

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CIRCUITO PARA
DETECÇÃO DE SINAIS DE DESCARGAS PARCIAIS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento parcial às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Edson Guedes da Costa
Raimundo Carlos Silvério Freire
Orientadores

Campina Grande – Paraíba – Brasil
Abril de 2003



© 2003, Maria Aparecida Alves de Medeiros

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Setorial da UFCEG

M488p
2003

Medeiros, Maria Aparecida Alves

Projeto e implementação de um circuito para detecção de sinais de descargas parciais./ Maria Aparecida Alves de Medeiros. – Campina Grande – PB: UFCEG, 2003.

100p.: il.

Inclui Bibliografia

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)
UFCEG/CCT

1. Medição de Descargas Parciais 2. Impedor de Medição 3. Amplificador de Banda Larga

CDU: 621.317.31

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CIRCUITO PARA DETECÇÃO DE
SINAIS DE DESCARGAS PARCIAIS**

MARIA APARECIDA ALVES DE MEDEIROS

Dissertação Aprovada em 04.04.2003



PROF. EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador



PROF. RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG
Orientador



PROF. WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Componente da Banca



PROF. HIRAN DE MELO, Dr., UFCG
Componente da Banca



PROF. SREERAMULU RAGHURAM NAIDU, Ph.D., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
Abril - 2003

Agradecimentos

A Deus, pela vida que Ele me deu.

Ao amigo e Prof. Emanuel Alves de Moura, Diretor do CEFET-RR, pela sua incansável luta no processo de capacitação docente daquela instituição de ensino.

A CAPES, pelo apoio financeiro durante a vigência do Curso.

Aos Fundos Setoriais ANEEL-CHESF/CEPEL/ATECEL, pelos equipamentos utilizados nos ensaios.

Aos Professores dos CEFET-RR, por terem assumido minhas turmas para viabilizar a minha ausência temporária.

Aos amigos e orientadores Profs. Edson e Freire pelas diretrizes seguras e permanente incentivo.

Ao amigo Max Neri, um parceiro de primeira, que nunca se pode esquecer.

Aos Professores e Funcionários da COPELE, pelo suporte dado para a realização deste trabalho.

Ao Professor Naidu, pelas contribuições.

Ao Professor Washington, pelo incentivo e credibilidade.

Aos companheiros Selma, D. Lurdes, Adalberto, Chico, Bianca, Eduardo do GSE, pelo apoio necessário e constante.

Aos parceiros Fabiano, Darlan, Rodrigo e Eduardo, pela divisão dos problemas diários.

A amiga Diana, pela ajuda importante em um momento decisivo.

Aos amigos de ontem, Aléssio, Rômulo,..., e os de hoje, Livia, Antenor, Damásio, Estácio, Márcia, Gustavo, Lourival, Ronimack, Júnior, Tarso..., sempre prontos a contribuir.

A Ramini, a amiga certa nas horas incertas.

As grandes amigas Rita e Terezinha, que estando em Roraima, contribuíram para que meus problemas de lá não repercutissem aqui.

A Família Alexandre, pela amizade.

A todos aqueles que forma direta ou indireta, contribuíram para que este sonho seja hoje uma realidade.

Sumário

Agradecimentos	iii
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xii
Resumo	xiii
Abstract.....	xiv
1. Introdução	15
1.1 Perspectivas históricas e relevância.....	15
1.2 Objetivo do trabalho.....	19
1.3 Organização do texto.....	20
2. Descargas Parciais e Transformadas Wavelet Discretas.....	22
2.1 Introdução	22
2.2 Descargas Parciais.....	22
2.2.1 Modelo.....	23
2.2.2 Equacionamento.....	25
2.3 Métodos de Detecção de Descargas Parciais	28
2.3.1 Circuitos de Medição	28
2.3.2 Impedor de Medição	30
A) Circuito RC	30
B) Circuito RLC.....	31
2.3.3 Circuito Amplificador	32

A)	Sensibilidade	33
B)	Resolução	35
2.4	Calibração	36
2.5	Fontes de Interferência	37
2.6	Breve Introdução a Transformada Wavelet Discreta	38
3.	Materiais e Métodos	43
3.1	Introdução	43
3.2	Materiais	44
3.2.1.	Configurações das Amostras	44
3.2.2	Amplificador Banda Larga	47
3.3	Métodos	48
3.3.1	Detecção e Medição de Descargas Parciais com o Detector Comercial	49
A)	Detector de descargas parciais	52
B)	Digitalizador	55
C)	Calibração do circuito	56
D)	Procedimentos de ensaios e processamento dos sinais	56
3.3.2	Detecção e Medição de Descargas Parciais com o Circuito Desenvolvido	58
A)	Amplificador de banda larga	60
B)	Procedimentos de ensaios e processamento dos sinais	62
3.3.3	Ensaio para caracterização do sistema de detecção e medição de descargas parciais existentes no LAT/DEE/UFCG	63
4.	Resultados e Discussões	65
4.1	Introdução	65
4.2	Ensaio de Caracterização	65
4.3	Ensaio com o Amplificador	72
4.4	Ensaio de Geração, Detecção e Medição de Descargas Parciais	76

4.3.1	Configuração 1	77
4.3.2	Configuração 2	82
4.3.3	Configuração 3	87
4.3.3	Análises.....	92
5.	Conclusões e Sugestões.....	95
	Referências Bibliográficas	97

Lista de Figuras

<i>Número</i>	<i>Página</i>
Figura 2.1- Modelo elétrico básico do material sob ensaio.....	23
Figura 2.2- Diagrama elétrico do circuito equivalente.....	24
Figura 2.3- Gráfico representativo de um processo estático de descargas parciais em um dielétrico.	24
Figura 2.4- Circuito simplificado de medição.	27
Figura 2.5- Impedor de medição em série com o capacitor de acoplamento.....	29
Figura 2.6- Impedor de medição em série com a amostra.....	29
Figura 2.7- Circuito balanceado para medição de descargas parciais.	29
Figura 2.8- Resposta do sistema a um pulso de descarga parcial com um impedor RC.....	31
Figura 2.9- Resposta do sistema a um pulso de descarga parcial com um impedor RCL	31
Figura 2.10- Representação de um amplificador com banda de passagem limitada.....	34
Figura 2.11- Calibração do circuito de ensaio.	37
Figura 2.12- Representação esquemática do <i>down-sampling</i> de um sinal.	41
Figura 2.13- Estrutura de Banco de Filtros com dois estágios para análise do sinal.	41
Figura 2.14- Estrutura de Banco de Filtros com dois estágios para síntese do sinal.	42
Figura 3.1- Fotografias do (a) eletrodo e (b) amostras.	44
Figura 3.2- Desenho do arranjo experimental usado para provocar o corona.	45
Figura 3.3- Desenho do arranjo para simular descargas parciais com amostra em polietileno...46	
Figura 3.4- Desenho do arranjo para simular descargas parciais com amostra em acrílico.47	
Figura 3.5- Amplificador de 4 estágios.....	47
Figura 3.6- Arranjo elétrico utilizado para geração, detecção e digitalização dos sinais.....	49

Figura 3.7- Fotografia do arranjo experimental de detecção de descargas parciais.....	50
Figura 3.8- Diagrama elétrico do filtro de entrada do regulador de tensão.	52
Figura 3.9- Diagrama elétrico do filtro de saída do regulador de tensão.....	52
Figura 3.10- Circuito de detecção em ponte balanceada.	53
Figura 3.11- Circuito de detecção simples.	53
Figura 3.12- Circuito utilizado para detecção e medição de descargas parciais.	54
Figura 3.13- Diagrama de bloco do medidor de descargas parciais.	55
Figura 3.14- Arranjo elétrico utilizado para geração, detecção e digitalização dos sinais com o detector desenvolvido.....	58
Figura 3.15- Fotografia do detector desenvolvido inserido no circuito de geração, medição e detecção de descargas parciais (vista 1).....	59
Figura 3.16- Fotografia do detector desenvolvido inserido no circuito de geração, medição e detecção de descargas parciais (vista 2).....	59
Figura 3.17- Fotografia do detector desenvolvido.	60
Figura 3.18- Circuito com impedor e amplificador de 4 estágios.....	61
Figura 3.19- Diagrama de bloco simplificado do detector.	64
Figura 3.20- Circuito de um filtro passa-alta.	64
Figura 4.1- Sinal de corona medido no ponto 1, com o amplificador desconectado.	66
Figura 4.2- Sinal de corona medido no ponto 1, com o amplificador conectado.....	67
Figura 4.3- Sinal de corona medido no ponto 2.....	67
Figura 4.4- Sinal de descarga parcial medido no ponto 1, sem o amplificador conectado.....	68
Figura 4.5- Sinal de descarga parcial medido no ponto 1, com o amplificador conectado.....	69
Figura 4.6- Sinal de descarga parcial no ponto 2.	69
Figura 4.7- Resposta em frequência do arranjo de detecção convencional.	70
Figura 4.8- Resposta em frequência do arranjo de detecção convencional.	71
Figura 4.9 - Diagrama de Bode do amplificador.....	73
Figura 4.10 - Resposta em frequência do amplificador para uma alimentação de 0,1 mV/1 MHz	74

Figura 4.11 - Resposta em frequência do amplificador para uma alimentação de 0,1 mV/2,75 MHz	74
Figura 4.12 - Resposta em frequência do amplificador para uma alimentação de 0,1 mV/50 MHz	75
Figura 4.13 - Resposta em frequência do amplificador para uma alimentação de 10 mV/2,75 MHz	75
Figura 4.14- Ruído existente no circuito.....	77
Figura 4.15- Sinal de corona obtido com a detector comercial.	78
Figura 4.16- Sinal de corona obtido com o detector desenvolvido.	79
Figura 4.17- Sinal de corona processado.	79
Figura 4.18- Sinal amostra da tensão aplicada sobre a configuração 1.	80
Figura 4.19- Sinal resultante da soma dos sinais das Figuras 4.17 e 4.18.	80
Figura 4.20- Decomposição wavelet para os sinais de corona obtidos com o detector comercial.	81
Figura 4.21- Decomposição wavelet para os sinais de corona obtidos com o detector desenvolvido.	82
Figura 4.22- Sinal de descarga parcial obtido com a detector comercial.	83
Figura 4.23-Sinal amostra da tensão aplicada sobre a configuração 2.	83
Figura 4.24- Sinal de descarga parcial obtido com o detector desenvolvido.....	84
Figura 4.25- Sinal de descarga parcial processado.	84
Figura 4.26- Sinal resultante da soma dos sinais das Figuras 4.23 e 4.25.	85
Figura 4.27- Decomposição wavelet para os sinais de descargas parciais (1) obtidos com o detector comercial.	86
Figura 4.28- Decomposição wavelet para os sinais de descargas parciais (1) obtidos com o detector desenvolvido.....	87
Figura 4.29- Sinal de descarga parcial obtido com a detector comercial.	88
Figura 4.30- Sinal amostra da tensão aplicada sobre a configuração 3	88
Figura 4.31- Sinal de descarga parcial obtido com o detector.....	89

Figura 4.32- Sinal de descarga parcial processado.	89
Figura 4.33- Sinal resultante da soma dos sinais das Figuras 4.30 e 4.32.	90
Figura 4.34- Decomposição wavelet para os sinais de descargas parciais (2) obtidos com o detector comercial.	91
Figura 4.35- Decomposição wavelet para os sinais de descargas parciais (2) captados com o detector desenvolvido.	92

Lista de Tabelas

<i>Número</i>	<i>Página</i>
Tabela 2.1- Sumário de prevenções contra ruídos	38

Resumo

As agências reguladoras e o grau de exigência dos consumidores fazem com que as empresas de energia elétrica busquem aumentar a sua confiabilidade. Assim o monitoramento dos equipamentos elétricos torna-se essencial neste contexto. As técnicas de medição das descargas parciais têm sido usadas no monitoramento do envelhecimento dos equipamentos elétricos. Descargas Parciais são descargas elétricas que curto-circuitam parte da isolação entre dois condutores. A constatação da sua presença pode identificar situações danosas para a isolação de um equipamento submetido à alta tensão. Para se ter um diagnóstico adequado sobre os efeitos danosos dos sinais de descargas parciais, não apenas se deve quantificar a descarga parcial, mas também medir a amplitude, frequência, taxa de repetição, dentre outros. Uma medição ideal dos parâmetros essenciais presentes nos sinais de descargas parciais é obtida quando o detector de descargas parciais tem a capacidade de não distorcer ou atenuar estes parâmetros. Como os sinais de descargas parciais são pulsos de alta frequência, neste trabalho é projetado e implementado um detector de banda larga, formado por um impedor de 50Ω e um amplificador com faixa de passagem de 50 MHz e frequência de corte inferior de 2,75 MHz. São realizados ensaios de geração, detecção e medição dos sinais de descargas parciais. A validação dos resultados é feita com a comparação entre os resultados obtidos nos ensaios realizados com um detector comercial e o desenvolvido.

Abstract

The electric energy regulatory agencies and the consumer requirements propitiate that the electric energy companies increase its confiability. Thus, the electric equipments monitoring become essential in this context. The partial discharge measurement techniques have been used in electric equipment ageing monitoring. Partial discharges are electric discharges that only partially bridge the insulation between conductors. The partial discharges presence can identify prejudicial situations to the equipment insulation submitted to high voltages. To obtain an adequate diagnostic about the prejudicial effects of the partial discharge signals, it must quantify the discharges and also measure its magnitude, frequency, repetition rates, among others. An ideal measurement of the essential parameters present in the partial discharge signals is obtained when the partial discharge detector has capacity of not distort and attenuate these parameters. As the partial discharge signals are high frequency pulses, in this work, a large band detector is projected and implemented. It is composed for a 50Ω impedance and an 50 MHz passband amplificator with a 2,75 MHz cutoff frequency. The partial discharge generation, detection and measurement tests are accomplished. The obtained results using the commercial and the developed detector are compared.

1. INTRODUÇÃO

Um sistema de isolamento elétrico é uma estrutura que contém um ou mais materiais isolantes em contato ou não com suas partes condutoras. A qualidade de um sistema de isolamento é geralmente estimada por diferentes ensaios, desde a seleção dos materiais até o monitoramento de equipamentos em campo.

De acordo com Rocha et al.(2002), o sistema elétrico brasileiro se encontra hoje em um situação crítica, devido a fatores climáticos e estruturais, decorrentes da expansão dos últimos anos. A demanda se encontra muito próxima da capacidade de geração, aumentando a responsabilidades das usinas em manter a continuidade da oferta de energia, evitando desligamentos de emergência. Nesta situação, é essencial uma manutenção eficiente dos equipamentos elétricos. Das diversas ferramentas utilizadas para este fim, pode-se afirmar que o monitoramento contínuo das grandezas físicas tem sido cada vez mais utilizado. Latini et al.(2001), afirmam que a única técnica adotada para se ter informações sobre a condição de isolamento das barras estatóricas dos hidrogeradores, é a medição das descargas parciais on-line pela metodologia elétrica, contudo sua afirmação pode ser estendida para todos os equipamentos importantes dos sistemas elétricos.

1.1 PERSPECTIVAS HISTÓRICAS E RELEVÂNCIA

As descargas elétricas conhecidas como descargas parciais, que são da ordem de grandeza de unidades de microampères, ocorrem no sistema de isolamento dos equipamentos de alta tensão.

A ocorrência das descargas parciais está ligada à degradação do isolamento, aumentando paulatinamente a região defeituosa, podendo provocar um curto-circuito em intervalos de tempo da ordem de meses, semanas ou até dias. Devido aos danos severos que podem ser causados por um curto-circuito em um equipamento energizado, torna-se necessário evitar seus efeitos ou pelo menos garantir que os seus níveis sejam suficientemente baixos para não deteriorar o isolamento.

Estudos teóricos acerca dos princípios das descargas parciais têm marco inicial em 1777 (BOLLIGER;LEMKE,2001), e sua primeira aplicação prática para o diagnóstico e prevenção contra falhas em equipamentos, ocorreu no decênio de 1920.

Um passo essencial para o melhoramento da sensibilidade dos detectores de descargas parciais foi a utilização de amplificadores passa-faixa, baseado em circuitos ressonantes, como informam Arman e Starr (1936) apud Bolliger e Lemke (2001).

O interesse pela monitoração das descargas parciais aumentou a partir do decênio de 1950, quando foi iniciado o uso de compostos orgânicos nos equipamentos de alta tensão. Exemplos desse tipo de isolamento são os polímeros e a resina epóxi. O uso de tais isolantes possibilitou o aumento da capacidade de isolamento, da resistência mecânica e da faixa de temperatura de trabalho, e conseqüentemente a redução da espessura das paredes do isolamento. As boas propriedades mecânicas, em especial a usinabilidade, foram também fato decisivo nas aplicações elétricas. Entretanto, com o passar dos anos, observou-se que estes materiais são mais susceptíveis à degradação devido às descargas parciais, quando comparados a equipamentos isolados a óleo, comumente usados até então (MOTA, 2001).

O primeiro detector portátil de descargas parciais foi projetado por Mole, em 1954. Entretanto, foi a partir do decênio de 1980, que se tornaram disponíveis comercialmente detectores com banda de medição de frequência inferior a 1 MHz. O primeiro detector comercial de banda larga, foi desenvolvido pelo Dr. Lemke (BOLLIGER;LEMKE,2001). O princípio utilizado era baseado em uma integração (eletrônica) ativa dos pulsos de descargas parciais processados por um amplificador de banda larga. A frequência de corte superior do amplificador era aproximadamente de 10 MHz, o que possibilitava não só a detecção, mas a localização dos pulsos. Hoje técnicas de medição em UHF podem ser consideradas

ferramentas essenciais para diagnósticos de descargas parciais, em particular para subestações isoladas a gás e cabos de força.

Diagnósticos modernos de descargas parciais, não só se baseiam em pulsos individuais, pois mais informações podem ser obtidas na análise do processo como um todo. Como por exemplo, a seqüência de pulsos versus o ângulo de fase da tensão de alimentação, a análise estatística do tamanho dos pulsos, etc. O primeiro sistema computadorizado projetado para o diagnóstico de descargas parciais foi desenvolvido por Tanaka e Okomoto em 1978 (BOLLIGER;LEMKE,2001).

A ampliação da faixa de passagem para melhorar a sensibilidade na medição de descargas parciais trouxe como conseqüência a perturbação de ruídos eletromagnéticos. Em 1973, Okomoto et al. descreveram a supressão de ruídos no caso da medição de descargas parciais em transformadores de 500 kV. Em 1973, Praehauser analisou a utilização de ponte balanceada para a eliminação de ruídos externos. Essencialmente, a eliminação dos ruídos baseia-se em técnicas avaliativas, pontes balanceadas, filtros (passivos, ativos ou adaptativos) e isolamento do pulso.

Pode-se concluir então que, a detecção e medição dos parâmetros das descargas parciais fornecem diagnósticos úteis, tanto na garantia da qualidade dos materiais empregados na confecção e nos próprios equipamentos, como no fornecimento de informações sobre a sua expectativa de vida. Por isto, os procedimentos de detecção e de medição são bastante utilizados por fabricantes de equipamentos, laboratórios de ensaios e pesquisas e empresas do setor elétrico. Os ensaios de descargas parciais são considerados não destrutivos, assim, eles podem ser usados para o monitoramento contínuo das condições de isolamento dos equipamentos. Desta forma, eles são utilizados com eficiência na manutenção preventiva e preditiva.

A técnica de medir e de analisar as descargas parciais inclui normalmente quatro etapas principais. São elas: detecção, medição, localização e interpretação (KREUGER,1989), descritas a seguir:

- Detecção: A primeira etapa consiste em verificar a presença ou não das descargas parciais. Os efeitos físicos e químicos, causados pelas descargas parciais nos objetos

de teste são utilizados na sua detecção. Os pulsos elétricos, a luz, o calor, o ruído ou a análise da pressão de gás e/ou as suas transformações químicas, etc, são os efeitos mais utilizados (BARTNIKAS; McMAHON,1979).

- **Medição:** Caso a descarga parcial seja detectada, os seus parâmetros devem ser medidos. A medição é executada usando um sistema que tenha sensibilidade adequada às finalidades do ensaio. Normalmente, os sinais vêm corrompidos por ruídos. O sistema básico do teste inclui fonte de alimentação de alta tensão, detector de descarga parcial, osciloscópio, digitalizador, etc.
- **Localização:** Para a avaliação dos resultados das medições da descarga parcial, não somente os valores numéricos da intensidade da descarga são usados, mas também a sua localização deve ser considerada. Se as descargas forem localizadas no tempo, a sua causa pode ser determinada e a falha pode ser reparada ou impedida de se reproduzir. Algumas das descargas detectadas podem ter origem externa e não afetar a qualidade total da isolamento, podendo ser toleradas. Assim, a localização dos pulsos sobre a senóide na frequência industrial, frequência de repetição, frequência e forma da onda auxiliam na identificação dos defeitos nos isolamentos.
- **Interpretação:** KREUGUER et al.(1993) afirmam que a técnica de análise da relação entre fases e a técnica de análise da resolução no tempo têm se mostrados eficientes para a interpretação das descargas parciais. Essas duas técnicas podem ser utilizadas com um equipamento de detecção de descargas convencional. Entretanto, na implementação da primeira técnica necessita-se de filtros com banda de passagem estreita, da ordem de algumas centenas de kHz, e da segunda, uma banda de passagem entre 500 e 1.000 MHz. A técnica de análise da relação entre fases baseia-se na classificação das descargas com relação à localização angular dos pulsos de descarga, com relação à fase da senóide do sinal que está sendo aplicado a amostra. Essa técnica depende muito da experiência da pessoa que está analisando o sinal, pois uma boa análise está relacionada com a capacidade visual de identificação, localização e frequência de repetição, sendo assim, muito subjetiva. A técnica de análise de resolução no tempo baseia-se na classificação das descargas pelo seu período, ou pela

sua frequência. Existe uma grande dificuldade em utilizar a técnica de análise em tempo em ambientes ruidosos, isso acontece devido à grande banda de passagem do detector, que detecta também uma maior quantidade de ruídos. A técnica de análise no tempo pode ser usada para o reconhecimento automático das descargas parciais, empregando as técnicas de redes neurais, fractais ou wavelets (COSTA, 2001).

A maioria dos reconhecimentos é baseada na aquisição de dados oriundos de experimentos de laboratórios ou de sinais adquiridos durante testes de equipamentos fora de serviço. Os sinais de descargas parciais oriundos das medições em campo são misturados com ruídos ou sinais espúrios, e a filtragem dos ruídos torna-se essencial para a sua identificação. Os ruídos podem ser definidos como sinais indesejáveis, que não estão relacionados com o sinal de entrada. De acordo com Stone (1991), as principais fontes de ruídos são ondas de rádios, descargas eletrostáticas, conexões mal feitas, corona, descargas atmosféricas, fontes chaveadas, etc. Os distúrbios se propagam no sistema elétrico através de condução e radiação, e são adquiridos pelo sistema de detecção juntamente com os sinais de descargas parciais.

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

A aquisição e interpretação dos sinais de descargas parciais nos ensaios e experimentos realizados no Laboratório de Alta Tensão (LAT), do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), têm sido dependentes da experiência da pessoa que analisa os resultados. No LAT, os resultados são obtidos através de um sistema convencional de medição.

As pesquisas realizadas no intuito de automatizar a interpretação e diagnóstico das descargas parciais no LAT, através do uso da transformada wavelet discreta têm se deparado com um obstáculo: o detector de descargas parciais de fabricação Biddle. O amplificador do detector tem banda de passagem entre 16 e 180 kHz, que limita tecnicamente a possibilidade de reconhecimento automático das descargas parciais. Os componentes de frequência elevada do sinal adquirido, essenciais na identificação dos defeitos nos isolamentos, são atenuados, assemelhando os sinais de descargas parciais como

os sinais de ruído presente, tais como o efeito corona. Assim, sinais de descargas parciais apresentam características de sinais de corona, por exemplo, embora seus componentes de frequência originais sejam distintos. Sinais de descargas parciais podem apresentar pulsos de duração menor ou igual a nanosegundos e tempo de subida menor ou igual a 1 nanosegundo, enquanto que sinais de corona no ar podem apresentar pulsos de duração de até 100 ns (BARTNIKAS; McMAHON, 1979).

