O uso de técnicas de inteligência artificial seria uma sequência natural deste trabalho. Estas técnicas podem ser utilizadas para identificar novos parâmetros estatísticos, que poderiam facilitar a caracterização das distribuições, bem como para automatizar o diagnóstico dos ensaios, com base nos operadores já existentes. As técnicas de inteligência artificial já vêm sendo utilizadas com êxito há alguns anos no diagnóstico da degradação presente no isolamento, como pode ser observado em diversos trabalhos citados ao longo deste documento.

Outra área que carece de grandes melhorias na pesquisa de descargas parciais é a medição em situações com alta incidência de ruídos no ambiente. Esta situação frequentemente tem sido um grande problema, uma vez que os equipamentos que passam por análises de descargas parciais muito comumente encontram-se instalados em locais em que incidem fortes campos eletromagnéticos, como é o caso de subestações de energia elétrica e nas proximidades de linhas de transmissão. Em casos como estes algumas técnicas podem ser utilizadas para melhorar a medição, como o uso de filtragem digital, Wavelets ou mesmo a aplicação de sistemas de inteligência artificial na detecção dos pulsos de corrente. O uso de um sistema de aquisição em tempo real poderia permitir a medição do sinal e a identificação de pulsos antes mesmo da sua transferência para o computador, através de programas executando na memória do próprio digitalizador, aumentando a imunidade do sistema aos ruídos do ambiente.

Por fim, as técnicas desenvolvidas devem ser aplicadas a equipamentos reais, em situações em que defeitos estilizados são inseridos propositadamente nestes e em situações em que não se conhece o defeito presente. Estas duas etapas foram apresentadas no capítulo 3 e são extremamente importantes para a evolução do sistema até o ponto em que seja possível automatizar o diagnóstico do ensaio. As duas etapas são também as mais complexas e demoradas porque dependem de fatores aleatórios que sofrem influência do tipo de equipamento sob ensaio, modelo, fabricante, etc., introduzindo um grande número de variáveis no processo.

## Referências bibliográficas

- [1] Ahmed, N. M., Srinivas, N. N., “On-line partial discharge detection in cables”. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 5, n. 2, p. 181-188, abril, 1998.
- [2] Austen, A. E. W., Hackett, W. *Journal*. Institution of Electrical Engineers. Vol. 91, part I, p. 298-322. 1994. In: Bartnikas, R., McMahon, E. J. (Ed.), *Engineering dielectrics – vol. I. Corona measurement and interpretation*. Philadelphia: ASTM Special Technical Publication STP 669, 1979.
- [3] Bartnikas, R. “Detection of partial discharges (corona) in electrical apparatus”. IEEE Transactions on Electrical Insulation. Vol. 25, n. 1, p. 111-121, fev. 1990.
- [4] Bartnikas, R. “Effect of pulse rise time on the response of corona detectors”. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-7, n. 1, p. 3-8, março de 1972.
- [5] Bartnikas, R., McMahon, E. J. (Ed.), *Engineering dielectrics – vol. I. Corona measurement and interpretation*. Philadelphia: ASTM Special Technical Publication STP 669, 1979.
- [6] Carminati, E., Gandelli, A., Osvath, P. “A standard calibrator for PD testing”. In: IEEE International Symposium on Electrical Insulation. 7-10 de junho, 1992. Baltimore. USA. P. 379-382.
- [7] Deitel, H. M., Deitel, P. J. *C++ - How To Program*. 2<sup>nd</sup> ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, Inc , 1998.
- [8] Doebelin, E. O. *Measurement Systems – Application and Design*. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill Publishing Company. 1990.
- [9] Fruth, B. A., Gross, D. W. “Partial discharge signal generation, transmission and acquisition”. IEE Proceedings on Science and Measurement Technology. Vol. 142, n. 1, p. 22-28, jan. 1995.