Deste modo, o trabalho tem como objetivos projetar e implementar um sistema para a detecção de descargas parciais, incluindo impedância de medição e amplificador, que possibilite a aquisição e interpretação dos sinais de descargas parciais nos ensaios, com faixa de passagem mais larga que a existente no detector do LAT/DEE/UFCG. Com isto serão possíveis a realização da análise dos sinais de descarga parcial no tempo e a realização de ensaios com reconhecimento automático dos sinais. A ABNT denomina a impedância de medição por impedor.

Para a realização do sistema proposto foram estudadas as possibilidades de amplificação e de filtragem dos sinais. Foi desenvolvido um detector de banda larga. O detector é composto por um impedor e um amplificador com banda de passagem até 50 MHz. Com o objetivo de validar o amplificador foram realizados ensaios elétricos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está organizado em 5 Capítulos, a saber:

- Capítulo 1: apresenta perspectivas históricas e a relevância do estudo realizado sobre descargas parciais, bem como os objetivos do trabalho.
- Capítulo 2: faz-se uma abordagem dos aspectos relevantes no estudo das descargas parciais, com a apresentação de uma revisão conceitual e as principais características dos sistemas de aquisição de descargas parciais. Também se faz uma breve introdução as Transformadas Wavelet Discretas.
- Capítulo 3: são mostrados os materiais e os procedimentos dos ensaios realizados, e o projeto do amplificador implementado.

- Capítulo 4: são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios com o amplificador implementado, assim como os resultados oriundos da detecção de descargas parciais antes e depois da utilização do circuito implementado.
- Capítulo 5: conclusões obtidas do trabalho e sugestões para desenvolvimentos de trabalhos futuros.

2. DESCARGAS PARCIAIS E TRANSFORMADAS WAVELET DISCRETAS

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são descritos os principais tópicos relacionados às descargas parciais. São abordados conceitos, tipos, processo de formação e circuitos de medição das descargas parciais. Nos circuitos de medição são dadas maiores ênfases ao impedor e ao circuito amplificador, analisando os problemas e soluções para se obter a sensibilidade e a resolução ideais para a detecção e medição dos sinais de descargas parciais. Será feita também uma breve introdução aos principais conceitos sobre as Transformadas Wavelet Discretas.

2.2 DESCARGAS PARCIAIS

Descargas parciais são micro-descargas elétricas que curto-circuitam parte da isolamento entre dois eletrodos. As descargas parciais são decorrentes do fenômeno de ionização na região do dielétrico do material isolante que apresenta um defeito/imperfeição (cavidades, impurezas condutoras). A ionização é provocada pelo campo elétrico, cuja intensidade depende da amplitude e da forma de onda tensão aplicada, da forma do eletrodo e das características do dielétrico ou dielétricos envolvidos.

A isolamento de qualquer equipamento submetido a tensões elevadas está sujeito à ocorrência das descargas parciais. Em isolamento a base de compostos orgânicos o efeito das descargas parciais podem ser extremamente danoso e causar a sua perfuração total.

Entretanto, na maioria dos casos, a atividade de descargas localizadas e de baixa intensidade não conduzirá a ruptura total do isolamento. O equipamento mesmo com descargas parciais poderá operar por um longo período sem que efeitos danosos sejam notados.

Em dielétricos gasosos as descargas não representam problema maior devido à capacidade autoregenerativa do gás. Entretanto em isolantes sólidos e líquidos o nível da energia contido nas descargas provoca uma degradação do material.

De forma generalizada, as descargas elétricas que ocorrem em um só dielétrico (descargas parciais em gases, em torno de um condutor, por exemplo) são normalmente referidas como CORONA. Quando as microdescargas ocorrem em isolamentos envolvendo dois ou mais dielétricos são referenciadas como DESCARGAS PARCIAIS. As descargas parciais, que ocorrem em isolamentos sólidos, terão ênfase maior neste trabalho.

2.2.1 Modelo

A modelagem de descargas parciais (TETREX, 1984) pode ser feita, inicialmente, considerando um material dielétrico com uma cavidade em seu interior, geralmente preenchida com ar. Na Figura 2.1 é mostrado o modelo elétrico básico de um material isolante sob ensaio para o estudo da descarga parcial.

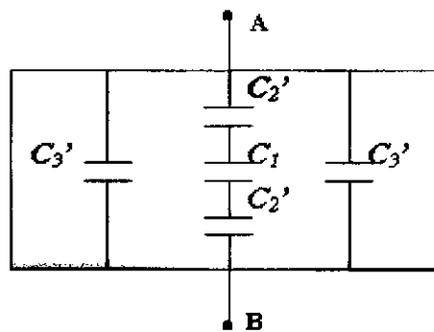


Figura 2.1- Modelo elétrico básico do material sob ensaio.

Se uma tensão alternada $U_i(t)$ é aplicada aos eletrodos A e B, o arranjo pode ser modelado, em termos de descargas parciais, através do circuito equivalente mostrado na Figura 2.2.

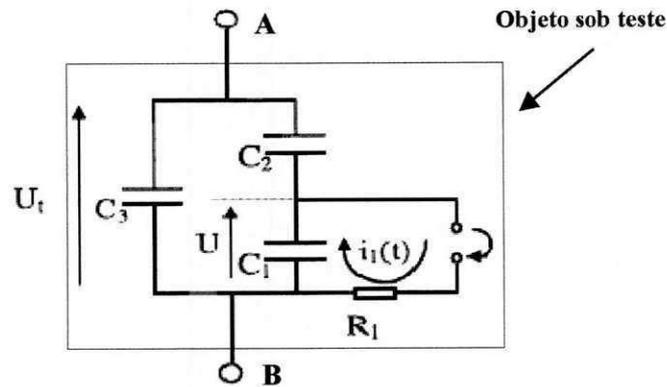


Figura 2.2- Diagrama elétrico do circuito equivalente.

A capacitância da cavidade é representada por C_1 ; a capacitância do material que está em série com a cavidade é representada por C_2 , e C_3 , é a capacitância do resto do material. R_1 é a resistência do arco elétrico (descarga).

O processo da descarga elétrica pode ser melhor compreendido utilizando o gráfico apresentado na Figura 2.3.

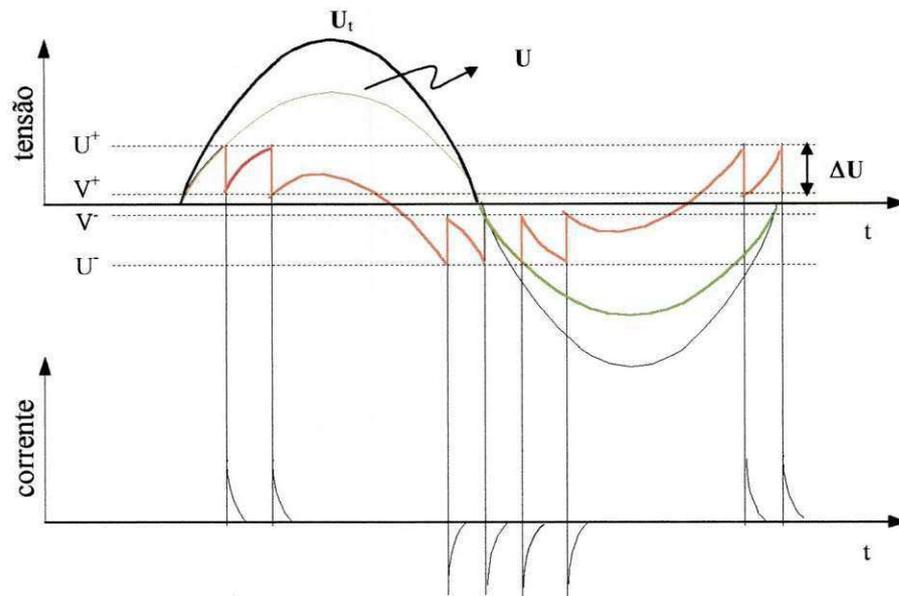


Figura 2.3- Gráfico representativo de um processo estático de descargas parciais em um dielétrico.

Como dito anteriormente, $U_i(t)$ representa a tensão de alimentação alternada aplicada ao material sob ensaio; $U(t)$ a tensão aparente que deveria existir na cavidade, caso a descarga elétrica não existisse; U^+ e U^- são as tensões disruptivas da cavidade para as duas situações de polaridade da tensão de alimentação; V^+ e V^- são as tensões residuais existentes nas cavidades, após a ocorrência das descargas elétricas, devido à transferência de cargas.

O processo da descarga se inicia quando a tensão na cavidade atinge a U^+ . Neste instante ocorre a quebra da rigidez dielétrica e conseqüentemente uma descarga. Este comportamento é semelhante a aplicação de um degrau de tensão igual a $U^+ - V^+$ sobre o capacitor C_j . Após a extinção da descarga, a tensão na cavidade se reduz a V^+ , e volta a crescer. Ao atingir novamente a tensão disruptiva, ocorre outra descarga. O processo se repete várias vezes até que a tensão sobre a amostra decresça e se iguale a U^- , provocando uma nova descarga. No processo, o intervalo entre o início e extinção da descarga é extremamente rápido. Ou seja, cada evento é acompanhado por um transitório eletromagnético da ordem de 100 ns (KREUGER,1989). Portanto, as descargas formam pulsos de correntes de alta frequência nos terminais das amostras, como também pode ser observado na Figura 2.3. Outro fato importante a ser observado é que os pulsos se concentram nas regiões onde o gradiente de tensão em relação ao tempo é máximo.

No processo de geração das descargas parciais, as tensões disruptivas e residuais são simétricas, o que deveria provocar, teoricamente, a observação de um gráfico estático no osciloscópio, ou seja, o processo de descarga se repetiria de maneira igual em todo o período de aplicação da senóide. Caso esta simetria não ocorra, as descargas seriam intermitentes, que é o que acontece em situações reais. Portanto, sinais de descarga parcial não podem ser considerados estacionários e bem localizados no tempo.

2.2.2 Equacionamento

A medição direta de descargas parciais se torna difícil, pois se trata de encontrar defeitos/imperfeições em um grande volume de isolamento. Normalmente este defeito/imperfeição corresponde a 0,1% do volume total do isolamento e que não são facilmente acessíveis. Assim fazer a medição direta de uma descarga parcial é fisicamente

impossível. Entretanto, isto não é uma limitação que cause prejuízo ao entendimento do fenômeno. Métodos de medição indireta já foram desenvolvidos, e têm como base às medições dos efeitos que as descargas provocam, e possibilitam avaliar ou estimar sua extensão.

Os métodos de medição indireta focalizam as cargas envolvidas no fenômeno, ou seja, a carga transferida na cavidade durante a descarga parcial pode ser tomada como uma medida da sua intensidade. No modelo mostrado na Figura 2.2 observa-se que, no momento da descarga, a cavidade representada pela capacitância C_1 sofre uma queda de tensão ΔU , provocada pela corrente de descarga i_1 , liberando uma carga q_1 . Assim a carga q_1 pode ser calculada por:

$$q_1 = \Delta U \cdot C_1. \quad (2.1)$$

Como não se mede ΔU e C_1 , não se pode medir q_1 diretamente.

A descarga também provoca uma queda de tensão ΔU_t ,

$$\Delta U_t = \frac{C_2}{C_2 + C_3} \Delta U. \quad (2.2)$$

A fonte de alimentação não consegue suprir instantaneamente a queda de tensão. Então para compensar o ΔU_t teria que ser injetada uma carga q nos terminais da amostra igual a,

$$q = (C_2 + C_3) \cdot \Delta U_t. \quad (2.3)$$

Das equações (2.2) e (2.3), tem-se agora que,

$$q = C_2 \cdot \Delta U. \quad (2.4)$$

Das equações (2.1) e (2.4) é obtido:

$$q = \frac{C_2}{C_1} \cdot q_1. \quad (2.5)$$

A carga q é conhecida como a carga aparente da descarga parcial, pois se relaciona com q_1 através da relação de C_2/C_1 .

As capacitâncias são normalmente desconhecidas, então não se pode, novamente, determinar q_I de maneira direta. Para solucionar este problema, será utilizado o circuito mostrado na Figura 2.4, com a colocação de uma capacitância de acoplamento C_K , em paralelo com o objeto de ensaio. O objeto de ensaio será modelado pela capacitância C_I . Um filtro Z é colocado, quando disponível, para evitar a passagem dos pulsos de descarga para o circuito de alimentação de alta tensão e para reduzir interferências providas da fonte de alimentação. O capacitor de acoplamento deve ser grande o suficiente, em relação ao objeto sob ensaio, para evitar que a fonte não seja influenciada pela transferência de carga, e pequeno o suficiente para não sobrecarregar a fonte de alimentação.

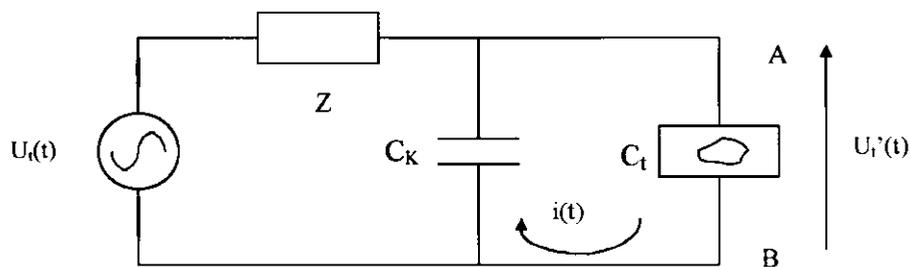


Figura 2.4- Circuito simplificado de medição.

Seguindo o mesmo raciocínio do processo da descarga, a carga aparente q é agora redistribuída entre C_K e C_I . Então:

$$q = (C_I + C_K) \cdot \Delta U_I' \quad (2.6)$$

A carga que é efetivamente medida é denominada por q_m , e sua medição é feita através da queda de tensão sobre C_K , com o uso da equação:

$$q_m = C_K \cdot \Delta U_I' \quad (2.7)$$

A relação da carga medida com a carga aparente é:

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_K}{C_I + C_K} \quad (2.8)$$

A sensibilidade da medida dos parâmetros das descargas parciais pode ser avaliada pela equação (2.8). Quanto maior o valor de C_K , mais próximo será os valores de q_m e q . Por

outro lado, um valor de C_K muito elevado pode se tornar economicamente inviável, pois, o capacitor pode sobrecarregar a fonte de alimentação do circuito.

2.3 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

Os efeitos físicos e químicos causados pelas descargas parciais nos objetos de teste são os parâmetros essenciais para se determinar os métodos utilizados na sua detecção. O método da medição dos pulsos de corrente, que faz parte dos efeitos físicos causados pelas descargas parciais, é considerado o mais eficiente para a avaliação do nível de degradação do isolamento, principalmente quando se deseja realizar uma medição com o equipamento energizado (Latini et al.,2001), sendo também um dos mais utilizados em aplicações industriais. Levando em consideração os fatos, o método da medição dos pulsos de corrente será o adotado para detecção e medição de descargas parciais.

A seguir, são abordados os circuitos adotados pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) que utilizam a medição dos pulsos de correntes decorrente das descargas parciais. Serão feitas análises do impedor e do amplificador, com suas respectivas sensibilidade e resolução. O impedor e o amplificador são partes essenciais do circuito de medição de descargas parciais.

2.3.1 Circuitos de Medição

Quando se utiliza o efeito elétrico para a detecção e medição dos parâmetros das descargas parciais, normalmente se usa um impedor (circuito RLC) para captar o pulso de corrente.

A ABNT adota três tipos de circuitos para detecção convencional de descargas parciais, que são mostrados nos circuitos das Figuras 2.5, 2.6 e 2.7. Cada um dos circuitos consiste essencialmente de uma fonte de alta tensão, um filtro Z (quando disponível), um objeto sob ensaio (amostra), um capacitor de acoplamento, um impedor de medição Z_m , e um instrumento de medição ou unidade de observação.

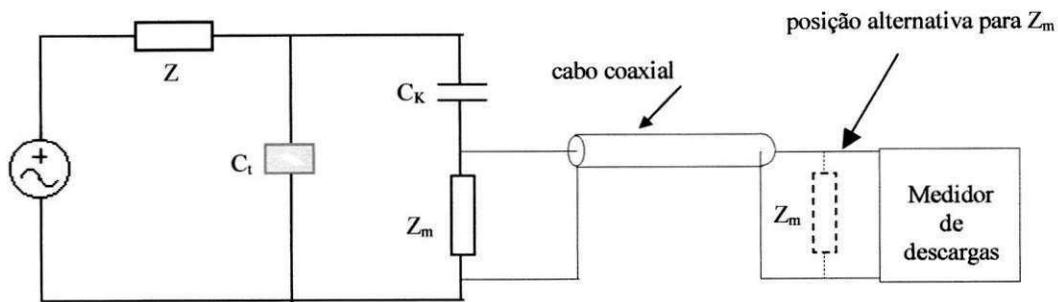


Figura 2.5- Impedor de medição em série com o capacitor de acoplamento.

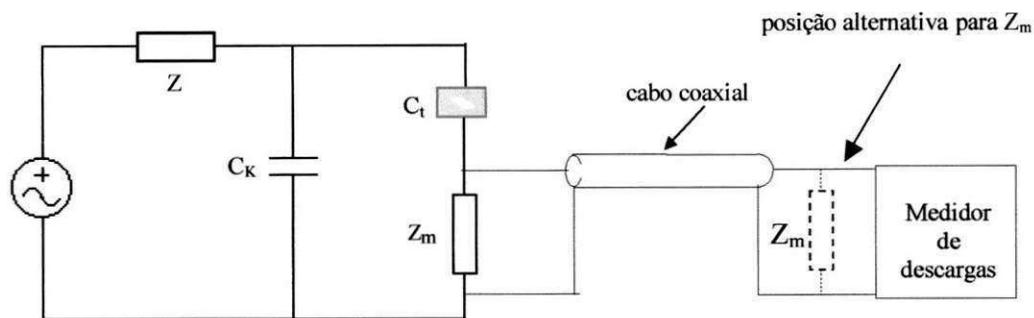


Figura 2.6- Impedor de medição em série com a amostra.

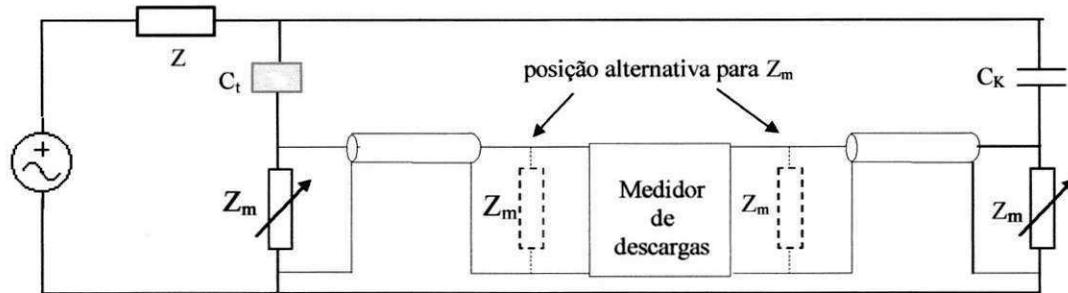


Figura 2.7- Circuito balanceado para medição de descargas parciais.

O circuito mostrado na Figura 2.5 apresenta como vantagem a segurança, pois se ocorrer alguma falha no objeto de teste o circuito de detecção não ficará submetido à alta tensão.

A vantagem do circuito mostrado na Figura 2.6 é a sensibilidade da medição, pois a totalidade do pulso de corrente originado pela descarga parcial na amostra passa pelo impedor se ocorrer falha no objeto de teste, o circuito de detecção fica submetido à alta

tensão. Entretanto, se ocorrer falha no objeto de teste, o circuito de detecção fica submetido à alta tensão.

O circuito da Figura 2.7 minimiza perturbações por ruídos externos, mas apresenta o mesmo problema do circuito da Figura 2.6, além de sua exatidão depender da igualdade entre os valores de C_K e C_I , o que na prática nem sempre é possível.

Analisando as características citadas, o circuito de medição utilizado será o mostrado na Figura 2.5, sem o filtro Z , que não é disponível.

2.3.2 Impedor de Medição

Sabe-se que a ocorrência de uma descarga no circuito de ensaio faz surgir um pulso de tensão extremamente rápido. A forma e os tempos do pulso vão depender do circuito utilizado na detecção, incluindo o impedor utilizado. Observa-se na Figura 2.5 que o impedor é responsável pela detecção do pulso de corrente da descarga e a sua conversão em um valor tensão que será registrada pelo medidor. Normalmente são utilizados impedores de medição do tipo RC ou RLC (ambos em paralelo). Em ambos os casos, a capacitância C do impedor representa a associação de todas as capacitâncias presentes no circuito e a resistência R , o elemento de conversão da corrente em tensão.

A) Circuito RC

Quando o impedor é um circuito RC, o pulso de tensão obtido sobre ele é unidirecional, Figura 2.8, e devido à presença de R o pulso decai na forma de uma onda exponencial, dada por:

$$U_i(t) = U_i e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (2.9)$$

Sendo que U_i é o valor de pico do pulso, proporcional a carga aparente da descarga e τ é a constante de tempo do sinal. Como é possível observar, são a capacitância C e a resistência R que determinam a faixa de passagem do amplificador utilizado na detecção das descargas. Sendo assim, R e C têm também uma relação direta com a sensibilidade do amplificador.

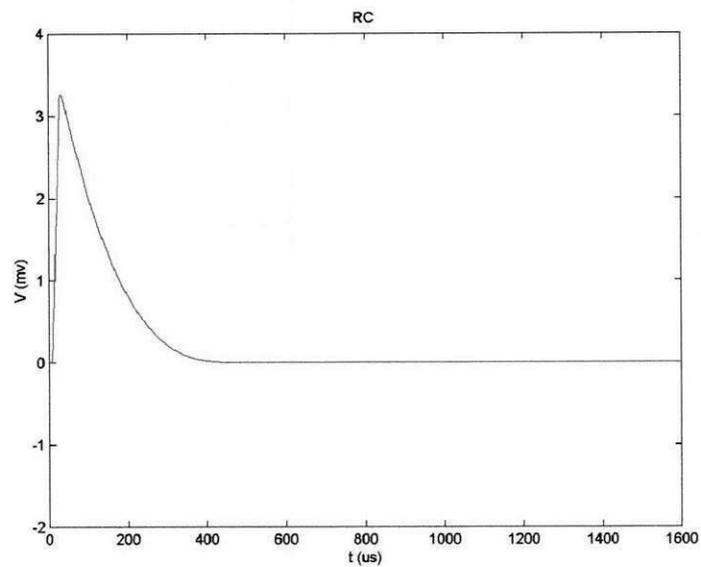


Figura 2.8- Resposta do sistema a um pulso de descarga parcial com um impedor RC.

B) Circuito RLC

Quando se acrescenta a indutância no circuito RC, o pulso de tensão é uma oscilação atenuada com o mesmo valor de pico da tensão do circuito RC (Figura 2.9).

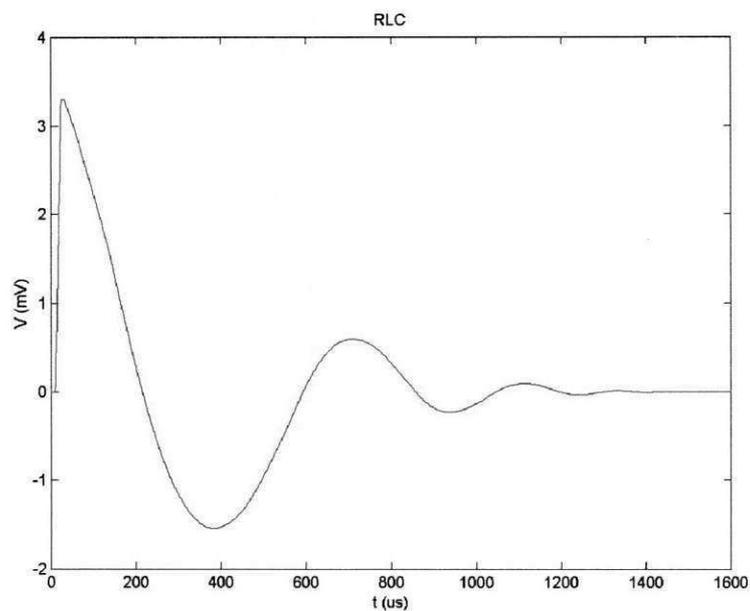


Figura 2.9- Resposta do sistema a um pulso de descarga parcial com um impedor RCL

A introdução da indutância faz com que a resposta do impedor ao pulso de corrente não seja mais uma exponencial decrescente. O capacitor se descarrega agora através da resistência e indutância, e entra em ressonância. A indutância é responsável pela limitação da faixa de passagem do sistema e proporciona uma grande melhoria na medição de descargas em situações em que o ruído incidente no ambiente é muito intenso. Entretanto, circuitos com maior faixa de passagem têm maior sensibilidade, tanto para o sinal gerado pela descarga parcial quanto para o ruído no ambiente.

Nos dois circuitos, a constante de tempo do sinal é determinada pelo produto de R e C . Uma constante de tempo muito grande proporciona um decaimento muito lento. Quando isto acontece, a ocorrência de dois pulsos de descarga parcial muito próximo provoca a superposição de duas respostas transitórias, o que poderá acarretar um erro na determinação do valor de pico ou de parâmetros temporais da tensão. Com valores de RC grande, a faixa de passagem é pequena e a imunidade a ruídos é maior. Entretanto, maior também é o tempo de decaimento da tensão e, conseqüentemente a resolução relativa a pulsos consecutivos fica prejudicada (MOTA,2001). Portanto, deve-se tentar manter um equilíbrio entre a sensibilidade desejada e a resolução temporal à qual o sistema deve responder.

Outras informações sobre o circuito RLC poderão ser consultadas em Kleuger (1989). O sistema de medição utilizado no trabalho baseou-se exclusivamente no sistema RC.

2.3.3 Circuito Amplificador

A faixa de passagem do sistema é determinada pelo amplificador ou instrumento de medição e deve responder as componentes de frequência presente no sinal de descarga parcial, gerado sobre o impedor. Após o impedor RC, o pulso de descargas parcial tem um espectro de frequência que é aproximadamente constante em amplitude até uma frequência $f_1=1/2\pi RC$. Como C depende das capacitâncias do circuito, a extensão do espectro de frequência depende do circuito e do valor de R . Com esta condição, o amplificador usado na amplificação dos pulsos de descarga parcial deverá ter uma largura de banda de passagem igual ou maior que f_1 .

A determinação da frequência inferior e superior, e conseqüentemente da banda de passagem, é extremamente importante para aplicação satisfatória do método convencional de detecção. Na maioria dos casos, utiliza-se sistema de medição chamada de “faixa estreita”, geralmente de 10 kHz, centrada em 20 ou 30 kHz e, “faixa larga”, geralmente de 100 kHz com centro em 200 ou 300 kHz (BOGGS;STONE,1982). Estes sistemas são basicamente filtros passa-faixa com amplificação eletrônica.

Já existem também sistemas de aquisição com banda muito larga, com faixa de passagem variando entre 100 kHz e 1 GHz (BOGGS;STONE,1982), que pode ser implementado com o esquema mostrado Figura 2.5. De acordo com Costa (2001) a diferença básica para a implementação deste arranjo está no impedor e no capacitor de acoplamento, que devem se comportar como uma linha de transmissão perfeita, garantindo que grande parte do espectro de frequência do sinal seja detectada sem distorção.

No projeto de um circuito de detecção elétrica devem ser consideradas duas características principais: a *sensibilidade* e a *resolução*. A sensibilidade é definida pela menor descarga parcial (em picoCoulombs) que pode ser detectada na presença de ruídos. Na detecção de descargas parciais, a sensibilidade é dependente do objeto sob teste. A resolução torna-se importante quando se deseja visualizar os pulsos de descargas separadamente, que é um fato desejado neste trabalho. Então a resolução pode ser definida como o número de pulsos de descargas por unidade de tempo que pode ser separado. De acordo com Mole (1952) apud Campos (1983), a resolução é definida como o número de pulsos que podem ser distinguidos em um semiciclo da senóide de 60 Hz.

A) Sensibilidade

Os ruídos do amplificador e do circuito afetam diretamente a sensibilidade para a medição de descargas parciais. O pulso de descarga parcial detectado pelo impedor alimenta o amplificador, que possui uma banda de passagem para frequência limitada. A limitação pode ser representada pelo circuito RC, sendo C_p a capacitância parasita entre o ponto de aquisição do sinal de descarga parcial, seguido de um amplificador ideal, como pode ser observado na Figura 2.10.

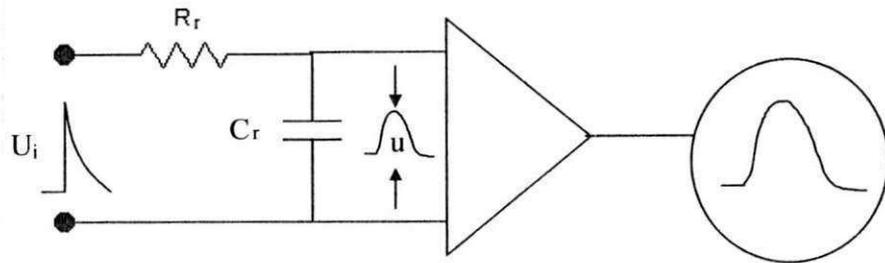


Figura 2.10– Representação de um amplificador com banda de passagem limitada.

O “ruído térmico” do amplificador é predominante na medição e aparece como uma banda luminosa no osciloscópio, e de acordo com Kreuger (1989), é diretamente proporcional à raiz quadrada de sua largura de banda de passagem. Então se for aumentada a banda de passagem, aumenta-se também o ruído e a resposta do amplificador ao pulso gerado. Para a descarga parcial ser observada no osciloscópio é necessário que ela seja duas vezes maior que o ruído térmico.

Kreuger (1989) também definiu a sensibilidade do detector como,

$$q_{sens} = \frac{2}{\xi} U_n \cdot C_{tot} \quad (2.10)$$

Sendo C_{tot} a associação de todas as capacitâncias do circuito (capacitância da amostra, acoplamento e parasita), U_n a amplitude do ruído do amplificador expresso em volts, e ξ , o fator de atenuação do pulso da descarga parcial na entrada do amplificador. O fator de atenuação é função da razão entre a constante de tempo do circuito, τ , e a constante de tempo do amplificador, α . Vale lembrar que a constante τ representa a constante de tempo do pulso de descarga parcial.

Relacionada a essas variações e parâmetros existe um ponto ideal na relação sinal-ruído, obtido quando se faz a constante de tempo do amplificador ser igual a constante de tempo do sinal detectado. Ou seja, a largura de banda ideal do amplificador deve ser:

$$B = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (2.11)$$

E a sensibilidade ótima é dada por:

$$q_{\text{sen s}} = 4.U_n.C_{\text{tot}} \cdot \quad (2.12)$$

Portanto, para se ter uma sensibilidade ótima é necessário que a capacitância de acoplamento seja a maior possível, não esquecendo de levar em consideração que o seu aumento em demasia proporciona também um aumento na demanda de corrente da fonte. A sensibilidade decresce linearmente quando a capacitância da amostra for grande e de um valor aproximado da capacitância total.

Na prática, no método de medição convencional é difícil se obter uma sensibilidade ótima, principalmente devido à existência da capacitância parasita. Interferências eletromagnéticas, perturbações da rede e do circuito de terra, e descargas em componentes do circuito que não seja a amostra, freqüentemente determinam a sensibilidade.

B) Resolução

As descargas parciais ocorrem normalmente nos dois semiciclos da onda senoidal de 60 Hz. Existindo vários pontos com descargas parciais, sua ocorrência se dará de forma aleatória, com os intervalos de tempo entre os pulsos sucessivos espalhados de maneira estatística. Devido à sobreposição das descargas parciais, um número grande de pulsos por semiciclo acarreta uma figura indefinida, resultando em erro.

Como foi definida anteriormente, a resolução é a quantidade de pulsos que pode ser distinguido em um semiciclo de uma onda senoidal de 60 Hz, considerando que os pulsos sejam espalhados em intervalos de tempos idênticos. No circuito de detecção de descargas parciais, a resolução depende da tela do osciloscópio (ou de qualquer outro instrumento visual), da constante de tempo do circuito de detecção e da largura da banda do amplificador.

No osciloscópio as descargas parciais são tão curtas que aparecem como linhas retas perpendiculares à linha zero. A quantidade de pulsos que pode ser visualizada depende da largura da tela do osciloscópio. Por exemplo, o osciloscópio utilizado apresenta um display de cristal líquido diagonal de 145 mm. Normalmente a espessura mínima da linha luminosa na tela de um osciloscópio é de 0,2 mm. Então podem ser discernidos no máximo 725 linhas

ou pulsos. Como são mostrados os dois semiciclos da onda senoidal de 60 Hz, para cada semiciclo ficam disponíveis aproximadamente 362 pulsos.

Se vários pulsos de descargas parciais ocorrem quase simultaneamente em uma amostra, os pulsos de correntes nos terminais do circuito de detecção são somados. Como consequência os pulsos de tensão no impedor aparecem superpostos, apresentando na tela do osciloscópio, uma amplitude falsa. Para serem vistos separados as descargas parciais devem se repetir após um intervalo de tempo maior do que 1,5 a 3 vezes a constante de tempo dos pulsos.

Se o amplificador tiver uma largura de banda menor que a largura de banda da descarga parcial, o amplificador determina a resolução. Sendo assim, os sinais encobrem uns aos outros e não são somados. Para que os pulsos possam ser vistos separadamente as descargas parciais devem se repetir após um intervalo de tempo maior do que 1,5 a 3 vezes a constante de tempo do amplificador.

Pode-se concluir que a resolução total do circuito de detecção de descargas parciais será determinada pelo menor valor da resolução do osciloscópio, circuito de detecção ou amplificador.

2.4 CALIBRAÇÃO

Nos ensaios de descargas parciais o valor de carga que é realmente mensurável é q_m . Para relacionar os valores de carga aparente e de carga medida, faz-se necessário uma calibração adequada. O sistema deve ser calibrado com o objeto de teste conectado e na configuração exata a ser usada durante o teste, pois mudança no arranjo geométrico do sistema do teste provoca mudança na capacitância.

A calibração do sistema é conseguida quase sempre pela inserção de uma onda quadrada produzida por um gerador de pulso, que normalmente é parte integrante do circuito de medição. O gerador de calibração gera pulsos com tempo de subida em torno de 50 a 100 ns, isto é, com espectro de frequência semelhante ao das descargas parciais. Como pode ser observado na Figura 2.11, o pulso é aplicado no circuito de detecção através de uma capacitância pequena C_0 e com uma amplitude ajustável U_0 . Com isso, conhece-se exatamente a carga q_0 que se está aplicando no circuito, que tem o valor de $q_0 = U_0 \cdot C_0$.

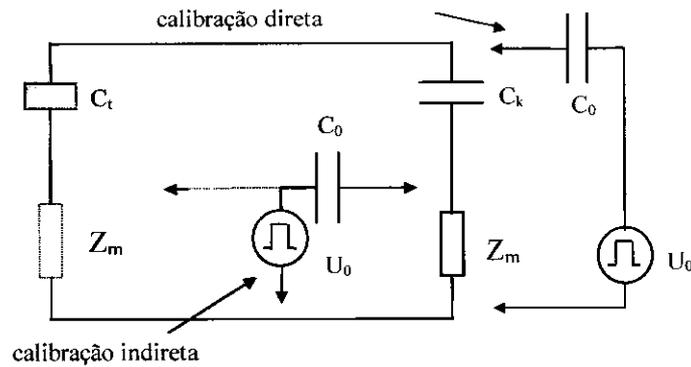


Figura 2.11- Calibração do circuito de ensaio.

Na calibração direta o pulso é aplicado no circuito pelo objeto de teste. Ajusta-se, através do circuito de amplificação, valor lido no detector de descargas para o valor q_0 , que nesta situação faz o papel da carga aparente, relacionando o valor medido com o valor de carga aparente (MOLE, 1970).

Na calibração indireta os pulsos de calibração são aplicados diretamente no impedor de medição ou através de um ramo do circuito balanceado. Pode ser usado quando o circuito está energizado, permitindo assim que a resposta da descarga parcial seja comparada diretamente com a resposta do pulso de calibração. Quando é usado um calibrador indireto, um fator de correção deve ser estabelecido pela comparação de sua resposta com a de um calibrador direto.

2.5 FONTES DE INTERFERÊNCIA

As interferências nas indicações dos instrumentos de medição de descargas parciais podem ser causadas por fontes internas e externas ao circuito de medição.

As interferências internas acontecem quando o circuito de ensaio está energizado. Suas origens podem ser por descargas dentro do transformador de ensaio, nos condutores de alta tensão, buchas e em objetos vizinhos não aterrados. Conexões com imperfeições no lado da alta tensão, ou do lado aterrado também causam descargas e conseqüentemente interferências. Descargas no circuito de baixa tensão também podem causar interferências, mas, usualmente, são filtradas pelo próprio transformador.

As interferências externas são aquelas que ocorrem quando o circuito de ensaio está desenergizado e são causadas por: operação de manobra em outros circuitos, máquinas de comutação, ensaios de alta tensão nas vizinhanças, rádio transmissão, ruído inerente ao próprio instrumento de medição, etc. As interferências externas também podem ocorrer mesmo quando a fonte de alimentação estiver ligada ao circuito de ensaio com tensão nula.

Na Tabela 2.1 se encontram sintetizadas as providências que se deve tomar para que os vários tipos de interferências externas e internas sejam minimizados.

Tabela 2.1- Sumário de prevenções contra ruídos

PROBLEMA	FONTE DA PERTURBAÇÃO	AÇÃO CORRETIVA
Interferência devido a fontes externas	Fonte de alimentação	Usar filtros nos alimentadores / alta tensão e o circuito detector balanceado
	Fonte de alta tensão	Usar filtro de alta tensão ou checar as terminações de alta tensão (pontas ou bordas)
	Sinais de rádio ou ondas eletromagnéticas	Usar sala blindada
Descarga no circuito de teste	Fonte de alta tensão	Usar fonte livre de descarga, filtro de linha, toróides metálicos, blindagem. Circuito balanceado.
	Capacitor de acoplamento	Usar capacitor livre de descargas
Ruído de contato	Ruído no circuito de ensaio, entre placas e terminais em capacitores. Ruído em buchas, taps.	Checar bem todos os contatos antes do ensaio. Conexões e aterramentos bem feitos. Aplicar pulsos de corrente.

FONTE: COSTA; NEVES, 1996.

2.6 BREVE INTRODUÇÃO A TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

Uma onda pode ser definida como uma função oscilante no tempo ou espaço, tal como uma senóide. Wavelet pode ser definida como uma “onda pequena”, com energia concentrada no tempo que possibilita a análise transiente, não-estacionária ou variável no tempo (Amorim Júnior et al., 1999). A Transformada Wavelet é uma ferramenta de análise de sinal, e tem como base à “quebra” de um sinal em escalas e deslocamentos com relação a

wavelet original, chamada wavelet mãe (BURRUS et al., 1998). E é isto que a difere da Transformada de Fourier, cujo sinal é decomposto em bases senoidais.

As Transformadas Wavelet podem ser Contínuas e Discretas. A utilização prática da Transformada Wavelet Discreta é maior que a Contínua (Amorim Júnior et al, 1999), e computacionalmente mais eficiente, por gerar um número muito menor de coeficientes (SHIM et al., 2000). Por estes motivos, a análise considerada será a da Transformada Wavelet Discreta.

A decomposição de um sinal com a Transformada Wavelet Discreta é dada por:

$$f(t) = \sum_k \sum_j a_{j,k} \cdot \psi_{j,k}(t) \quad (2.13)$$

A transformada é dita discreta porque as funções $\psi_{j,k}(t)$ são obtidas por escalonamentos e translações discretas de $\psi(t)$, assim:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \cdot \psi(2^j \cdot t - k) \quad (2.14)$$

Os coeficientes $a_{j,k}$ são chamados de Transformada Wavelet Discreta de $f(t)$. Os coeficientes $a_{j,k}$ são obtidos pelo produto interno:

$$a_{j,k} = \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = \int f(t) \cdot \psi_{j,k}(t) dt \quad (2.15)$$

O produto interno é uma comparação entre as funções $f(t)$ e $\psi_{j,k}(t)$. Na função $\psi_{j,k}(t)$, o parâmetro 'j' escala a função $\psi(t)$, e conseqüentemente determina o conteúdo de freqüência do sinal, obedecendo assim a umas das propriedades de Fourier:

$$f(t/a) \Leftrightarrow F(a \cdot w) \quad (2.16)$$

Esta propriedade específica que a resolução de um sinal é inversamente proporcional ao tamanho do seu espectro de freqüência. Portanto, variando j na Equação (2.14), varia-se o espectro da freqüência em que o sinal é decomposto. Deste modo, o coeficiente $a_{j,k}$ caracteriza o sinal $f(t)$ em relação ao espectro, e o parâmetro k desloca $\psi_{j,k}(t)$ no tempo, permitindo que o sinal seja decomposto em toda sua extensão temporal.

Em termos de algoritmo, Burrus et al.(1998) afirmam que uma maneira mais eficiente para caracterizar é desmembrar a equação (2.13) em:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c(k) \cdot \varphi_k(t) + \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d(j,k) \cdot \psi_{j,k}(t) \quad (2.17)$$

sendo,

$$\varphi_k(t) = \varphi(t-k). \quad (2.18)$$

A função $\varphi(t)$ é uma função de escalonamento (função escala), e serve inicialmente para uma caracterização mais grosseira do sinal, enquanto as funções wavelets $\psi_{j,k}(t)$ refinam a caracterização. Os coeficientes $c(k)$ e $d(j,k)$ são determinados pelos produtos internos, como podem ser vistos nas Equações (2.19) e (2.20):

$$c(k) = \int f(t) \cdot \varphi_k(t) dt \quad (2.19)$$

$$d(j,k) = \int g(t) \cdot \psi_{j,k}(t) dt \quad (2.20)$$

As funções escala e wavelet possuem uma relação biunívoca, ou seja, determinando-se uma delas, a outra também será definida. A função escala pode ser obtida recursivamente através de combinação linear de suas escalas mais finas, ou seja,

$$\varphi(t) = \sum h(n) \sqrt{2} \cdot \varphi(2t-n) \quad n \in \mathbb{Z} \quad (2.21)$$

Na Equação (2.21) $h(n)$ é definida como uma seqüência de números reais ou complexos, chamado de coeficientes da função escala. Da mesma forma, a função wavelet pode ser expressa como:

$$\psi(t) = \sum_n h_1(n) \sqrt{2} \phi(2t-n), \quad n \in \mathbb{Z} \quad (2.22)$$

As funções $h_1(n)$ e $h(n)$ estão biunivocamente ligados pela relação:

$$h_1(n) = (-1)^n h(N-1-n), \quad (2.23)$$

sendo, N um número par. Combinando as Equações (2.19) e (2.22), tem-se:

$$c_j(k) = \sum_m h(m-2k)c_{j+1}(m). \quad (2.24)$$

Os coeficientes das escalas mais finas e grosseiras são, respectivamente, $c_j(k)$ e $c_{j+1}(m)$ (BURRUS et al., 1998). A expressão equivalente para os coeficientes da função wavelet é:

$$d_j(k) = \sum_m h_1(m-2k)c_{j+1}(m) \quad (2.25)$$

As Equações (2.24) e (2.25) são na realidade uma compactação das operações de convolução e *down-sampling*. A convolução é uma operação linear de processamento de sinais. A operação de *down-sampling* consiste na seleção e transformação de uma seqüência de números. A nova seleção será composta dos números da seqüência anterior, com exceção dos números das posições pares. O *down-sampling* pode ser representado pela Figura 2.12.

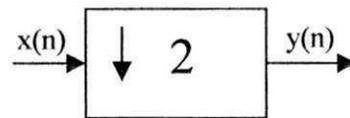


Figura 2.12- Representação esquemática do *down-sampling* de um sinal.

Vetterli et al. (1995) apud Costa (2001) relatam que uma das grandes vantagens da Transformada Wavelet Discreta é o cálculo dos coeficientes $c(k)$ e $d(j,k)$, devido a similaridade entre a teoria de Bancos de Filtros e a decomposição do sinal utilizando a Transformada Wavelet Discreta. A estrutura de Bancos de Filtros pode ser vista na Figura 2.13.

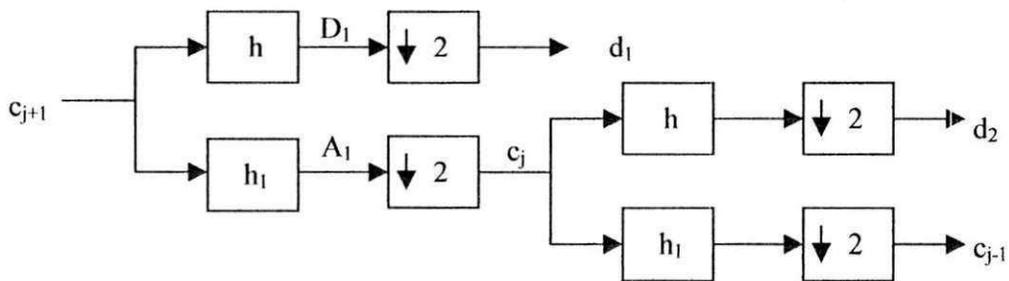


Figura 2.13- Estrutura de Banco de Filtros com dois estágios para análise do sinal.

Pela teoria da Transformada Wavelet Discreta, as amostras do sinal digitalizado são os coeficientes c_{j+1} , e com estes coeficientes, pode-se calcular os coeficientes wavelets da família d_j através estrutura mostrada na Figura 2.13. Na Figura estão representados dois estágios de um banco de filtros. Cada estágio tem como entrada os coeficientes da função escala, e como saída, os coeficientes da função wavelet e escala, em uma resolução menor. A estrutura é considerada um banco de filtro porque h e h_1 são, respectivamente, filtros digitais passa-alta e passa-baixa. Ou seja, na Figura 2.13, A_1 representa uma aproximação do sinal c_{j+1} , e D_1 , os detalhes. O *down-sampling* possibilita que a saída formada pela soma dos vetores c_j e d_1 tenha o mesmo tamanho do sinal amostrado. Esta estrutura de banco de filtros facilita muito o cálculo dos coeficientes wavelet e permitem que se analisem os detalhes do sinal em diferentes níveis de resolução.

Para a recuperação do sinal, é usada a Transformada Wavelet Discreta Inversa. O processo de recuperação envolve *upsampling* e filtragem. *Upsampling* é o processo inverso de *downsampling*. Numa seqüência de números, entre dois números consecutivos, se insere o número zero. A Figura 2.14 ilustra o processo. Os filtros h_1' e h' são idênticos aos filtros h_1 e h , agora com o tempo revertido.