- [10] Fruth, B., Niemeyer, L. "The importance of statistical characteristics of partial discharge data". IEEE Transactions on Electrical Insulation. Vol. 27, n. 1, p. 60-69, fev. 1992.
- [11] García-Colón, V. R., Cornick, K. J., "Study of partial discharge patterns at very high frequencies". In: The 5<sup>th</sup> Asian Conference on Electrical Discharge. November 25-27, 1992. Singapore. Pp. 1-4.
- [12] Gulski, E. "Computer aided measurement of partial discharges in HV equipment". IEEE Transactions on Electrical Insulation. Vol. 28, n. 6, p. 969-982, dez. 1993.
- [13] Gulski, E. "Discharge pattern recognition in high voltage equipment". IEE Proceedings on Science and Measurement Technology. Vol. 142, n. 1, p. 51-61, jan. 1995.
- [14] Hayt Jr, W. H. *Eletromagnetismo*. 3<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1993.
- [15] Hikita, M., Kato, T., Okubo, H. "Partial discharge measurements in SF<sub>6</sub> and air using phase-resolved pulse-height analysis". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 1, n. 2, p. 276-283, abril de 1994.
- [16] IEC Publication 60270. *Partial Discharge Measurement*. 2<sup>nd</sup> ed. 1981.
- [17] Kreuger, F. H., Gulski, E., Krivda, A. "Classification of partial discharges". IEEE Transactions on Electrical Insulation. Vol. 28, n. 6, p. 917-931, dez. 1993.
- [18] Meek, J. M., Craggs, J. D. *Electrical Breakdown of Gases*. Oxford: Clarendon Press, 1953. In: Bartnikas, R., McMahon, E. J. (Ed.), *Engineering dielectrics – vol. I. Corona measurement and interpretation*. Philadelphia: ASTM Special Technical Publication STP 669, 1979.
- [19] Mitra, S. K. *Digital Signal Processing – A Computer Based Approach*. New York: McGraw-Hill International Editions, 1998.
- [20] Mittermayer, C., Steininger, A. "On the determination of dynamic errors for rise time measurement with an oscilloscope". IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Vol. 48, n. 6, p. 1103-1107, dez. 1999.

- [21] Mota, H. O., Vasconcelos, F. H., “Sistema de aquisição de descargas parciais baseado em osciloscópios digitais programáveis”. IV Semetro - Seminário Internacional de Metrologia Elétrica. 4 a 7 de dezembro, 2000. São Paulo, Brasil.
- [22] Mota, H. O., Vasconcelos, F. H., “A partial discharge data acquisition system based on programmable digital oscilloscopes”, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. May 21-23, 2001. Budapest, Hungary.
- [23] Mota, H. O., Vasconcelos, F. H., “Considerações sobre a faixa de passagem do sistema de medição na aquisição de dados de descargas parciais”. IV Semetro - Seminário Internacional de Metrologia Elétrica. 4 a 7 de dezembro, 2000. São Paulo, Brasil.
- [24] Mota, H. O., Vasconcelos, F. H., “Deposição de cargas elétricas em isoladores poliméricos em meio a SF<sub>6</sub>: equipamentos e sistemas de medição” III Encontro Nacional de Engenharia de Alta Tensão. 4 a 7 junho, 2000. Campina Grande, Brasil.
- [25] Ogata, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Ed. Prentice/Hall do Brasil, 1993.
- [26] Okamoto, T., Tanaka, T. “Novel partial discharge measurement computer-aided measurement systems”. IEEE Transactions on Electrical Insulation. Vol. EI-21, n. 6, p. 1015-1019, dez. 1986.
- [27] Oppenheim, A. V., Willsky, A. S., Nawab, S. H. *Signals & Systems*. 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey: Prentice-Hall International, Inc., 1997.
- [28] Paul, R. C. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1992.
- [29] Petzold, C. *Programando para Windows 95*. . São Paulo: Makron Books do Brasil Ltda., 1997.
- [30] Phung, B. T., Blackburn, T. R., James, R. E. “The use of artificial neural networks in discriminating partial discharge patterns”. [s.n.t.]. P. 25-28.
- [31] Salama, M. M. A., Bartnikas, R. “Fuzzy logic applied to PD pattern classification”. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 7, n. 1, p. 118-123, fev. 2000.