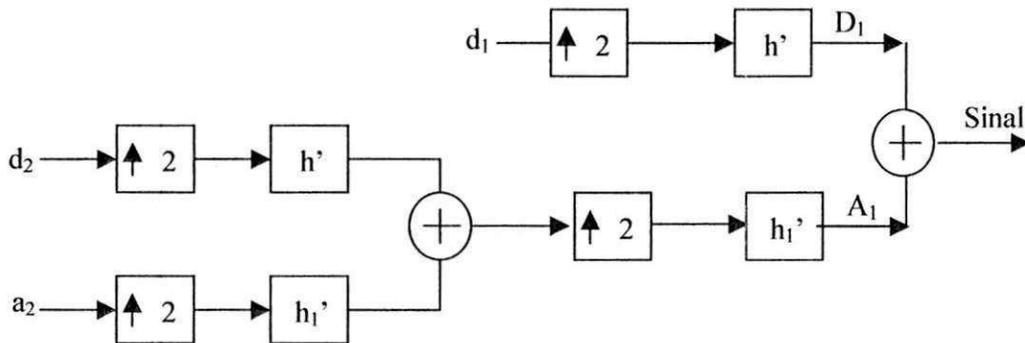


Figura 2.14- Estrutura de Banco de Filtros com dois estágios para síntese do sinal.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

As técnicas de medição das descargas parciais têm sido usadas no monitoramento do envelhecimento dos equipamentos elétricos. A constatação da sua presença pode identificar situações danosas e perigosas para a isolação de um equipamento submetido à alta tensão. O trabalho de detecção e medição de pulsos de descargas parciais utilizando um amplificador de banda larga é uma parte importante para o desenvolvimento de metodologias que objetivam o monitoramento automático das descargas parciais. Uma medição ideal dos parâmetros essenciais presentes nos sinais de descargas parciais é obtida quando o detector de descargas parciais tem a capacidade de não distorcer ou atenuar estes parâmetros. Para tanto será desenvolvido um detector de banda larga. Ele deverá ser formado por um impedor de 50Ω e um amplificador com faixa de passagem de 50 MHz e frequência de corte inferior de 2,75 MHz.

Neste capítulo são descritos os materiais utilizados e a metodologia desenvolvida para a implementação do trabalho proposto. Como o objetivo do trabalho é de projetar e implementar um circuito de detecção, incluindo um amplificador de banda larga que será utilizado para a detecção de descargas parciais, necessitou-se realizar várias medições de sinais de descargas parciais antes e após a implementação do circuito. Também, para validar o amplificador projetado e implementado, ensaios foram realizados, incluindo os realizados através de simulação com o programa PSpice®.

3.2 MATERIAIS

Para a realização dos ensaios, foram utilizadas configurações compostas por eletrodos e amostras. As amostras eram em acrílico e em polietileno, que já se encontravam confeccionadas, e vinham e vêm sendo utilizadas como referência de padrões conhecidos. Desse modo, as amostras serviram para simular padrões de defeito que aparecem com frequência nos equipamentos elétricos de potência. Para a confecção do amplificador, foram utilizados basicamente transistores, resistores e capacitores. As Figuras 3.1(a) e 3.1(b) são fotografias dos eletrodos e amostras utilizados, respectivamente.

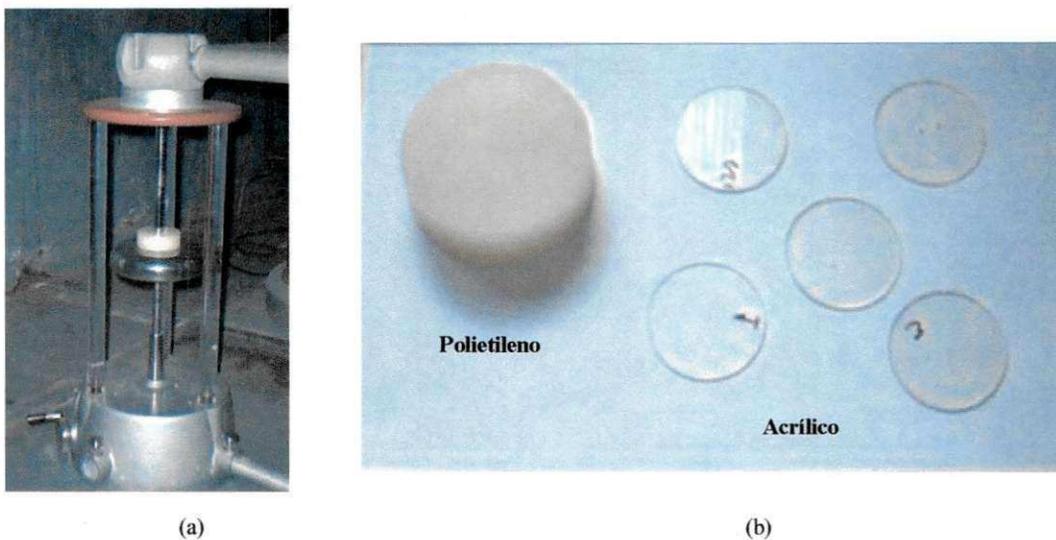


Figura 3.1– Fotografias do (a) eletrodo e (b) amostras.

3.2.1. Configurações das Amostras

Configuração 1

A configuração 1 é composta de eletrodos metálicos do tipo ponta-plano, com a ponta conectada no terminal de alta tensão. A configuração 1 garante a geração do corona no semi-ciclo negativo da senóide da tensão aplicada. O meio dielétrico que envolve os eletrodos é o ar. Na Figura 3.2, é mostrado o desenho da configuração para a geração de corona negativa.

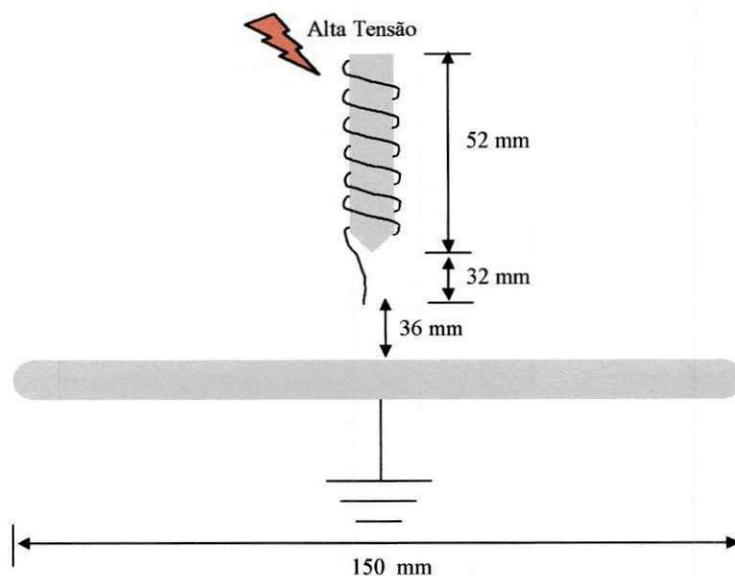


Figura 3.2- Desenho do arranjo experimental usado para provocar o corona.

Configuração 2

A configuração 2 é formada por uma amostra de polietileno, eletrodos tipo bastão e plano. O disco de polietileno tem 75 mm de diâmetro e 23,3 mm de altura. Para confeccionar a amostra, foi colocada em um molde a quantidade de polietileno granulado suficiente para enchê-lo; em seguida o conjunto foi levado ao forno, previamente ajustado para uma temperatura de 200 °C, após 12 horas o conjunto foi retirado do forno e resfriado à temperatura ambiente. Na Figura 3.3 é mostrado o desenho do arranjo da configuração com a amostra. A confecção das amostras de polietileno foi realizada por terceiros. Nos ensaios de descargas parciais, a amostra é colocada no eletrodo bastão-plano.

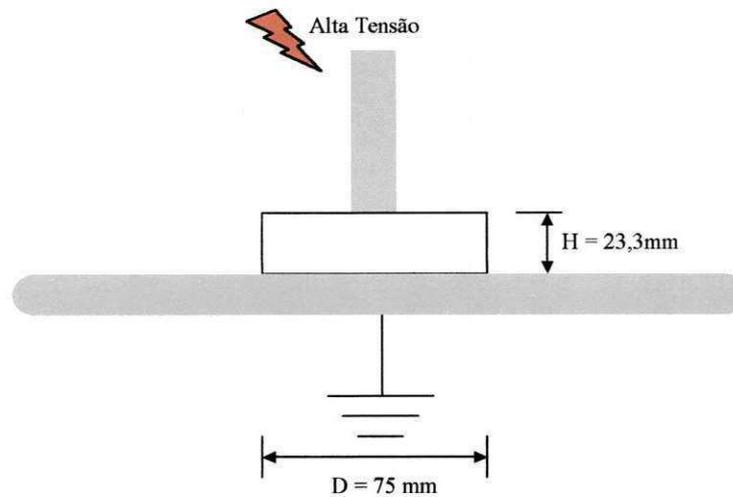


Figura 3.3- Desenho do arranjo para simular descargas parciais com amostra em polietileno.

Configuração 3

A configuração 3 é composta por amostras de acrílico e eletrodos tipo bastão e plano. As amostras em acrílico são formadas por 5 discos. Em alguns discos foram feitos pequenos furos transpassantes que associados em série criam cavidades ou falhas propositais. As falhas buscam simular defeitos comuns em materiais dielétricos, como bolhas de gás, cavidades, ranhuras. Um dos discos possui um pequeno orifício no centro, assim é possível manipular a posição dos discos para que se obtenha a bolha na face superior, na inferior ou na central. Os discos têm espessura de 5,0 mm e diâmetro de 46,1 mm. O orifício, existente em um dos discos de acrílico, tem o diâmetro de 0,5 mm. Na Figura 3.4 é possível observar o desenho de um arranjo, usado para simular uma cavidade gasosa. O disco, que apresenta o furo, foi colocado na posição central entre dois discos de cada lado.

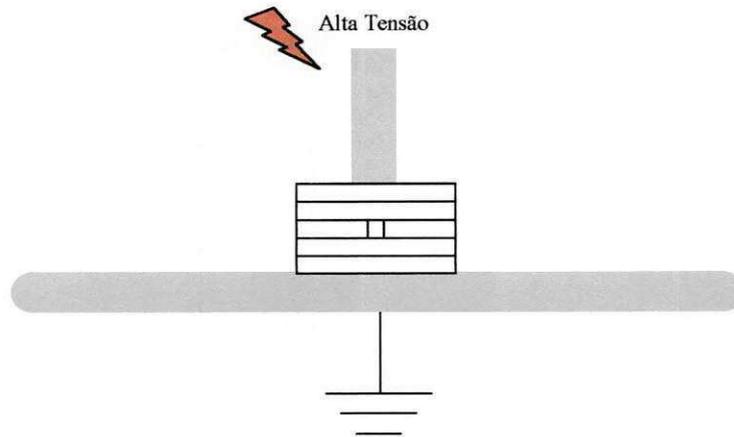


Figura 3.4– Desenho do arranjo para simular descargas parciais com amostra em acrílico.

3.2.2 Amplificador Banda Larga

Escolheu-se para o amplificador dos sinais de descargas parciais uma faixa de passagem de 50 MHz. O ganho escolhido foi de aproximadamente 10 000. A impedância de entrada deve ser alta e a de saída, baixa. Para atender os requisitos, foi projetado e implementado um amplificador de 4 estágios (Figura 3.5), sendo os 3 primeiros na configuração emissor comum e o último, na configuração coletor comum. Dessa forma, tem-se impedância elevada na entrada e baixa na saída.

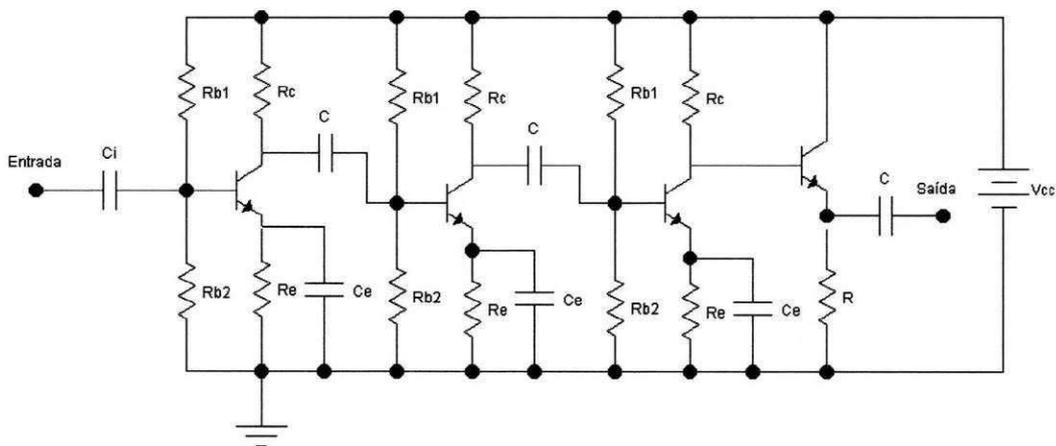


Figura 3.5– Amplificador de 4 estágios.

O amplificador utiliza resistores, capacitores e transistores. Os resistores são de fibra de carbono, com uma tolerância de 5% do seu valor nominal, e uma potência de um oitavo de watt. Os capacitores escolhidos para o acoplamento entre os estágios devem ser fabricados com materiais dielétricos que seja pouco dependente da frequência. Os dielétricos plásticos, como por exemplo, o poliéster, não respondem aos sinais de altas frequências. Isso significa que estes capacitores não podem ser usados de forma eficiente em circuitos que operem em frequências acima de alguns megahertz. Para altas frequências, os capacitores usados podem ser de mica, cerâmicos ou policarbonatos. Os capacitores utilizados no amplificador são cerâmicos. Para desacoplar as componentes alternadas da fonte DC, que alimenta o amplificador, foram colocados capacitores eletrolíticos, da ordem de microFaraday, entre os terminais positivo e negativo da fonte. Todos os transistores são *npn*, utilizados em amplificadores de banda larga. Foi escolhido o transistor BRF90 que tem como características principais: V_{ce} de 15 V, I_c de 30 mA, h_{FE} ($V_{ce}=10$ V, $I_c=14$ mA) = 50 (típico), $f_T = 5$ GHz.

3.3 MÉTODOS

Inicialmente foram realizados ensaios de geração e detecção de descarga parcial com amostras, cujas configurações foram descritas anteriormente, utilizando o detector comercial existente no LAT/DEE/UFCG, doravante será chamado por detector comercial. Os dados obtidos nos ensaios servirão como referência para comparação dos dados obtidos nos ensaios de descargas parciais com o circuito de detecção projetado e implementado. O circuito projetado e implementado, doravante será chamado por circuito desenvolvido, inclui um impedor de 50Ω e um amplificador de banda larga. Os ensaios com o amplificador foram limitados a ensaios individualizados por estágio, sendo necessário se fazer uma complementação, com o objetivo de melhor caracterizar o circuito, utilizando o programa PSpice®. Entre a realização dos ensaios com os detectores de sinais de descargas parciais comercial e o desenvolvido, realizaram-se outros ensaios, com o objetivo caracterizar o sistema existente.

3.3.1 – Detecção e Medição de Descargas Parciais com o Detector Comercial

O sistema de aquisição utilizado é baseado no método convencional de detecção de descargas, sugerido pela Norma IEC 270/1981 e NBR6940/1981. A Figura 3.6 ilustra o arranjo elétrico utilizado para geração, detecção, medição e digitalização dos sinais de descargas parciais.

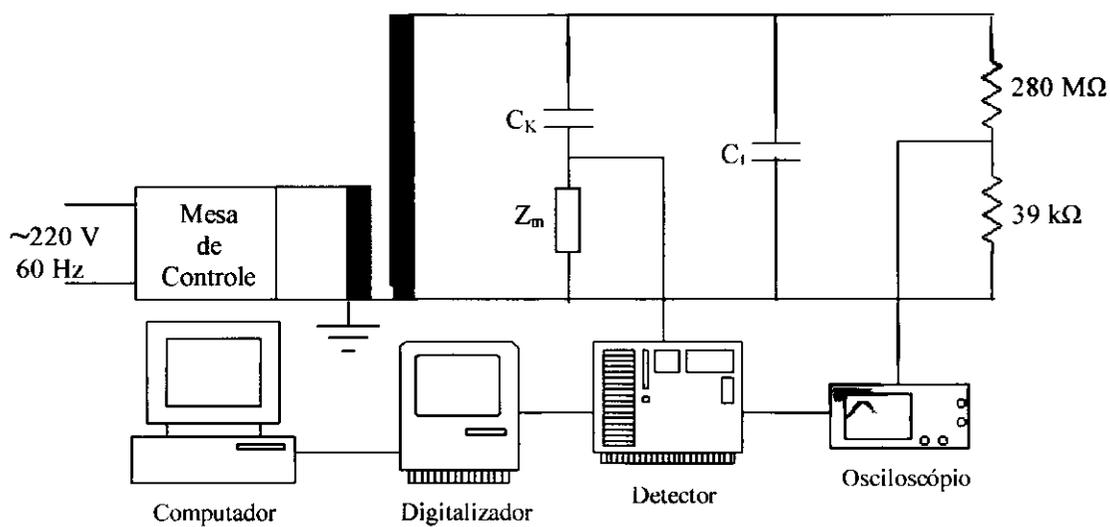


Figura 3.6- Arranjo elétrico utilizado para geração, detecção e digitalização dos sinais

A Figura 3.7 é uma fotografia do arranjo experimental e a sua disposição dentro da sala blindada eletromagneticamente. A sala é normalmente utilizada para medição de descargas parciais, quando se utiliza arranjo de pequeno porte.



Figura 3.7- Fotografia do arranjo experimental de detecção de descargas parciais.

As partes constituintes do circuito são: mesa de controle de fabricação FERRANTI, transformador de 220 V/100 kV-10 kVA, digitalizador RTD 710A de fabricação Tektronix, osciloscópio Tektronix com duplo traço, capacitor de acoplamento de 2 nF/100 kV imune as descargas parciais, detector de descargas (circuito em ponte e detector) e a amostra experimental. Os dois resistores, com valores de 280 M Ω e 39 k Ω , estão conectados em série e formam um divisor de tensão resistivo. O divisor de tensão serve para monitorar o nível de tensão aplicado à amostra. Cada 1 V sobre o resistor de 39 k Ω representa 7 180,5 V no circuito de alta tensão. Os cabos utilizados nas ligações dos equipamentos e material sob ensaio são coaxiais com impedância de 50 Ω e perdas reduzidas para altas frequências.

A alimentação elétrica do circuito de alta tensão é feita na tensão de 220 V com tensão alternada e frequência industrial (60 Hz). Por meio da mesa de controle se faz a energização do circuito e a regulação de tensão através do transformador de alta tensão.

No circuito experimental, os pulsos de corrente, gerados pelas descargas parciais no objeto sob teste, produzem uma queda de tensão (sinal) no impedor, que se encontra fisicamente dentro do detector comercial. Após serem captados, os sinais são amplificados, processados e disponibilizados para a leitura analógica, podendo ser visualizados com o

auxílio de um osciloscópio. Paralelamente, os sinais ficam disponíveis para o digitalizador. Do digitalizador, os sinais foram repassados para um computador pessoal através da interface GPIB (*General Purpose Interface Bus*) da National Instruments. O protocolo de comunicação é IEEE 488.2. O processo de aquisição de dados é coordenado pelo programa compatível, IBIC (*Interface Bus Interactive Control*), software responsável pelas rotinas de comando da placa GPIB.

Os sinais digitalizados são armazenados no computador em arquivos binários, que posteriormente são traduzidos para o formato ASCII através de um programa computacional escrito em código MATLAB®. Desta forma os dados dos sinais de descargas parciais ficam disponíveis e podem ser processados por qualquer editor de gráfico.

O capacitor de acoplamento, apresenta capacitância de 2 nF, bem superior aos valores das amostras ensaiadas. O detector de descargas, o digitalizador e o osciloscópio são os equipamentos de detecção e medição do sistema.

Para detecção, medição e interpretação das descargas parciais é essencial que o nível de ruído de fundo seja o menor possível. A redução das interferências é feita utilizando-se filtros passivos passa-baixa tipo π que foram colocados na entrada e na saída do regulador motorizado 220 V/0-250 V. Assim, reduzem-se os possíveis efeitos dos ruídos, provenientes da rede de energia elétrica. O filtro também se destina a reduzir o ruído do regulador motorizado. Para evitar os chamados "loops" no aterramento, todos os equipamentos estão ligados ao mesmo ponto de aterramento. Os diagramas elétricos dos filtros podem ser visto nas Figuras 3.8 e 3.9.

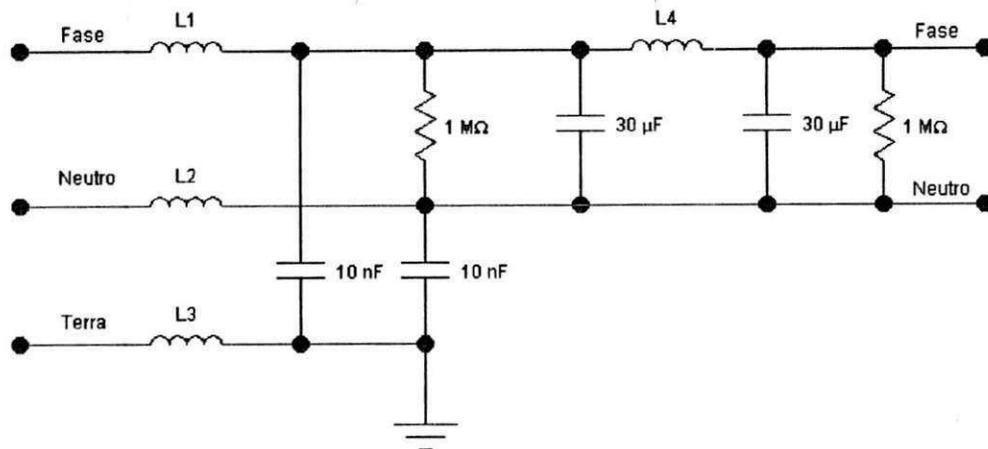


Figura 3.8- Diagrama elétrico do filtro de entrada do regulador de tensão.

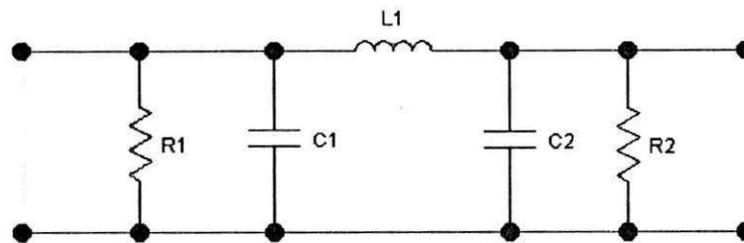


Figura 3.9- Diagrama elétrico do filtro de saída do regulador de tensão.

A) Detector de descargas parciais

O detector utilizado é do tipo balanceado (*Balanced Partial Discharges Detector*) da marca Biddle, projetado especialmente para medição dos sinais de descargas parciais em circuitos em ponte ou balanceado. Entretanto ele também pode ser usado em circuito de acoplamento direto. O detector é composto de circuito em ponte e um medidor de descargas parciais. As Figuras 3.10 e 3.11 representam com mais detalhes as configurações do detector.

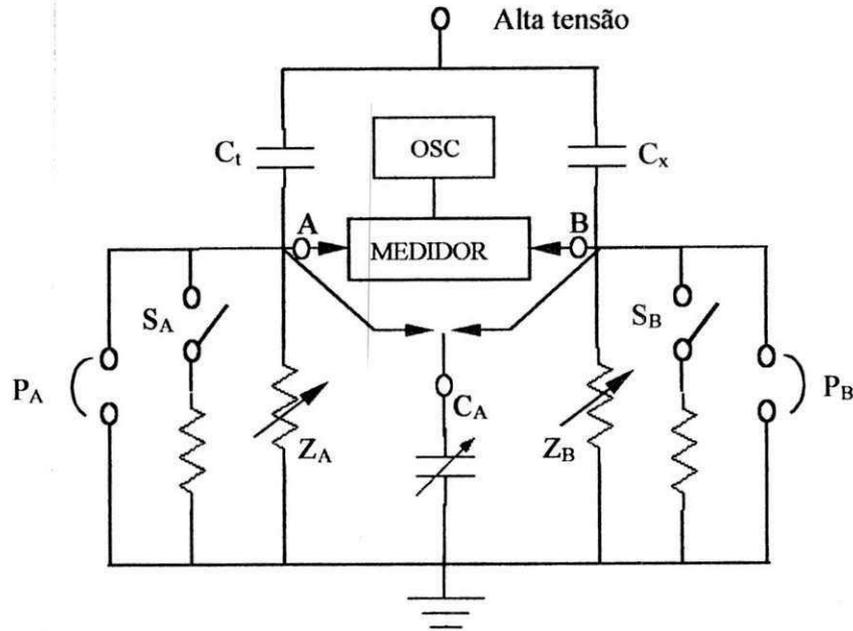


Figura 3.10- Circuito de detecção em ponte balanceada.

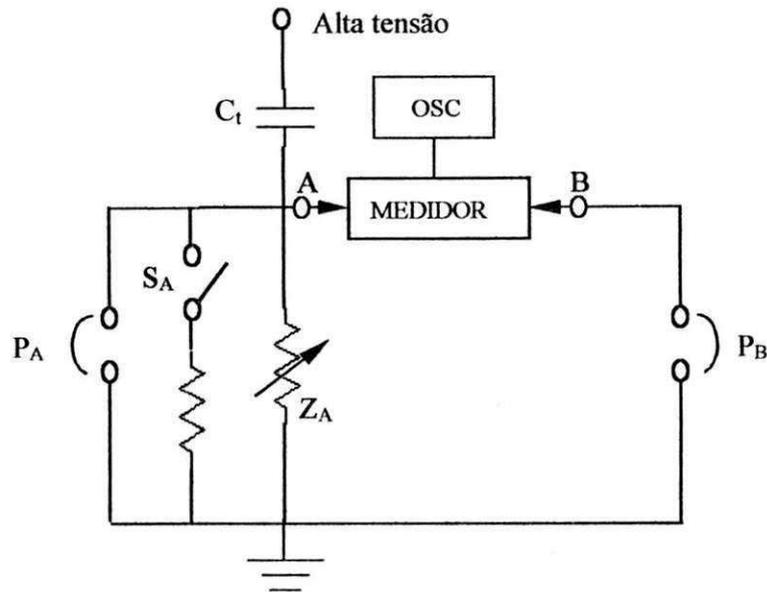


Figura 3.11- Circuito de detecção simples.

Nas configurações mostradas, pode-se observar a separação física entre o circuito em ponte, utilizado para balanceamento da ponte, e medidor de descargas parciais. Os pontos A e B do detector são acessíveis externamente.

Nas Figuras 3.10 e 3.11, C_x representa o capacitor utilizado para balancear a ponte. O C_x deve ter uma capacitância com valor muito próximo ao de C_s (esta é a maior dificuldade encontrada). P_A e P_B representam circuitos compostos de diodos zener e tiristores bidirecionais utilizados para a proteção, caso ocorra uma descarga disruptiva no objeto sob teste, submetendo o detector de descargas parciais à alta tensão. As impedâncias Z_A e Z_B são resistências variáveis, sendo que a primeira é utilizada para otimizar a resposta em frequência e amortecimento do circuito de entrada do detector, e a segunda, ajustar a máxima rejeição do sinal de modo comum (balanceamento da ponte). As chaves S_A e S_B , quando fechadas, adicionam uma resistência shunt de 5Ω , possibilitando um aumento de corrente que flui pela ponte para 5 A . O aumento na corrente permite que a amostra tenha uma capacitância maior que $0,3 \mu\text{F}$. A capacitância C_A , com valor variável entre 10 a $10\,000 \text{ pF}$, serve para balancear os efeitos reativos da amostra.

Como dito anteriormente, as dificuldades em se ter capacitores com valores bem próximos ao das amostras, fez com que nos ensaios realizados não fosse utilizada a configuração em ponte, mas sim a configuração simples, com algumas modificações. O capacitor de acoplamento C_k foi colocado em série com o detector (ponte/medidor), e a amostra, em paralelo. Na Figura 3.12 estas modificações podem ser melhor visualizadas.

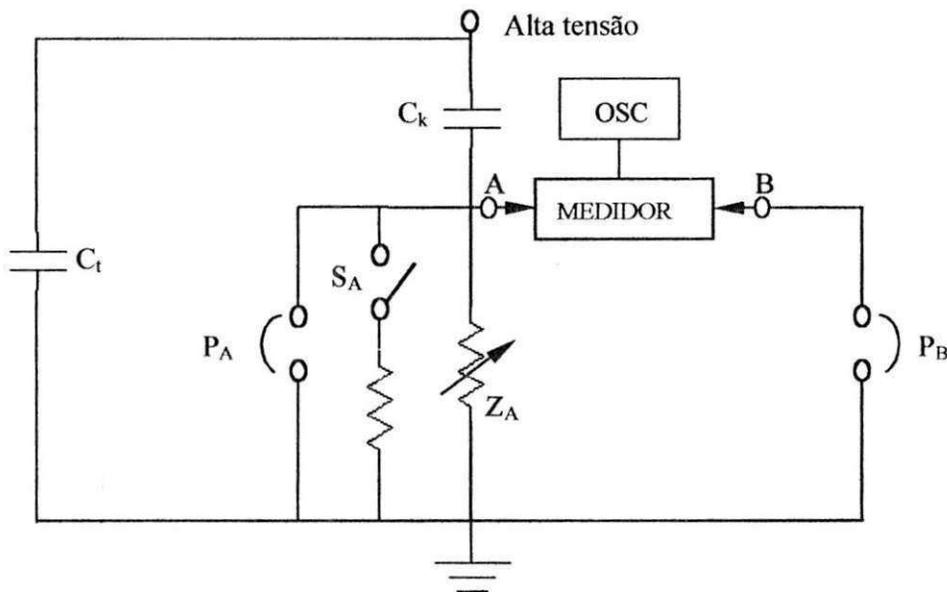


Figura 3.12- Circuito utilizado para detecção e medição de descargas parciais.

Com o arranjo utilizado no LAT, percebe-se que o circuito de ponte se reduz ao impedor, composto por resistências cujos valores são 10, 33, 100, 333, 1 000 e 3 333 Ohms.

Considerando o circuito de ponte um conjunto de resistências, o diagrama de bloco simplificado do medidor é mostrado na.Figura 3.13.

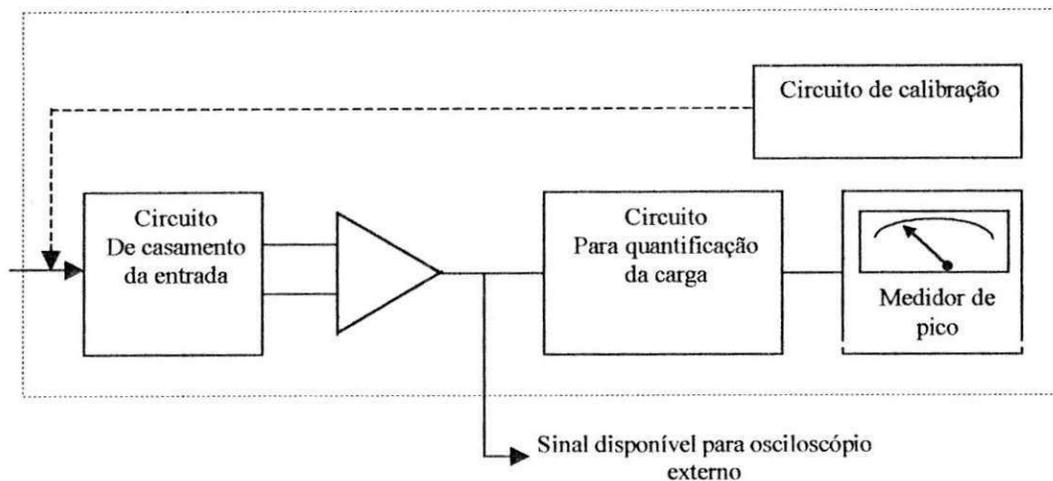


Figura 3.13– Diagrama de bloco do medidor de descargas parciais.

O circuito de casamento de impedância de entrada acopla as resistências ao amplificador, minimizando os ruídos. O amplificador tem um ganho de 13 000 (84 dB) e uma banda de passagem de 16 a 180 kHz. Verifica-se que a faixa de passagem é muito estreita, embora de acordo com Boogs e Stone (1982) é tida como de “banda larga”. A largura da banda, em torno de 180 kHz, pode causar distorções na detecção do sinal de descargas parciais. O circuito de quantificação da carga, isto é, o medidor de picoCoulomb, realiza leituras na faixa de 5 a 500 pC, com exatidão de mais ou menos 10%. O circuito de calibração providencia cinco níveis de saídas, sendo quatro externas (1, 10, 100 e 1000 pC) e uma interna (100 pC).

B) Digitalizador

Os sinais oriundos do detector de descargas parciais são captados pelo digitalizador RTD 710A da Tektronix, que pode operar com a interface IEEE Standard-488. A norma

IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) define as especificações elétricas bem como: os cabos, conectores, controle de protocolos e mensagens requeridas para permitir a transferência de informação entre dispositivos. A Norma IEEE-488 assegura a comunicação entre dispositivos, não definindo em geral o conjunto de comandos necessários para que o dispositivo realize determinada operação, sendo de responsabilidade de cada fabricante a definição. O digitalizador possui gatilhamento (*trigger*) interno ou externo. Ele tem a capacidade de captar sinais com amplitude entre 100 mV a 50 V. A resolução do digitalizador é de 10 bits. No seu modo normal a taxa mínima de amostragem é de 10 ns. Sua memória é composta de 256 k palavras (10 bits por palavra). Cada ponto amostrado pelo digitalizador é dividido em duas palavras de 8 bits (Byte) quando são transferidos para o computador. Ou seja, cada ponto do sinal consome 2 Bytes de memória.

C) Calibração do circuito

Antes de se fazer qualquer ensaio com o detector é necessário fazer a calibração direta da medição. Desta forma, um valor de carga conhecido é injetado no circuito de medição. A amplificação é ajustada para que o valor lido corresponda ao valor da carga injetada. A carga injetada é obtida por sinais de onda quadrada gerados pelo próprio detector aplicados em um capacitor. O valor da carga de calibração para todos os ensaios é de 100 pC.

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

D) Procedimentos de ensaios e processamento dos sinais

Todos os ensaios foram realizados na sala blindada eletromagneticamente do LAT/DEE/UFCG. Como se tratam de ensaios realizados com alta tensão, alguns cuidados

foram tomados antes de iniciar a montagem dos equipamentos e das conexões necessárias à execução do trabalho. Para uma maior proteção, o circuito estava em uma área isolada por telas metálicas aterradas, além de existir um sistema de proteção acoplado ao transformador de alta tensão. O sistema de proteção consiste de uma chave fim de curso e de uma haste de aterramento. A chave fim de curso permite que o circuito seja acionado somente quando seus contatos são fechados pelo próprio peso da haste de terra. Quando se efetua manutenções ou alterações no sistema de detecção e medição é necessário fazer o contato elétrico e fixar a haste de terra nas partes submetidas à alta tensão.

Com o circuito de ensaio montado e de posse das configurações e amostras, os ensaios foram iniciados. De acordo com as normas técnicas, primeiramente foi realizada a calibração do detector de descargas parciais. Em seguida, com os arranjos ponta-plano foi gerado o sinal de corona. Por último, foram realizados os ensaios de descargas parciais com as amostras de polietileno e acrílico.

Nos ensaios realizados, variando-se o nível de tensão aplicado ao objeto de ensaio, têm-se como variáveis os pulsos de corrente. Em todos os ensaios o tempo de amostragem foi do sinal foi 600 ns ,com o tamanho da amostra de 32 768 pontos.

Para o processamento dos sinais foi utilizada como ferramenta o ToolBox Wavelet do programa MATLAB®, já utilizada por COSTA (2001), para o processamento de sinais de descargas parciais. A base do processamento é o uso da transformada wavelet discreta para a filtragem dos ruídos. O sinal de descarga parcial, após a digitalização, é traduzido de binário para ASCII por um programa escrito em código MATLAB®. O programa tem como saída um vetor que contém o sinal amostrado. Com a transformada wavelet, o sinal amostrado é decomposto em diferentes resoluções contidas em vetores. O sinal manipulado no MATLAB® transforma-se em curvas. As curvas representam o sinal (pulsos) superpostos a senóide.

3.3.2 Detecção e Medição de Descargas Parciais com o Circuito Desenvolvido

No circuito de geração e detecção que utiliza o circuito projetado, (impedor/amplificador) é baseado também no método convencional de detecção de descargas, sugerido pela Norma IEC 270/1981 e NBR6940/1981 ABNT. O seu arranjo elétrico é mostrado na Figura 3.14.

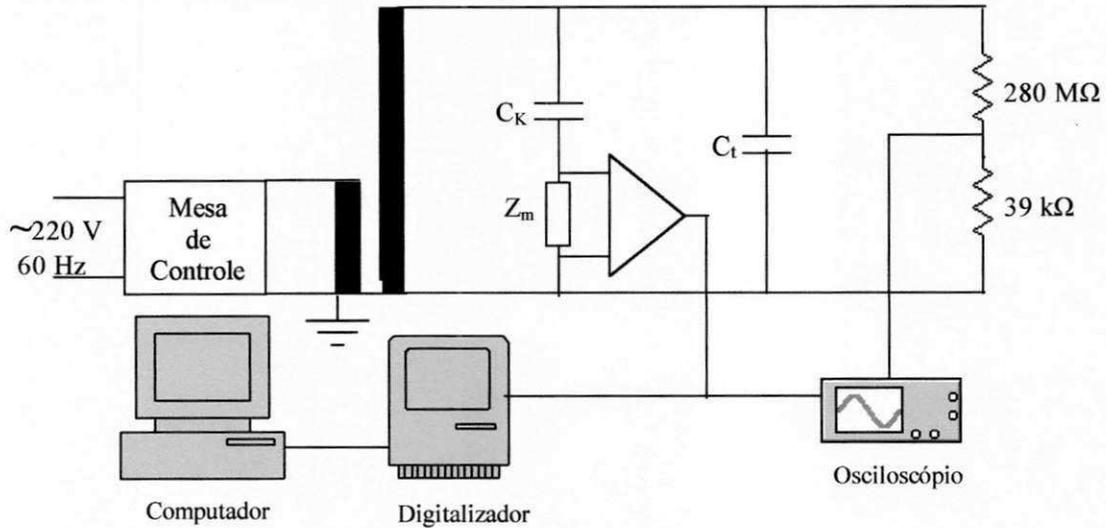


Figura 3.14- Arranjo elétrico utilizado para geração, detecção e digitalização dos sinais com o detector desenvolvido.

Fotografias do detector desenvolvido inserido no circuito de geração, medição e detecção de descargas parciais são mostradas nas Figuras 3.15 e 3.16.

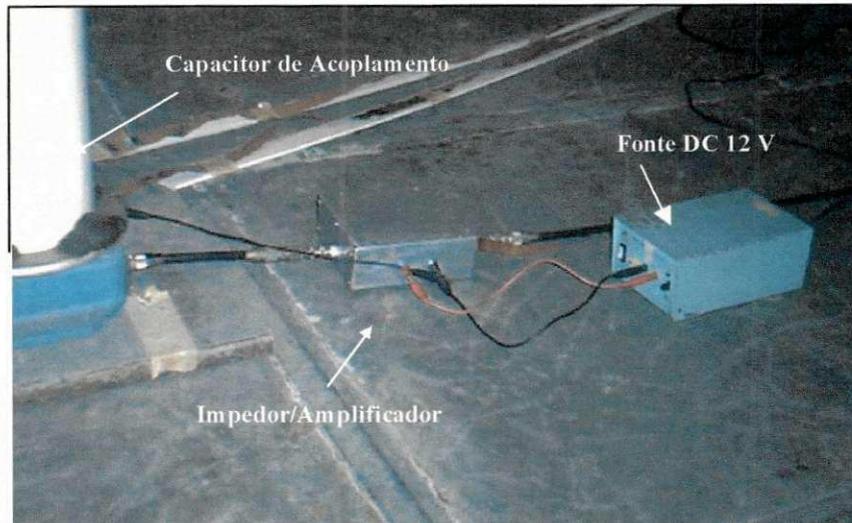


Figura 3.15- Fotografia do detector desenvolvido inserido no circuito de geração, medição e detecção de descargas parciais (vista 1).

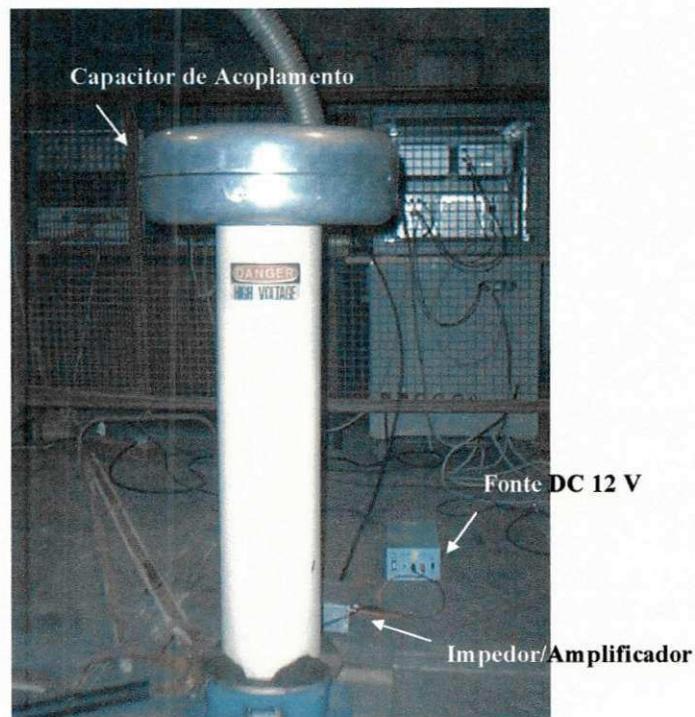


Figura 3.16- Fotografia do detector desenvolvido inserido no circuito de geração, medição e detecção de descargas parciais (vista 2).

A mesa de controle, o transformador, o digitalizador e o capacitor de acoplamento são os mesmos utilizados e descritos na secção 3.3.1. Entretanto o osciloscópio utilizado é digital, fabricação Tektronix, com uma largura de banda de 100 MHz e taxa de amostragem de 1 GS/s. O detector de descargas parciais é formado por uma resistência de 50Ω e um amplificador de banda larga. Uma fotografia do detector desenvolvido com maiores detalhes pode ser visto na Figura 3.17.

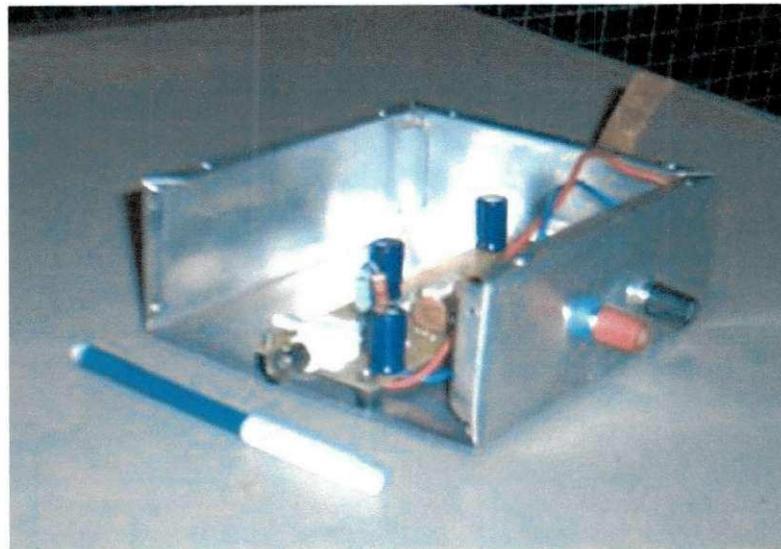


Figura 3.17- Fotografia do detector desenvolvido.

A) Amplificador de banda larga

O amplificador tem 4 estágios, como pode ser observado na Figura 3.18 (dentro da linha pontilhada). Os 3 primeiros são na configuração emissor comum e o último, na configuração coletor comum. Na Figura 3.18, é possível observar também o impedor de 50Ω em paralelo com o amplificador e uma proteção, G . A proteção deve ser utilizada porque se o capacitor de acoplamento sofrer alguma avaria, a alta tensão será desviada para a terra.

Maiores detalhes sobre amplificadores a transistor podem ser obtidos em Millman e Halkias (1981), e em Sedra e Smith (2000).

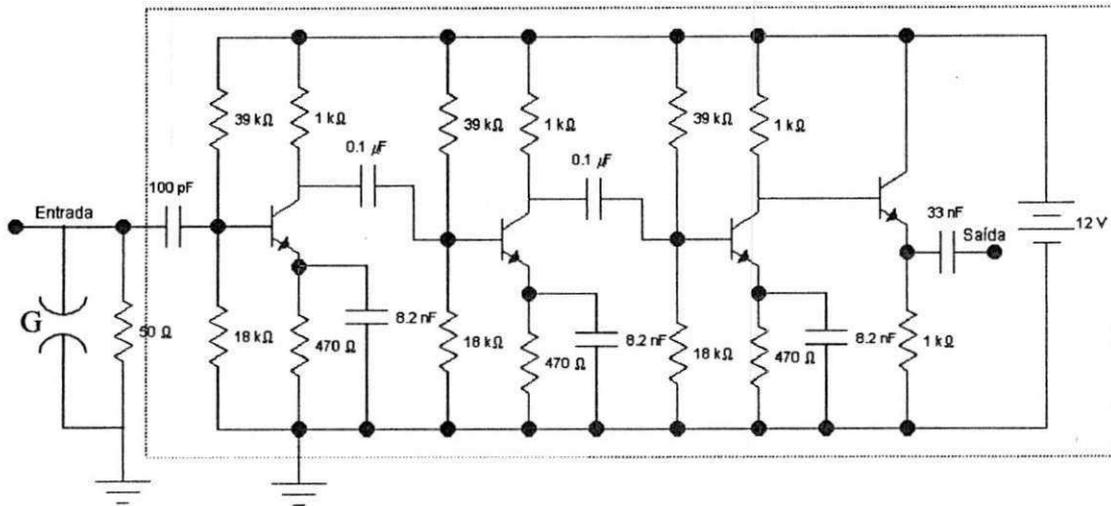


Figura 3.18– Circuito com impedor e amplificador de 4 estágios.

Cada um dos 3 primeiros estágios do amplificador tem um ganho de aproximadamente 30. O último estágio é um casador de impedância e tem um ganho de aproximadamente 1. O ganho total medido foi de aproximadamente 10 000. A impedância de entrada é de 580 Ω e a de saída de 7 Ω .

O circuito funciona como amplificador passa-alta, cuja frequência de corte é dada por $\frac{1}{2\pi C_i R_i}$, com $C_i = 100$ pC e $R_i = 580$ Ω , tem-se $f_c = 2,75$ MHz, que é satisfatório para a aplicação desejada. A faixa de passagem é de aproximadamente de 50 MHz.

As dificuldades para a realização dos ensaios com o amplificador já se fazem presentes na etapa inicial. Com os componentes ainda montados em uma placa protoboard, os ensaios foram prejudicados devido às capacitâncias parasitas, presentes quando se utilizou sinal de altas frequências.

A confecção do amplificador em placa de circuito seguiu rigorosamente as técnicas adotadas para circuitos de alta frequência. As trilhas compridas formam indutâncias parasitas e trilhas próximas formam capacitâncias parasitas. Como as indutâncias e capacitâncias parasitas afetam o funcionamento de circuitos de altas frequências, utilizaram-se blindagens em alguns casos e trilhas curtas para os sinais. As curvas acentuadas foram

ser evitadas, pois uma curva em 90 graus significa uma bobina de 1/4 de espira com uma indutância que pode afetar sensivelmente um circuito de alta frequência.

O gerador utilizado nos ensaios foi da Tektronix, modelo TM503B. A menor amplitude da senóide gerada é de 10 mV, com variação de frequência entre 400 kHz à 200 MHz. A limitação do gerador em relação à amplitude do sinal restringiu os ensaios com o amplificador a ensaios individualizados por estágios. Com 10 mV e considerando um ganho total de 10 000, a tensão de saída seria de 100 V, o que satura o amplificador.

Para superar estas dificuldades houve a simulação do amplificador no programa PSpice® com o objetivo de analisar o comportamento do amplificador como um todo, e conseqüentemente complementar os resultados obtidos nos ensaios práticos realizados. Por não fazer parte da biblioteca padrão do programa PSpice®, as principais características do transistor utilizado (BFR90) no amplificador foram introduzidas.