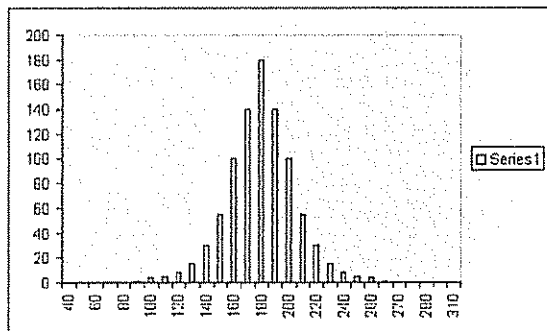
- [32] Satish, L., Zaengl, W. S. “Artificial neural networks for recognition of 3-d partial discharge patterns”. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 1, n. 2, p. 265-275, abril de 1994.
- [33] Schnell, S. (Ed.) *Technology of Electrical Measurements*. Chicester: John Wiley and Sons, Inc., 1993.
- [34] Snedecor, G. W., Cochran, W. G. *Statistical Methods*. 8<sup>th</sup> ed. Iowa: Iowa State University Press, 1989.
- [35] Wang, Z., Zhu, D., Tan, K., Li, F. “PD monitor system for power generators”. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 5, n. 6, p. 850-856, dez. 1998.
- [36] Whitehead, S. *Dielectric Breakdown of Solids*. Oxford: Oxford University Press. 1953. In: Bartnikas, R., McMahon, E. J. (Ed.), *Engineering dielectrics – vol. I. Corona measurement and interpretation*. Philadelphia: ASTM Special Technical Publication STP 669, 1979.
- [37] Zingales, G. “The requirements of a PD monitoring system analyzed in the time domain”. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 7, n. 1, p. 2-5, fev. 2000.

# Apêndice A

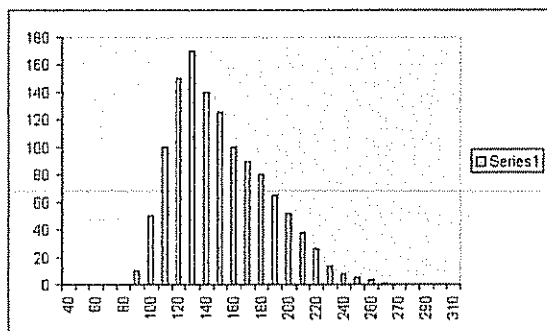
## Operadores estatísticos

### A.1 - Assimetria (Skewness)

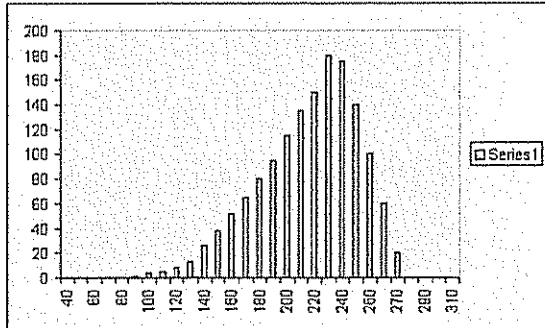
O skewness é conhecido como terceiro momento em relação à média e é um operador que mede a assimetria de uma distribuição em relação à sua média. Caso a distribuição seja assimétrica à esquerda, o resultado da operação é positivo. Caso a assimetria seja à direita, o resultado é negativo. No caso de uma distribuição perfeitamente simétrica, o resultado é zero. Os três casos de assimetria e os resultados obtidos são apresentados na figura A.1.



a) Skewness = 0



b) Skewness = 0.57



c) Skewness = -0.60

Figura A 1: cálculo da assimetria das distribuições.

O operador de assimetria é calculado por:

$$\begin{aligned}
 m_3 &= \sum \left( X - \bar{X} \right)^3 / n \\
 m_2 &= \sum \left( X - \bar{X} \right)^2 / n \\
 Sk &= \frac{m_3}{(m_2 \sqrt{m_2})} \tag{A.1}
 \end{aligned}$$

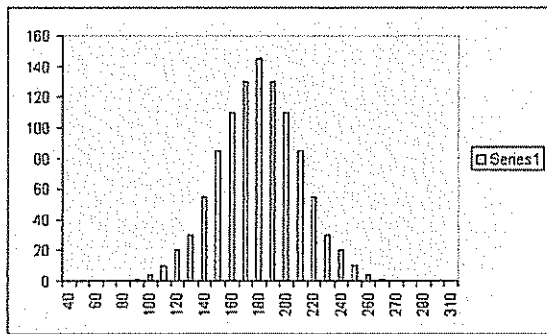
onde, no caso das descargas parciais, X é a amplitude de cada pulso de descarga, X-barra é a média aritmética da distribuição e n é o número de descargas ocorridas.

O operador skewness foi aplicado às distribuições de descargas parciais separadamente para o ciclo positivo e o ciclo negativo da senóide de alimentação. Exemplos da aplicação do operador serão apresentados nos capítulos 5, 6 e 7. As conclusões retiradas do estudo feito com base em todos os operadores são apresentadas no capítulo 7.

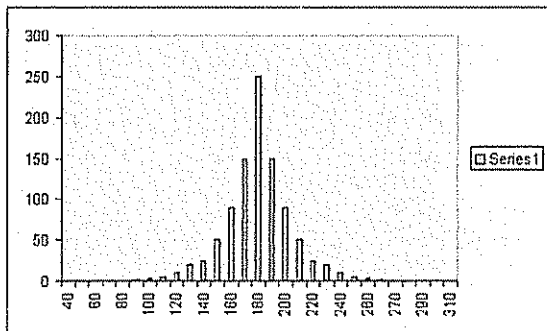


## A.2 – Espalhamento (Kurtosis)

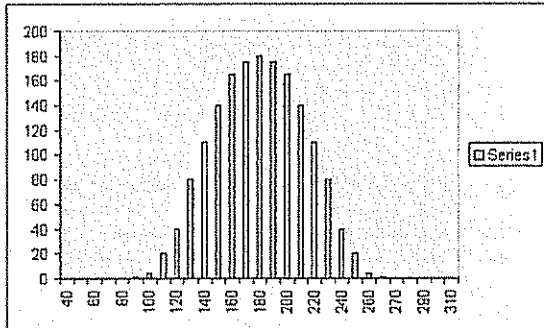
O segundo operador utilizado é denominado operador de espalhamento ou kurtosis, e é conhecido como o momento de quarta ordem de uma distribuição em relação à sua média. O operador mede o espalhamento da distribuição em relação à média, tomando como base a distribuição normal. Assim, para uma distribuição que é exatamente igual a uma normal, o operador retorna zero. Caso a distribuição seja mais estreita que uma normal, ou seja, mais concentrada em torno da média, o operador retorna um valor positivo. No caso da distribuição espalhada, o operador retorna um valor negativo. A figura A.2 apresenta os valores calculados de kurtosis para três distribuições diferentes.



a) Kurtosis = 0



b) Kurtosis = 1.43



c) Kurtosis = -0.61

Figura A.2: cálculo do operador kurtosis.

O cálculo do espalhamento da distribuição é dado por:

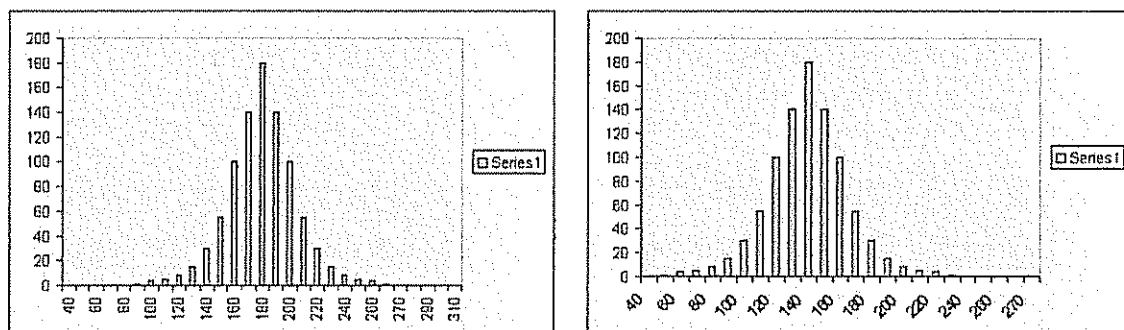
$$m_4 = \frac{\sum (X - \bar{X})^4}{n}$$

$$ku = m_4 / m_2^2 - 3 \tag{A.2}$$

onde  $m_2$ ,  $X$ ,  $\bar{X}$  e  $n$  foram definidos na seção A.1. Como no caso do skewness, o kurtosis foi aplicado separadamente às distribuições ocorridas no ciclo positivo e negativo da senóide de alimentação.

### A.3 – Centro de distribuição

O cálculo do centro de distribuição das descargas determina o instante do período da senóide em que a média da distribuição está localizada. Este operador foi considerado importante porque operadores como o skewness e kurtosis detectam variações na forma da distribuição mas não detectam a sua localização média em relação à senóide. Este operador permite detectar o deslocamento do centro da distribuição devido ao crescimento de arvorejamentos. Por exemplo, as duas distribuições da figura A.3 possuem os mesmos valores de skewness e kurtosis, entretanto a localização dos seus centros é diferente.



a)  $Sk = 0$ ,  $Ku = 1.03$ , média = 180

b)  $Sk = 0$ ,  $Ku = 1.03$ , média = 140

Figura A.3: Variação do centro da distribuição.