B) Procedimentos de ensaios e processamento dos sinais

Todos os ensaios foram realizados na sala blindada eletromagneticamente do LAT/DEE/UFCG. Os procedimentos de proteção e ensaios são idênticos aos descritos na secção 3.2.1. Como no circuito projetado não se quantifica o sinal de descarga parcial, não é necessário executar o ensaio de calibração.

Os ensaios realizados apresentam como variáveis o nível de tensão aplicada ao objeto de ensaio e o tempo de aplicação da tensão. O tempo de amostragem foi 600 ns e com 32 768 pontos. Para o processamento dos sinais também foi utilizada o ToolBox Wavelet do MATLAB®..

3.3.3 Ensaios para caracterização do sistema de detecção e medição de descargas parciais existentes no LAT/DEE/UFMG

Entre a realização dos ensaios de geração, detecção e medição de descargas parciais com o detector comercial e com o projetado, foram realizados ensaios para a caracterização do sistema. O circuito utilizado foi o mesmo descrito na secção 3.3.1.

Como dito na secção 3.3.1, os valores das impedâncias do detector são: 3.3 k Ω , 1 k Ω , 333 Ω , 100 Ω , 33 Ω e 10 Ω , e se encontram dentro do conjunto ponte/medidor de descargas parciais do LAT. Entretanto as impedâncias podem ser acessadas diretamente. Foram realizados ensaios de geração e detecção de sinais de descargas parciais para a caracterização do circuito de detecção existente. Sendo assim, os sinais foram detectados em pontos estratégicos e acessíveis externamente, do detector comercial. Os pontos estratégicos podem ser visto no diagrama simplificado do detector (linha pontilhada), mostrado na Figura 3.19. A conexão entre a impedância e a bobina é feita externamente com um cabo coaxial. As medições realizadas no ponto 1 foram feitas com a impedância desconexa do resto do circuito, e com a impedância conectada. As medições realizadas no ponto 2 (após a amplificação) foram feitas com todos os componentes do circuito conectados. Como se procedeu na realização de ensaios de descargas parciais, a variável utilizada foi o nível de tensão da alimentação. Todos os ensaios foram realizados com as configurações 1 e 2.

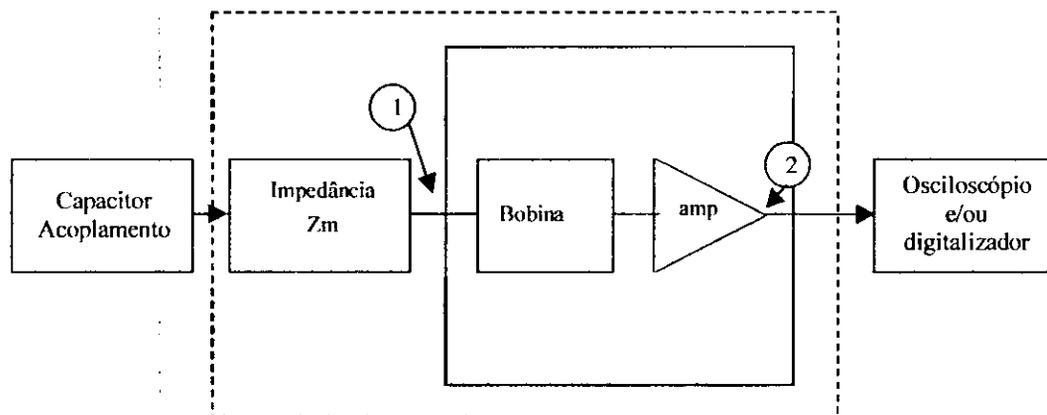


Figura 3.19- Diagrama de bloco simplificado do detector.

Outro ensaio realizado foi com o circuito composto apenas pelo objeto de teste, capacitor de acoplamento e impedor (Figura 3.20). Utilizou-se inicialmente como impedor as 3 primeiras impedâncias do detector comercial ($3,3\text{ k}\Omega$, $1\text{ k}\Omega$ e $333\ \Omega$); depois, um resistor de $50\ \Omega$. Não houve a geração de sinais de descargas parciais. A tensão de alimentação, V_e , era uma senóide com amplitude de 100 mV . A tensão foi fornecida pelo gerador de funções, cuja característica principal era de permitir a variação da frequência do sinal com valores entre 20 kHz e 20 MHz . O osciloscópio digital, descrito na secção 3.3.1 foi utilizado para realizar a medição da tensão de saída (V_s). O circuito composto é um filtro passa-alta, com uma frequência de corte inferior variando de acordo com os valores do impedores. Para os impedores utilizados, as frequências de corte inferior serão, respectivamente, 24 kHz , $79,6\text{ kHz}$, 240 kHz e $1,6\text{ MHz}$.

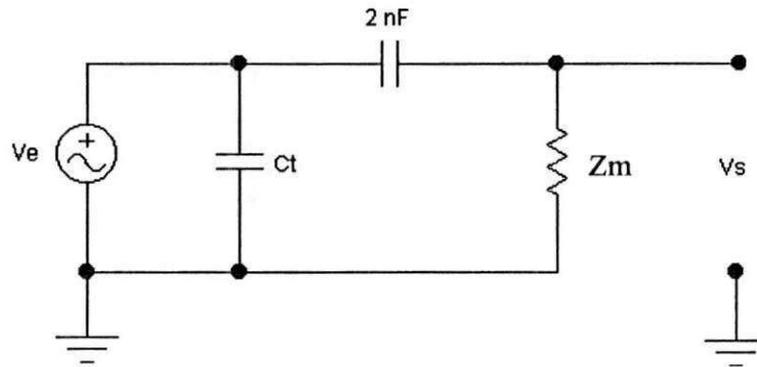


Figura 3.20- Circuito de um filtro passa-alta.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresentam-se os resultados, as análises e as discussões dos resultados obtidos dos ensaios com o amplificador de banda larga, e com o circuito para geração e detecção de descargas parciais. O objetivo é fornecer subsídios para solucionar os problemas relacionados com a detecção e medição de sinais de descargas parciais obtidos nos ensaios comerciais e nas pesquisas desenvolvidas no LAT/DEE/UFCG. Inicialmente são apresentadas as contribuições adquiridas com os ensaios para caracterizar o sistema de geração, detecção e medição de descargas parciais existente. Depois são apresentados os resultados obtidos com a simulação do amplificador de banda larga utilizando o programa PSpice®. Finalmente, são apresentados os resultados, para cada configuração, que validam o circuito de detecção de descargas parciais projetado. As análises são feitas após a exposição dos resultados.

4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Para caracterizar o comportamento do circuito nas medições de corona e descargas parciais, foram realizados ensaios de geração, detecção e medição de sinais de descargas parciais, sendo o sinal detectado nos pontos 1 e 2 (Figura 3.19). Os ensaios foram realizados utilizando-se, inicialmente, os três primeiros impedores do detector. Os impedores estão

descritos na secção 3.2.1. Devido à semelhança na forma do sinal adquirido, será mostrado apenas um dos sinais detectados.

A configuração 1 foi montada e uma tensão de 7 kV foi suficiente para provocar o sinal de corona desejado. Na Figura 4.1 mostra-se o sinal adquirido no ponto 1 do diagrama mostrado na Figura 3.19, ou seja, após o impedor de medição sem o detector conectado. Como pode ser visto na Figura 3.19, o sinal apresenta-se com distorção e não é possível visualizar e identificar o sinal de corona. Contudo, o sinal de corona continua visível através do osciloscópio.

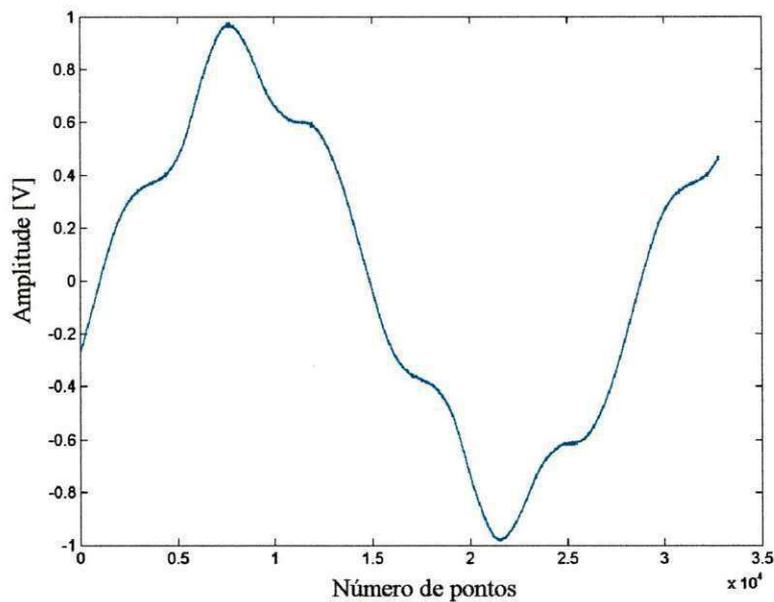


Figura 4.1- Sinal de corona medido no ponto 1, com o amplificador desconectado.

Utilizando-se a mesma configuração e mesma tensão, o impedor foi conectado ao amplificador, através do cabo coaxial. O sinal foi também medido no ponto 1. Agora o impedor está “casado” com o amplificador e as distorções desaparecem, conforme pode ser visto na Figura 4.2.

Na Figura 4.3 mostra-se o mesmo sinal após a amplificação, medido no ponto 2. Agora, os sinais de corona são visíveis.

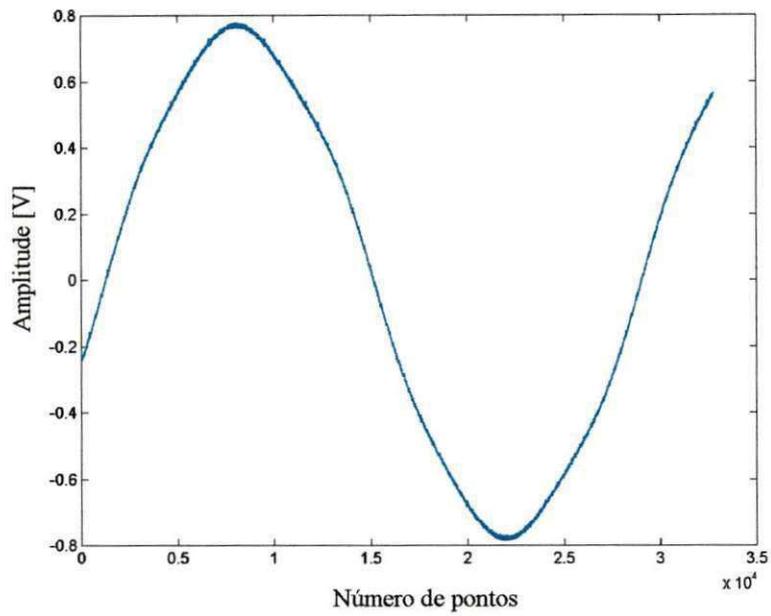


Figura 4.2- Sinal de corona medido no ponto 1, com o amplificador conectado.

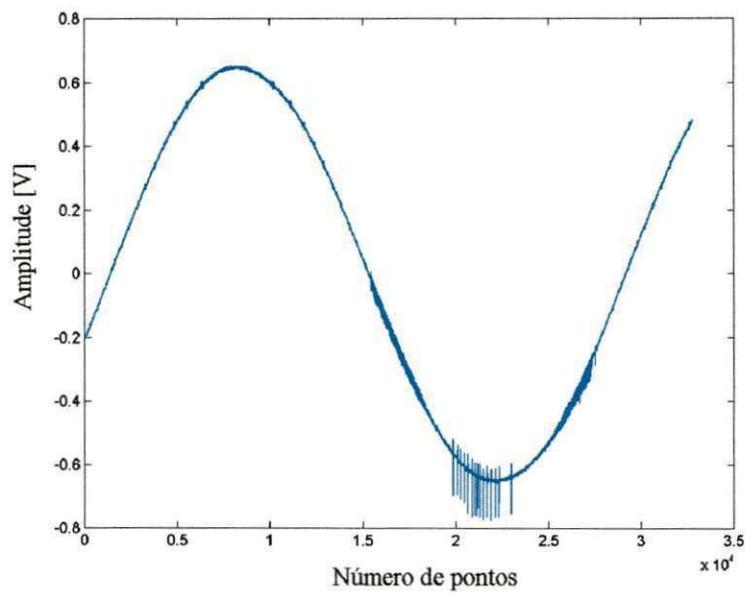


Figura 4.3- Sinal de corona medido no ponto 2.

As descargas parciais foram geradas com a configuração 2 (Figura 3.3). O valor da tensão capaz de gerar o sinal de descarga parcial desejado foi de 15,8 kV. As mesmas situações ocorridas com o sinal de corona foram comprovadas com o sinal de descargas parcial. As Figuras 4.4 a 4.6 representam as curvas obtidas nos pontos 1 e 2, para os sinais de descargas parciais.

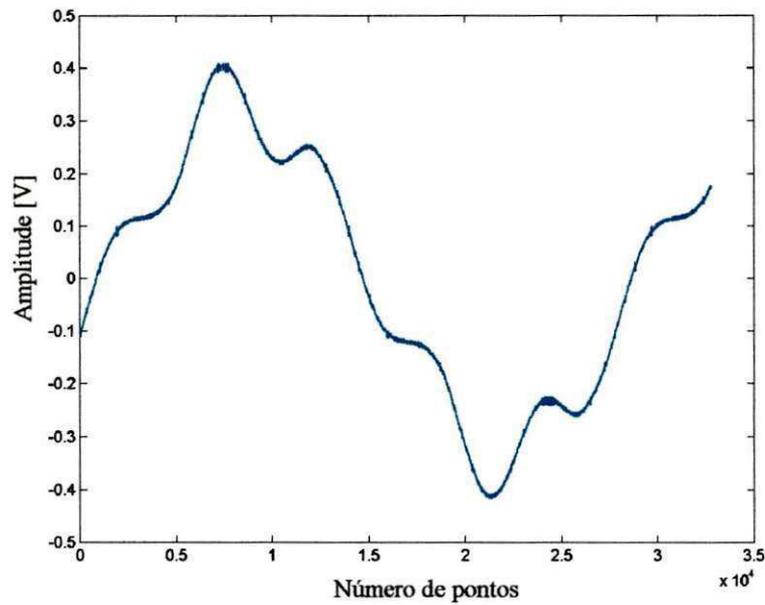


Figura 4.4– Sinal de descarga parcial medido no ponto 1, sem o amplificador conectado.

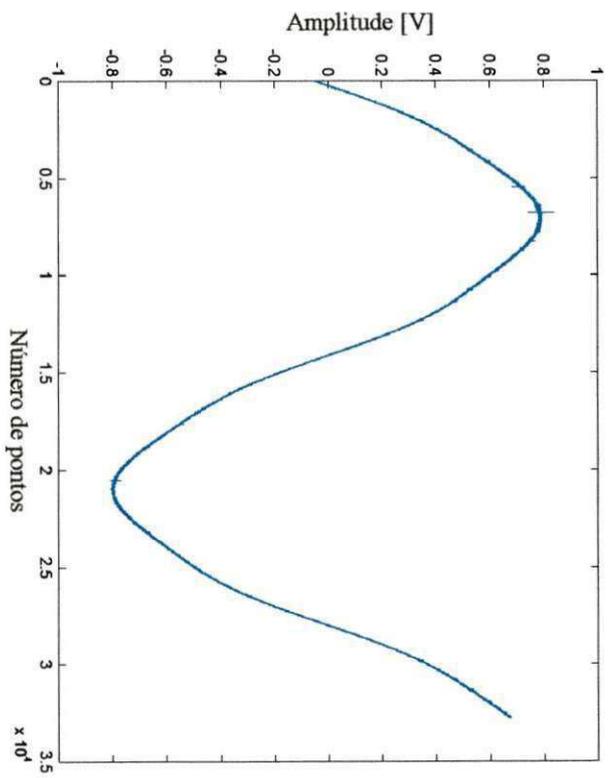


Figura 4.5- Sinal de descarga parcial medido no ponto 1, com o amplificador conectado.

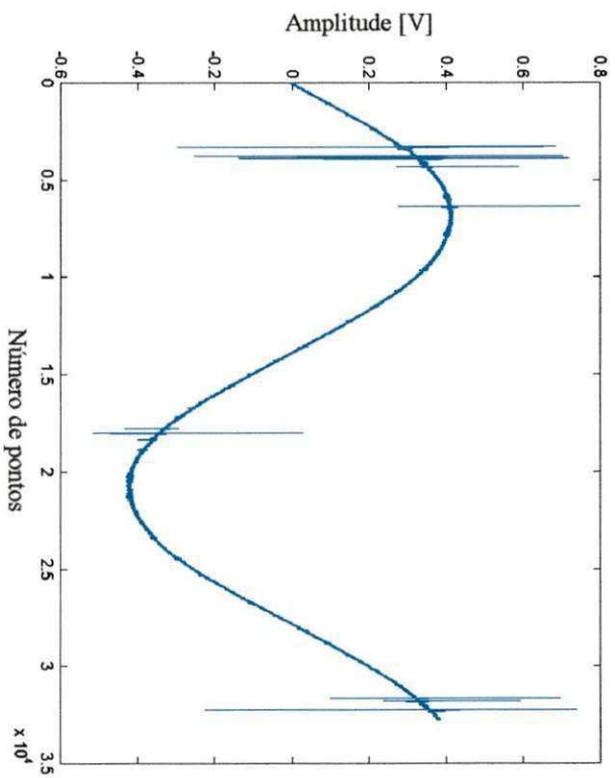


Figura 4.6- Sinal de descarga parcial no ponto 2.

Um outro arranjo foi montado com objetivo de se determinar a função de transferência do circuito de detecção de descargas parciais. O capacitor de acoplamento e as impedâncias Z_{m1} , Z_{m2} e Z_{m3} do detector comercial formam circuitos RC (Figura 3.20). O circuito foi alimentado com uma tensão de 100 mV. Variando os valores das impedâncias Z_m e da frequência (20 kHz a 20 MHz), os valores da tensão sobre as resistências foram medidos. As curvas que representam a tensão sobre os impedores podem ser vista na Figura 4.7. O circuito não se comportou como um filtro passa-alta para toda o espectro de frequência utilizado.

Ensaio de Caracterização 1

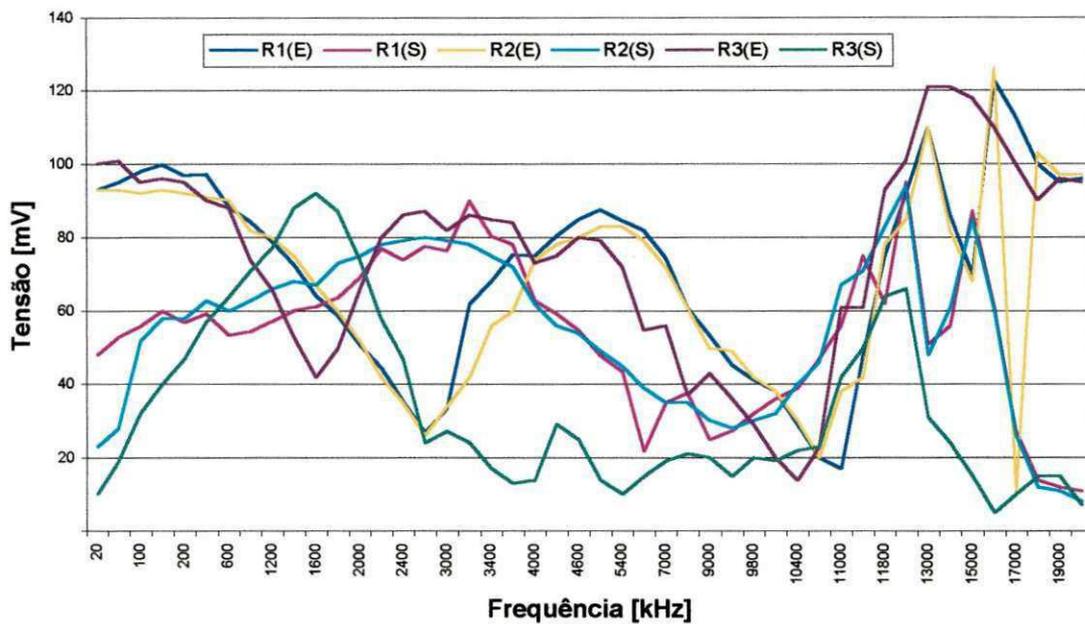


Figura 4.7– Resposta em frequência do arranjo de detecção convencional.

Como pode se observar a partir da frequência de 11 Mhz, foi detectado ressonâncias, que podem ter sido inseridas pelos cabos coaxiais. Utilizando-se cabos que apresentam menores valores de atenuação em altas frequências, o resultado obtido pode ser observado na Figura 4.8.

Ensaio de Caracterização 2

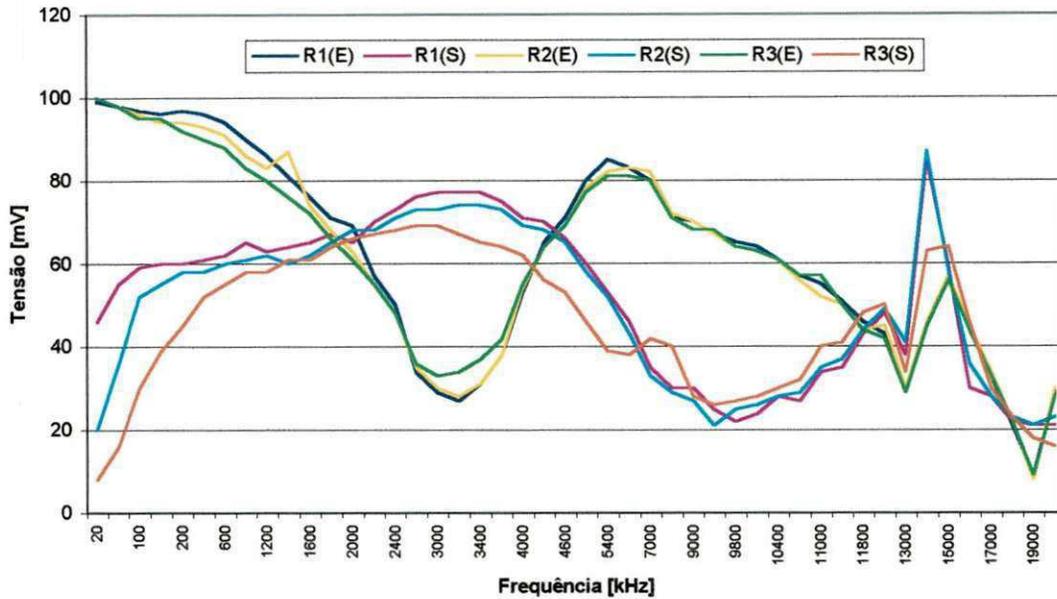


Figura 4.8- Resposta em frequência do arranjo de detecção convencional.

A substituição dos cabos de conexão propiciou uma melhor resposta ao sinal aplicado para frequências inferiores a 13 MHz. Entretanto, para valores maiores que 13 MHz, a resposta ainda é insatisfatória. Na tentativa de elucidar a situação, outras medições foram realizadas com modificações no arranjo do circuito. Primeiramente, os componentes do circuito foram aproximados, isto é, distribuídos espacialmente de tal forma que ficassem bem próximos uns dos outros. Assim os problemas que pudessem ter sido causados pelos cabos coaxiais seriam eliminados. O impedor de medição passou a ser um resistor de carbono de 50 Ω , inserido diretamente após o capacitor de acoplamento. Os equipamentos, tanto de alimentação como de medição, foram aproximados aos componentes do circuito. Dentre os arranjos testados, foi feita uma inspeção no capacitor de acoplamento, para averiguar possíveis avarias. Também foi realizada a substituição do capacitor de acoplamento por capacitores adequados à alta tensão e imune a descargas parciais. Apesar

de todas estas modificações, o circuito completo não se comportava como um filtro passa-alta de boa qualidade.