O centro de distribuição é obtido através do cálculo da média aritmética, eq. A.3.

$$\bar{X} = 1/n \sum_{j=1}^k f_j X_j \quad (A.3)$$

onde  $f_j$  é a frequência de ocorrência correspondente a cada amostra  $X_j$ . No caso do cálculo da média aplicada às descargas parciais, os valores  $f_j$  correspondem às amplitudes dos pulsos de descargas registrados durante o ensaio. Os valores  $X_j$  correspondem aos instantes de ocorrência dos pulsos, em segundos. O resultado da operação retorna o instante, no período da senóide, em que se localiza a média da distribuição.

O centro de distribuição também é um operador aplicado separadamente às distribuições nos ciclos positivo e negativo da senóide.

### A.4 – Correlação cruzada

A correlação cruzada é uma medida da diferença entre os formatos das distribuições ocorridas nos ciclos positivo e negativo da senóide. Se as duas distribuições possuem a mesma forma (mas não necessariamente as mesmas amplitudes),  $cc = 1$ . Se elas são completamente diferentes,  $cc = 0$ .

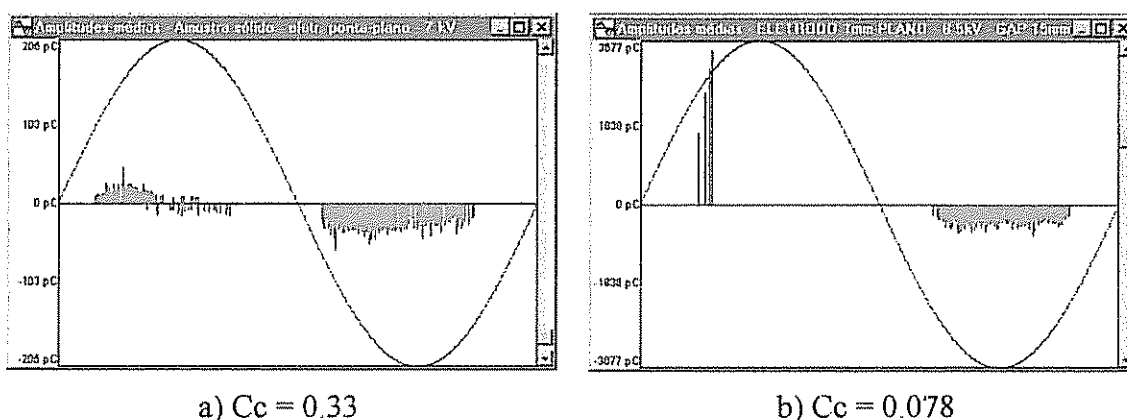


Figura A.4: Cálculo da correlação cruzada.

A figura A.4 mostra duas distribuições de descargas parciais e suas respectivas correlações cruzadas. Nota-se na figura (a) que a distribuição no ciclo positivo da senóide é mais semelhante à do ciclo negativo do que na figura (b), o que resulta em uma correlação cruzada maior.

A correlação cruzada é dada por:

$$C_c = \frac{\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i / n}{\sqrt{[\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 / n][\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 / n]}} \quad (A.4)$$

onde  $x_i$  são as amplitudes das descargas na janela  $i$  do ciclo positivo da senóide e  $y_i$  são as amplitudes na janela correspondente, no ciclo negativo.

### A.5 – Desvio padrão em relação à média

O cálculo do desvio padrão em torno da média fornece uma estimativa do espalhamento da distribuição, independente do seu formato. O seu valor é dado por:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (\text{A.5})$$

### A.6 – Fator de descargas

O fator de descargas descreve a relação entre os níveis médios de descargas ocorridos no ciclo positivo e negativo. Ele é calculado por:

$$Q = \frac{Q_s^- / N^-}{Q_s^+ / N^+} \quad (\text{A.6})$$

onde  $Q_s$  são as somas das descargas nos ciclos positivo e negativo e  $N$  são o número de descargas ocorridas nos dois ciclos.