Contudo, a realização dos ensaios de caracterização do circuito de geração, detecção e medição existente no LAT, trouxeram contribuições importantes. São elas:

- Os cabos coaxiais utilizados, apesar do seu comprimento máximo não ultrapassar 5 m, estavam inserindo uma atenuação que deveria ser considerada. Sendo assim, os cabos existente tipo RG-58 foram substituídos pelo RGC-58 que apresentam menor atenuação;
- O sinal de descarga parcial tem uma amplitude muito pequena, e para se conseguir observá-lo, em osciloscópio, por exemplo, estima-se que será necessária a sua ampliação de no mínimo 10 000;
- Devido à quantidade de ensaios realizados, à necessidade de agilidade na aquisição dos sinais, que poderiam se modificar com o tempo, e a automação da aquisição dos sinais, uma nova rotina do programa IBIC foi implementada;
- A sala blindada eletromagneticamente, onde os ensaios foram realizados, não se apresenta atualmente com suas características padrão. Conseqüentemente, os resultados das medições de dados dos sinais de descargas são adquiridos com um ruído de fundo.

4.3 ENSAIOS COM O AMPLIFICADOR

A limitação da fonte de alimentação em gerar sinais com amplitudes muito pequenas restringiu os ensaios aos estágios do amplificador individualmente. Nos resultados obtidos a amplificação máxima do sinal encontrava-se entre as freqüências de 5 e 10 MHz. Após 10 MHz acontecia uma queda no ganho, retomando o crescimento após 20 MHz, mas não atingindo o seu valor máximo. Em freqüências menores que 400 kHz e maiores que 50 MHz, o sinal apresentava uma atenuação considerada. As pontas de provas utilizadas nos ensaios não apresentavam uma boa resposta em altas freqüências, e isto influenciava diretamente nos resultados obtidos durante os ensaios. Assim, as limitações dos

equipamentos utilizados não possibilitaram a confecção das curvas características do amplificador projetado e implementado.

A simulação do circuito através do programa PSpice® foi necessária e fundamental para a concretização dos resultados obtidos com o ensaio prático, assim como para uma melhor caracterização do amplificador. O Diagrama de Bode, obtido nos ensaios realizados através de simulação, está representado na Figura 4.9. Nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 estão representadas as respostas em frequência do amplificador para uma alimentação senoidal de 0,1 mV, e frequências de 1 MHz, 2,75 MHz e 50 MHz, respectivamente. Na Figura 4.13 está representada a resposta em frequência para uma tensão de alimentação senoidal de 10 mV e frequência de 2,75 MHz.

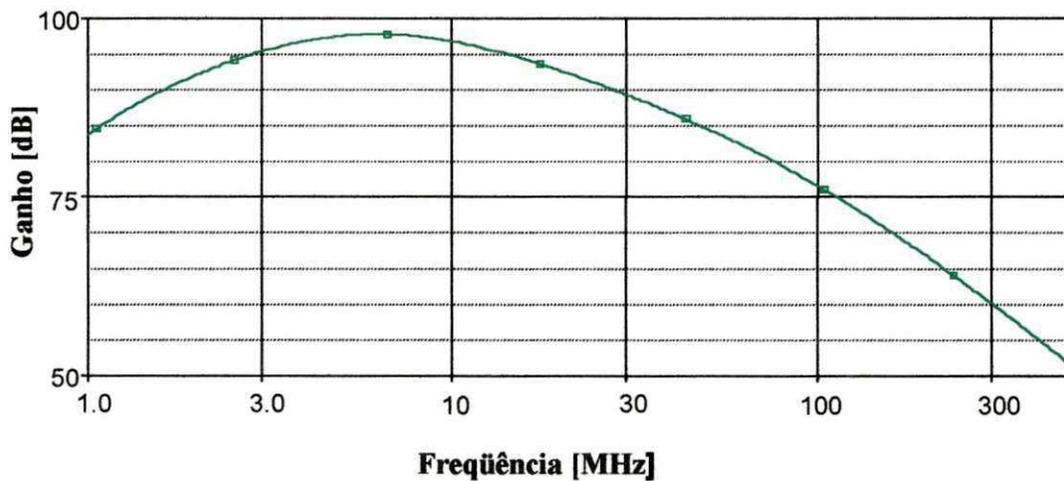


Figura 4.9 – Diagrama de Bode do amplificador.

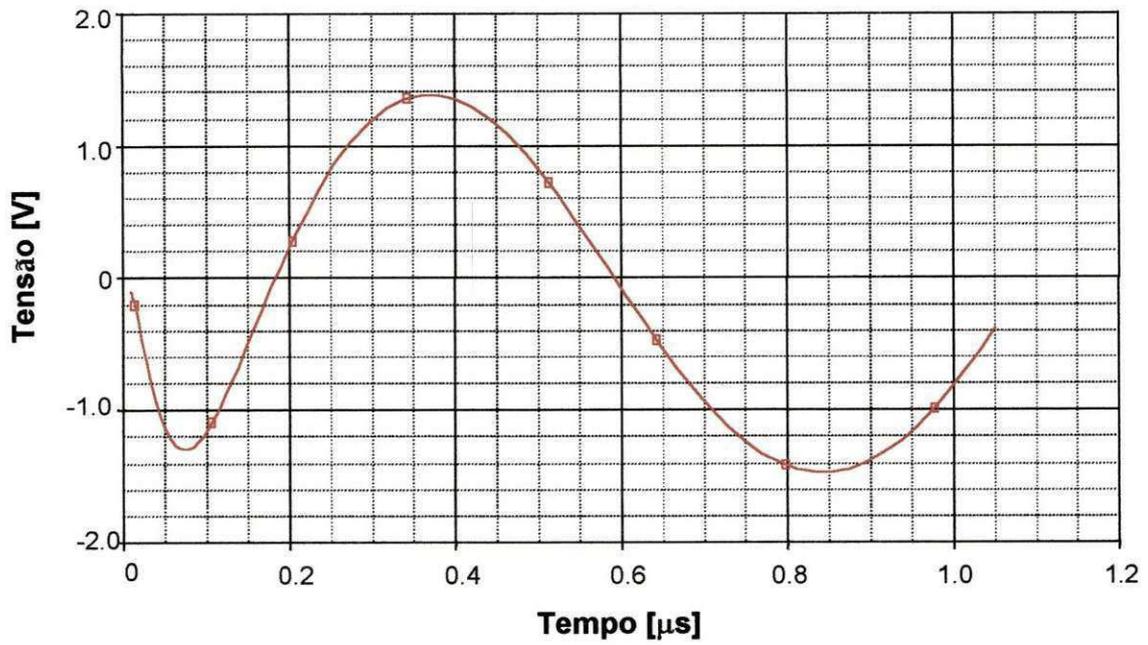


Figura 4.10 – Resposta em frequência do amplificador para uma alimentação de 0,1 mV/1 MHz

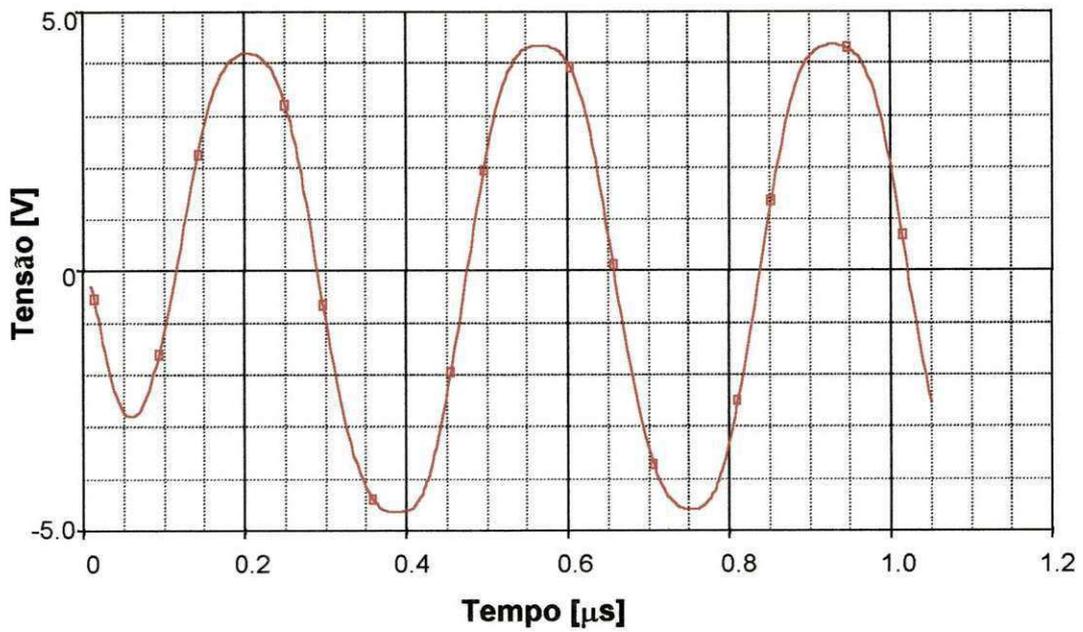


Figura 4.11 - Resposta em frequência do amplificador para uma alimentação de 0,1 mV/2,75 MHz

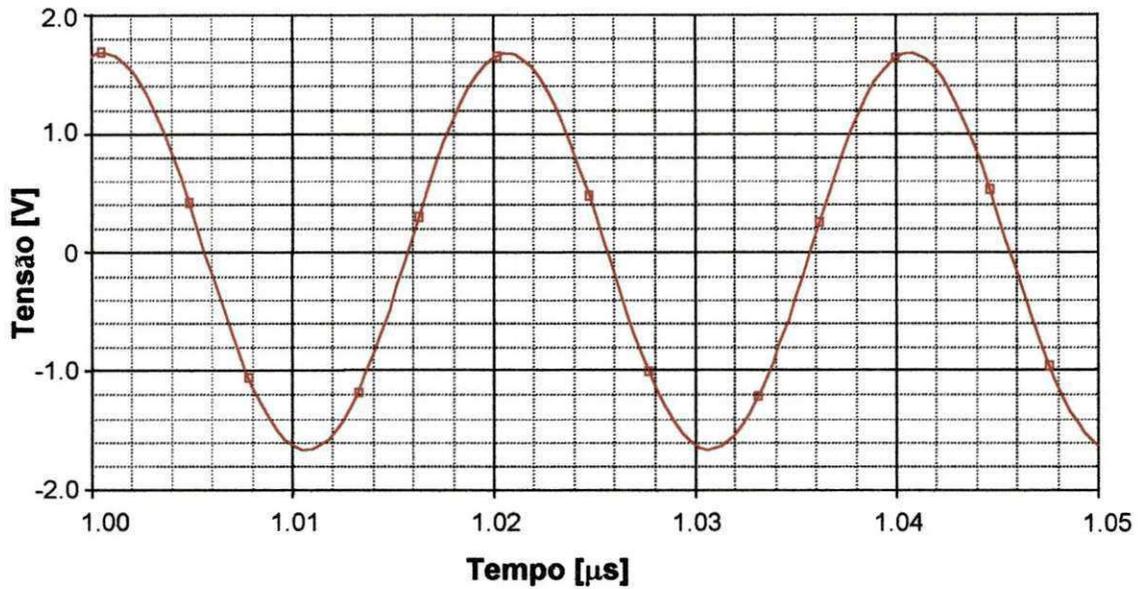


Figura 4.12 - Resposta em frequência do amplificador para uma alimentação de 0,1 mV/50 MHz

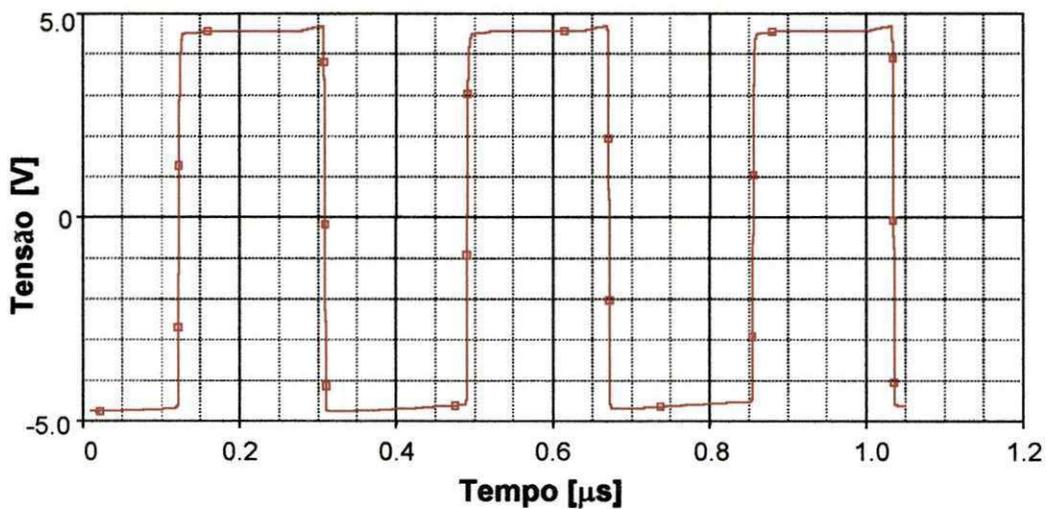


Figura 4.13 - Resposta em frequência do amplificador para uma alimentação de 10 mV/2,75 MHz

O Diagrama de Bode do amplificador obtido com a simulação corresponde ao desejado, apresentando uma frequência de corte inferior próximo a 3 MHz, e uma faixa de passagem de quase 40 MHz. Outro fato observado é a não linearidade na faixa de passagem, o que também ocorre na prática. Esta situação pode ser melhorada, ou seja, pode-se obter

uma faixa mais constante fazendo uma realimentação entre o último e primeiro estágio do amplificador.

Devido ao ganho muito alto do amplificador, para que a saída não seja saturada e o sinal devidamente amplificado, é necessário que o sinal de entrada seja muito pequeno. As Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 corroboram com esta afirmação.

4.4 ENSAIOS DE GERAÇÃO, DETECÇÃO E MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

Foram montadas dos arranjos para geração, detecção e medição de descargas parciais. O primeiro arranjo utilizado é o convencional ou comercial, descrito na secção 3.3.1. O segundo arranjo utiliza o circuito de detecção desenvolvido (impedor mais amplificador), descrito na secção 3.3.2.

Nos ensaios realizados com o detector comercial, os sinais de descargas parciais (pulsos) são superpostos eletronicamente a uma senóide gerada pelo detector. A senóide tem freqüência industrial. Quando os sinais são captados pelo digitalizador as curvas representativas dos sinais de descargas parciais são mostradas sob a senóide.

Nos ensaios realizados com o detector desenvolvido, os sinais de descargas parciais (pulsos) não são superpostos. Os sinais de descargas parciais são superpostos matematicamente. O somatório dos sinais é realizado através de rotinas implementadas com o programa MATLAB®. Este procedimento matemático foi realizado para todos os dados obtidos nos ensaios, sejam eles originados dos ensaios de corona ou de descargas parciais. O osciloscópio digital utilizado também pode realizar a soma dos sinais de descargas parciais com a amostra da tensão de alimentação. A amostra da tensão de alimentação é obtida com o auxílio de um divisor resistivo (Figura 3.6 ou Figura 3.14). Os gráficos que representam os sinais têm, no eixo horizontal, a quantidade de pontos adquiridos, e no eixo vertical, a amplitude do sinal (em volts).

Utilizando-se o detector desenvolvido, sinais característicos de ruídos de alta freqüência são detectados no circuito de geração, detecção e medição de descargas parciais,

estando ou não energizado. O fato ocorre independente da configuração utilizada nos ensaios. A forma do ruído captado pode ser visto na Figura 4.14. O ruído permanece e está inserido em todos os ensaios, sejam de corona ou descargas parciais.

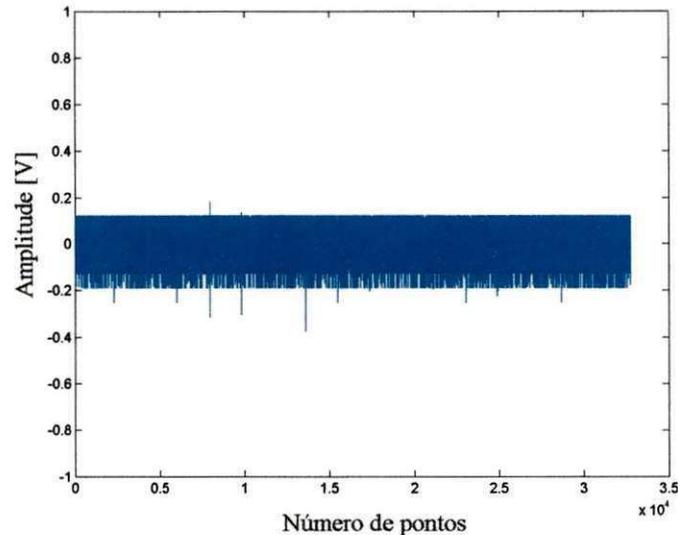


Figura 4.14- Ruído existente no circuito.

Com a finalidade de reduzir os ruídos, os sinais de descargas parciais e corona foram processados matematicamente, através do toolbox wavelet do programa MATLAB®. O toolbox utiliza para a redução de ruídos a técnica de *thesholding*, que é eficiente quando os pulsos de ruídos são de duração menor que os pulsos de descargas parciais (COSTA,2001). A decomposição wavelet dos sinais adquiridos (corona ou descargas parciais) é de 10 níveis, e a wavelet mãe utilizada foi a *daubechies 3*. A decomposição serve como assinatura do sinal, sendo que o sinal d_1 representa os detalhes de menor resolução do sinal s decomposto, d_{10} representa os detalhes da maior resolução, e a_{10} representa a aproximação do sinal decomposto na menor resolução.

4.3.1 Configuração 1

O primeiro ensaio realizado foi para a geração de corona, utilizando o arranjo pontaplano, com ponta em alta tensão. A geração de corona em ponta conectada a alta tensão é

utilizada como base para a identificação de todos os outros padrões de descargas parciais. No decorrer dos ensaios várias aquisições de dados foram realizadas, sendo aleatório o intervalo de tempo entre as aquisições. O sinal apresentado é um sinal típico, entre os vários medidos.

Um sinal característico de corona foi gerado com o nível de tensão de 6,9 kV (pico-a-pico) aplicado sobre o arranjo. Na Figura 4.15 pode ser visto o resultado do ensaio realizado com o detector comercial.

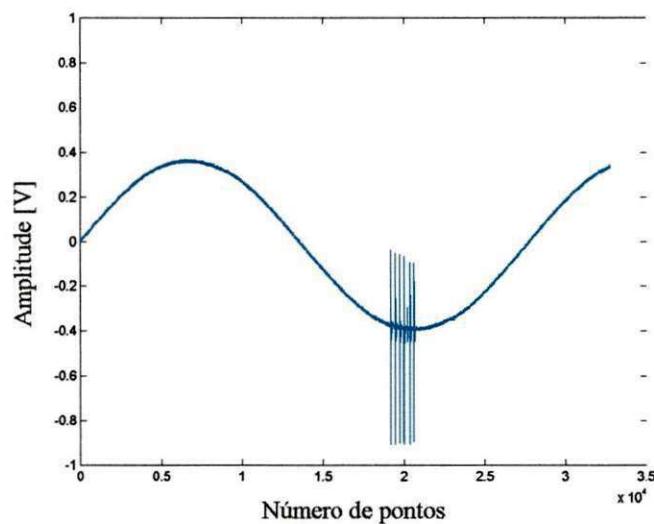


Figura 4.15- Sinal de corona obtido com a detector comercial.

Um sinal característico de corona foi gerado com o nível de tensão de 6,9 kV (pico-a-pico) aplicado sobre a configuração 1. Com o mesmo nível de tensão e utilizando o detector desenvolvido, o sinal de corona adquirido pode ser observado na Figura 4.16. Observando-se esta figura, é visível a presença do ruído. Na Figura 4.17 mostra-se o mesmo sinal de corona processado pelo toolbox wavelet do programa MATLAB®.

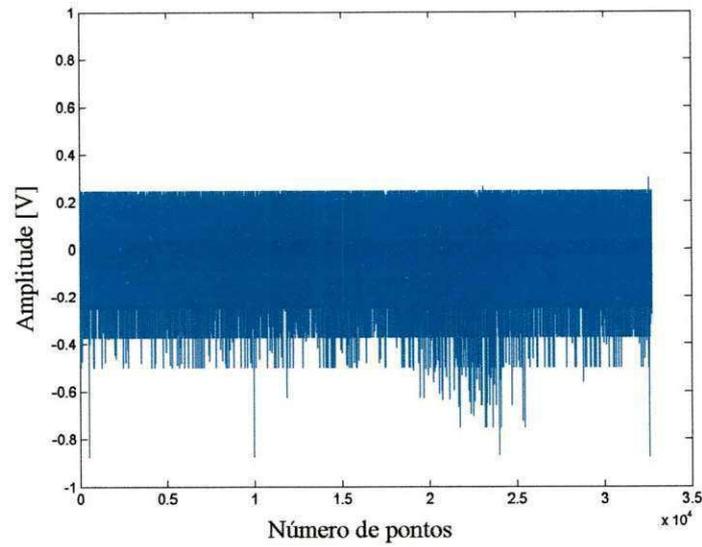


Figura 4.16- Sinal de corona obtido com o detector desenvolvido.

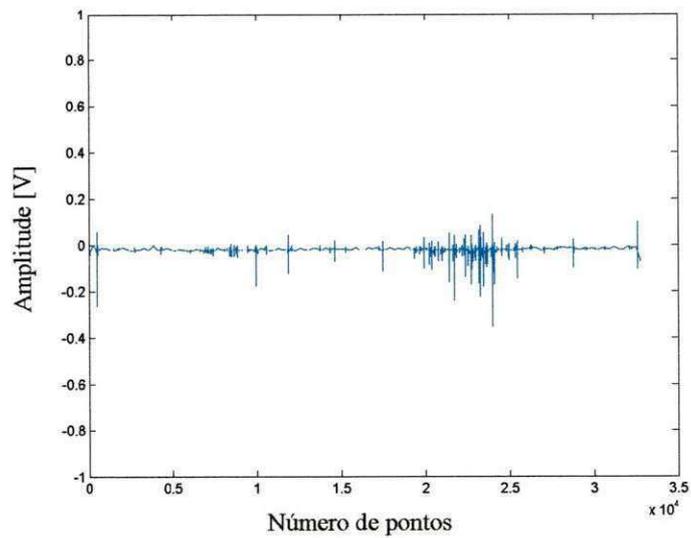


Figura 4.17- Sinal de corona processado.

Uma amostra do sinal da tensão de alimentação é apresentada na Figura 4.18. Na Figura 4.19 é mostrada a curva resultante do somatório do sinal de corona obtido com o detector desenvolvido (Figura 4.17) e a amostra do sinal da tensão de alimentação.

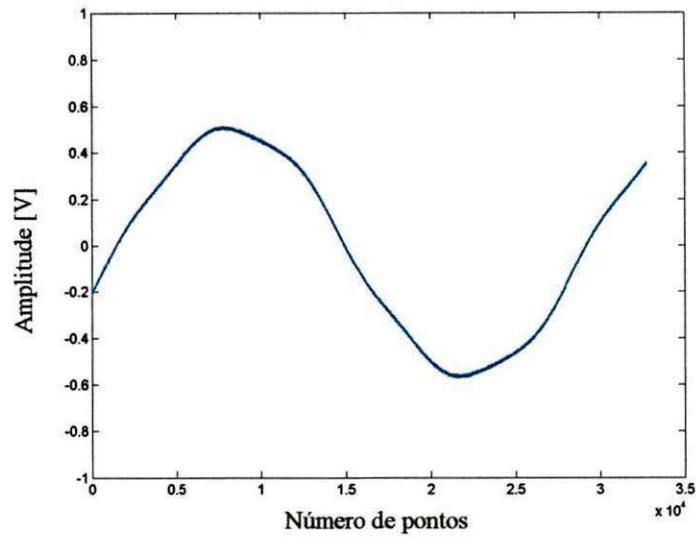


Figura 4.18- Sinal amostra da tensão aplicada sobre a configuração 1.

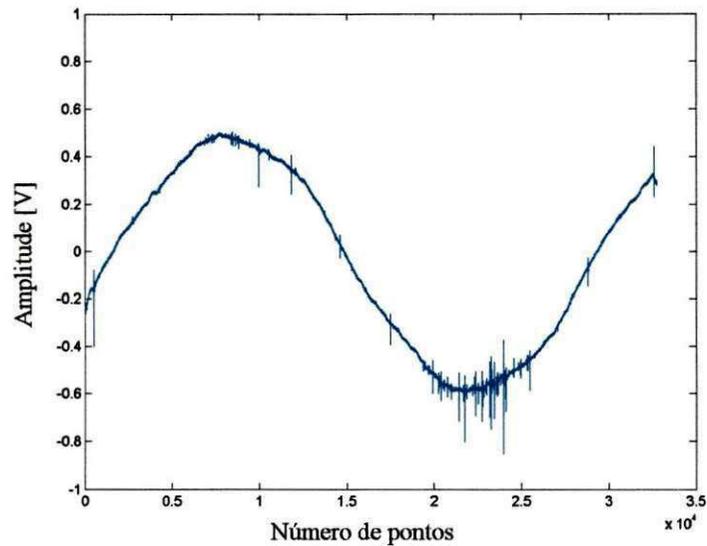


Figura 4.19- Sinal resultante da soma dos sinais das Figuras 4.17 e 4.18.

A decomposição wavelet em 10 níveis para o sinal de corona adquirido com o detector comercial, Figura 4.15, e com o detector desenvolvido, Figura 4.16, é mostrada nas Figura 4.20 e Figura 4.21, respectivamente.

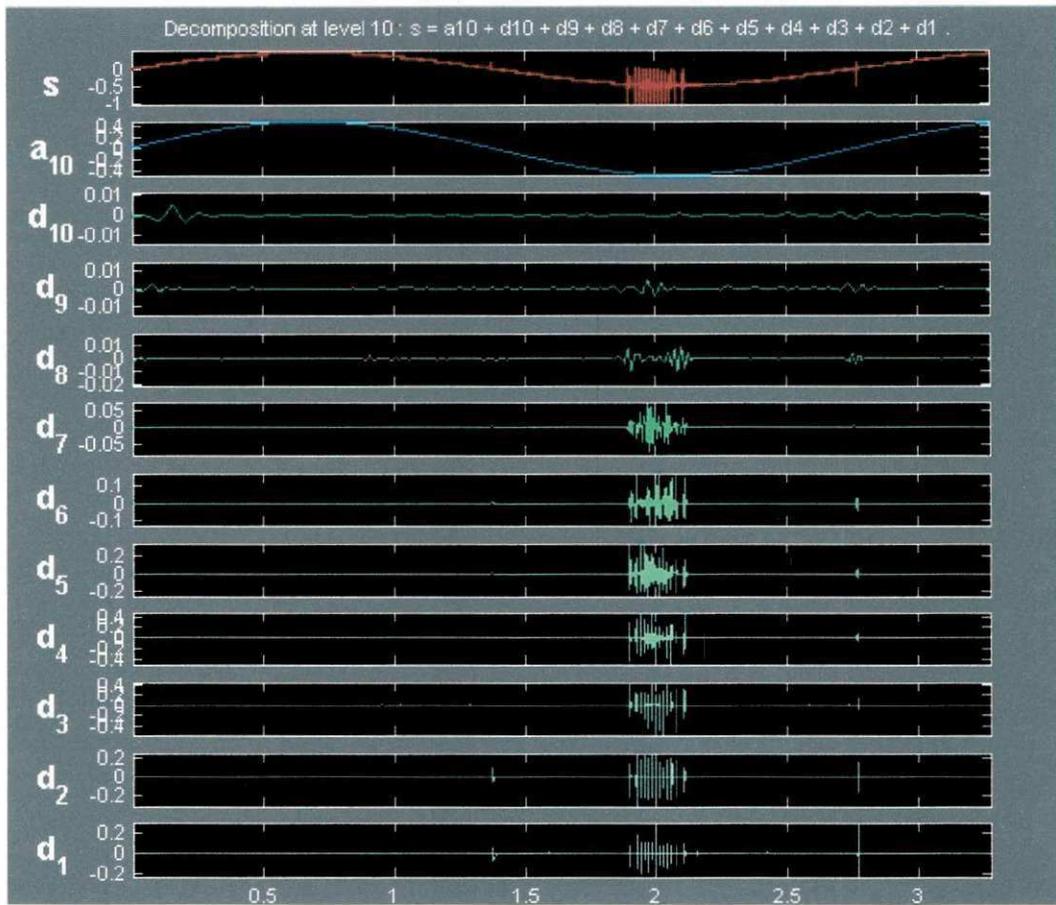


Figura 4.20- Decomposição wavelet para os sinais de corona obtidos com o detector comercial.

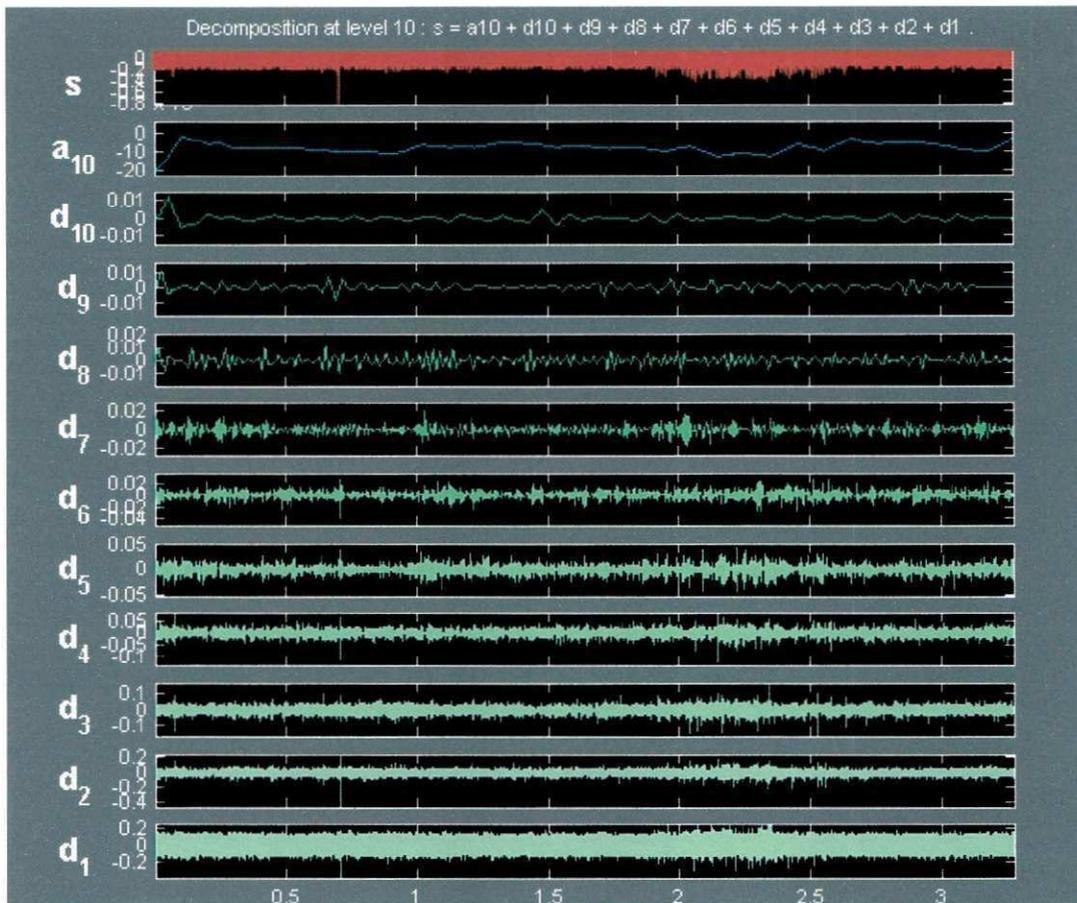


Figura 4.21- Decomposição wavelet para os sinais de corona obtidos com o detector desenvolvido.

4.3.2 Configuração 2

O segundo ensaio realizado foi para a geração de descargas parciais, utilizando uma amostra de polietileno. Nos os ensaios várias aquisições de dados foram realizadas, sendo aleatório o intervalo de tempo entre as aquisições. O sinal típico foi escolhido entre vários medidos. O nível de tensão aplicado foi de 14,4 kV de pico a pico, com nível de descargas, medido pelo detector comercial, de 180 pC.

A Figura 4.22 representa o sinal de descarga parcial adquirido com o detector comercial, e a Figura 4.23, a amostra da tensão de alimentação obtida pelo divisor resistivo.

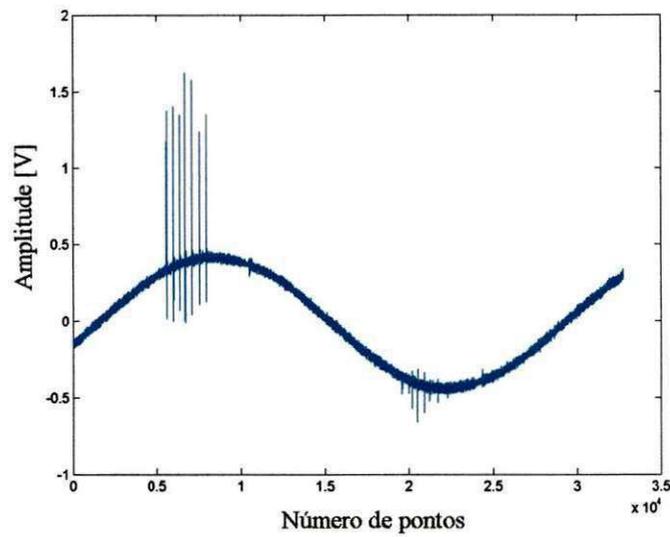


Figura 4.22- Sinal de descarga parcial obtido com a detector comercial.

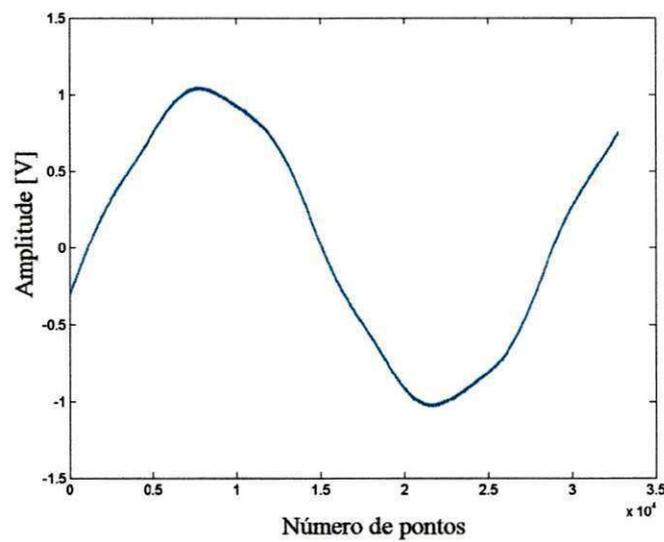


Figura 4.23-Sinal amostra da tensão aplicada sobre a configuração 2.

A Figura 4.24 representa o sinal de descarga parcial obtido após o amplificador, sem nenhum tratamento matemático, e Figura 4.25, o mesmo sinal após o tratamento matemático realizado com o ToolBox Wavelet do Matlab®.

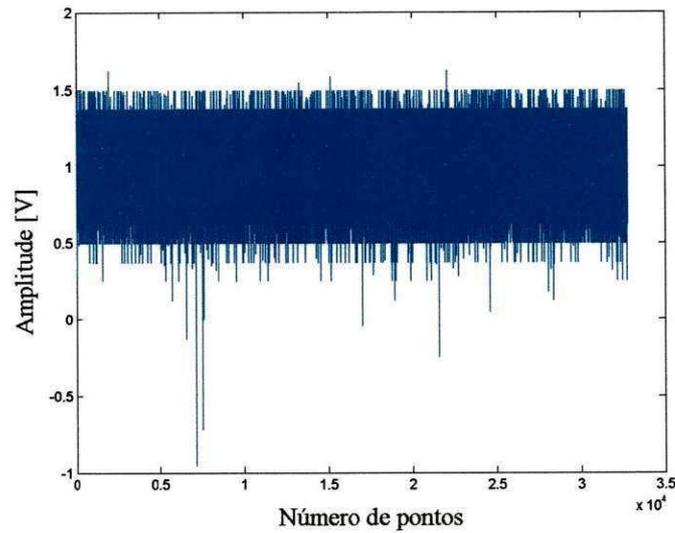


Figura 4.24- Sinal de descarga parcial obtido com o detector desenvolvido.

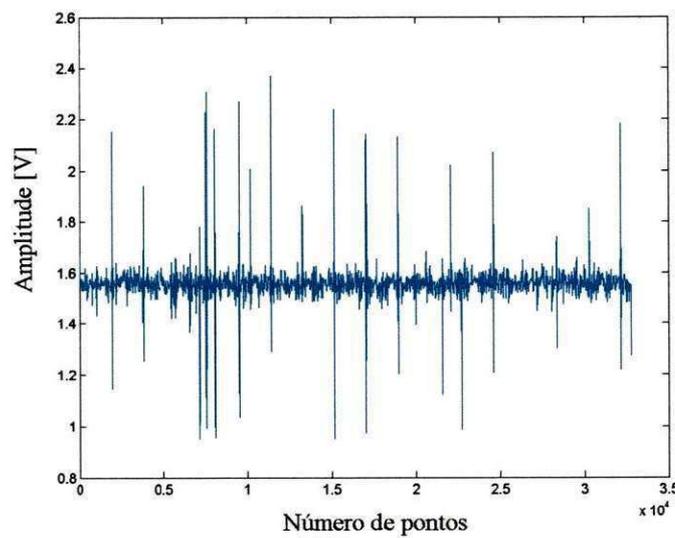


Figura 4.25- Sinal de descarga parcial processado.

Para se assemelhar ao sinal gerado pelo detector comercial que apresenta o sinal de descarga superposto a uma senóide, a Figura 4.26 representa a soma do sinal processado com a amostra da tensão de alimentação do circuito.

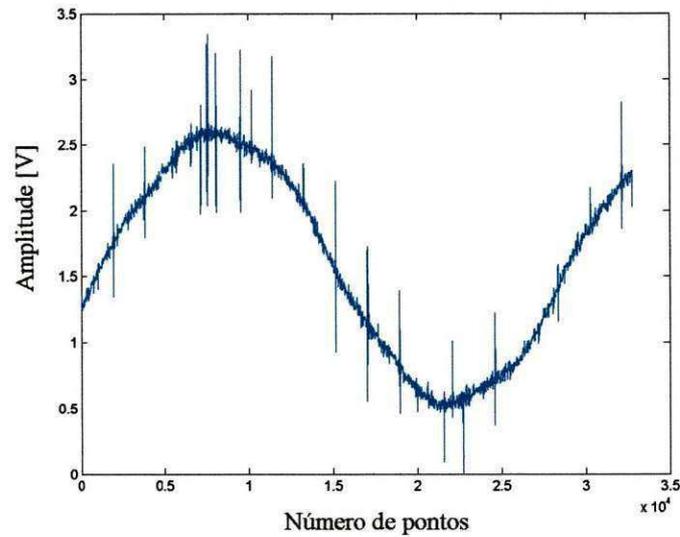


Figura 4.26- Sinal resultante da soma dos sinais das Figuras 4.23 e 4.25.

As decomposições wavelet em 10 níveis para o sinal de descarga parcial adquirido com o detector comercial (Figura 4.22) e com o detector desenvolvido (Figura 4.24) são mostradas nas Figura 4.27 e Figura 4.28, respectivamente. O sinal d_1 representa os detalhes de menor resolução do sinal s decomposto, e o d_{10} , os detalhes da maior resolução. O sinal a_{10} representa a aproximação do sinal decomposto na menor resolução.

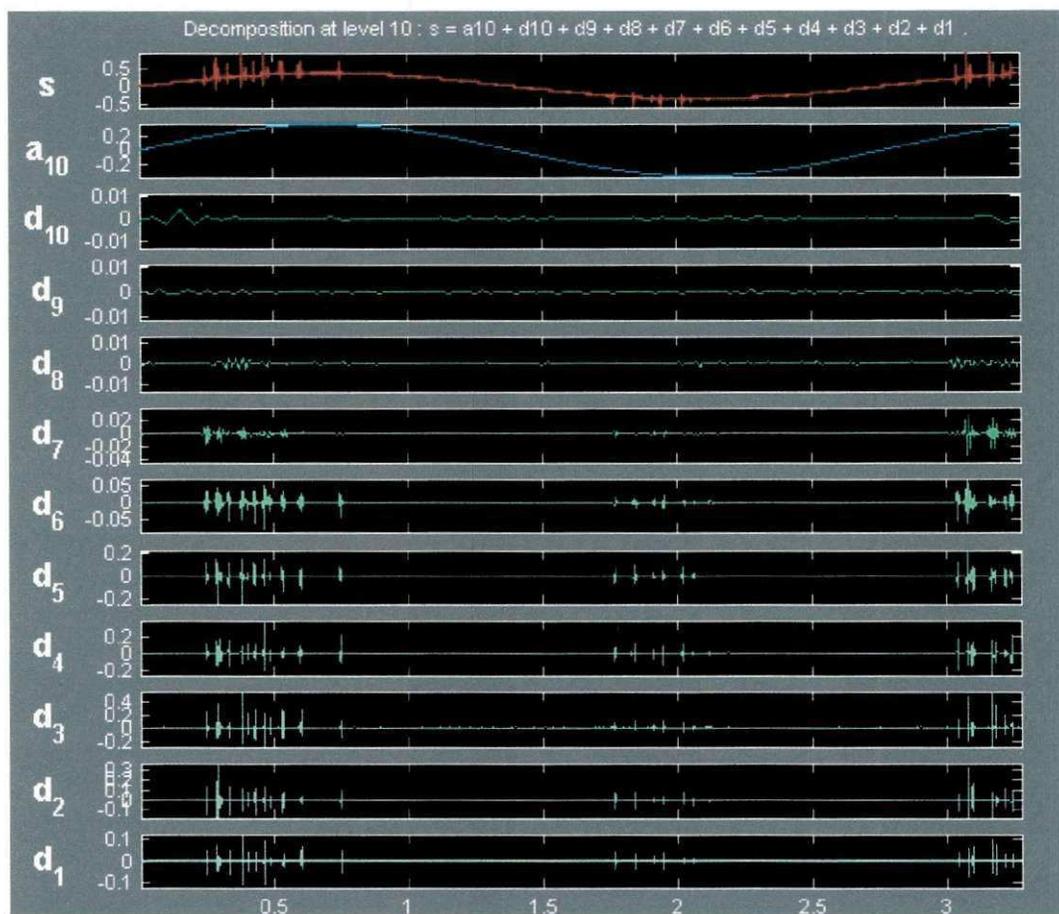


Figura 4.27- Decomposição wavelet para os sinais de descargas parciais (1) obtidos com o detector comercial.

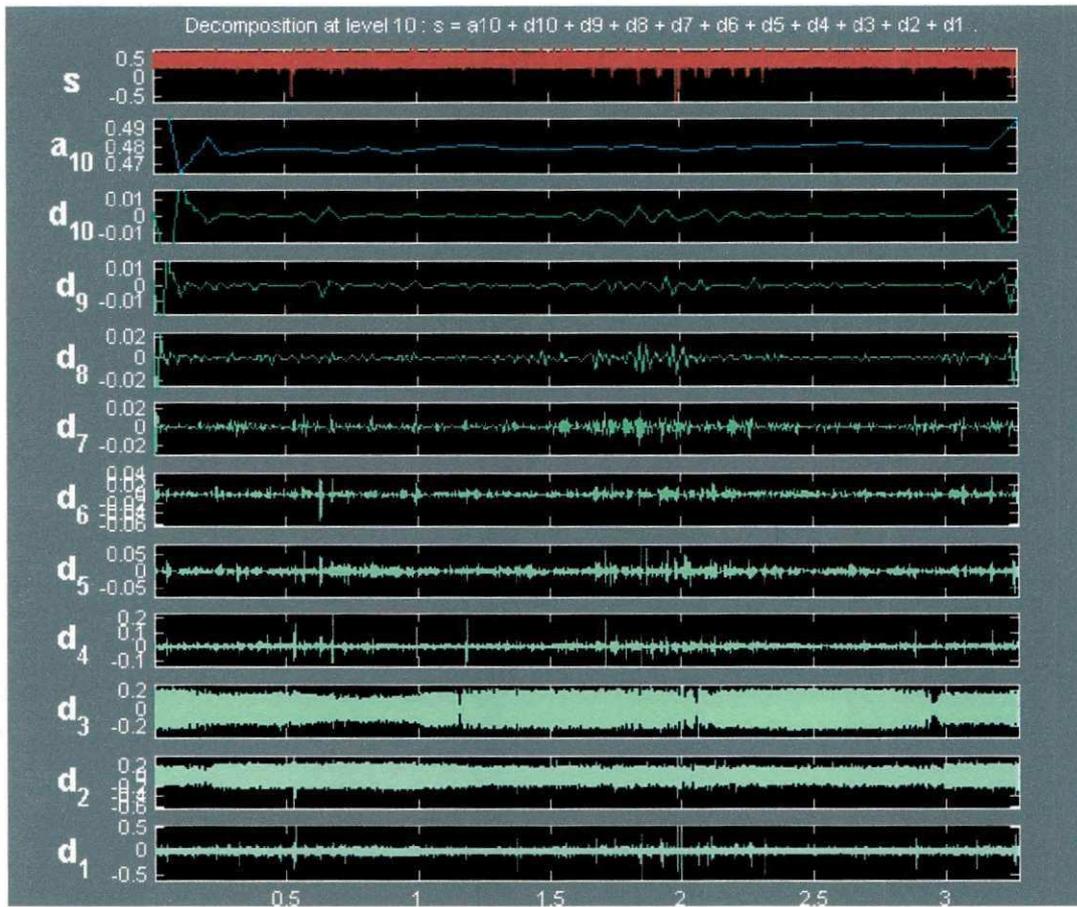


Figura 4.28- Decomposição wavelet para os sinais de descargas parciais (1) obtidos com o detector desenvolvido.

4.3.3 Configuração 3

As Figuras 4.24 a 4.30 representam os sinais de descargas parciais em uma amostra de acrílico adquiridos com o detector comercial e o projetado. O nível de tensão aplicado foi de 15,8 kV de pico a pico, com nível de descargas, medido pelo detector comercial, de 280 pC.

A Figura 4.29 representa o sinal de descarga parcial adquirido com o detector comercial e processado com o ToolBox Wavelet do MATLAB®, e a Figura 4.30, a amostra da tensão de alimentação obtida pelo divisor resistivo.

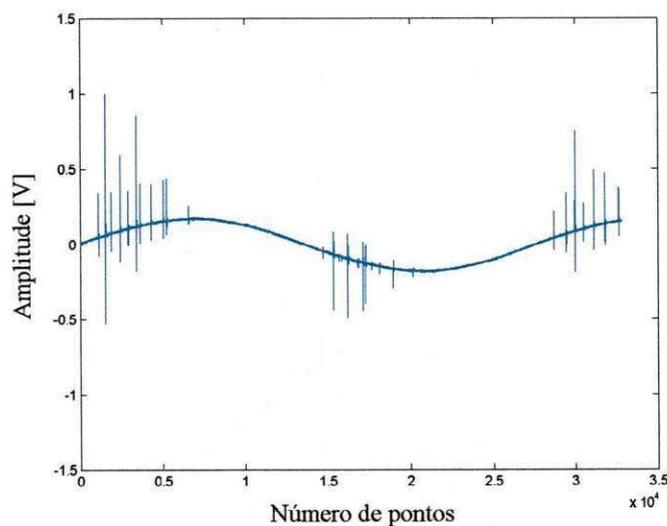


Figura 4.29- Sinal de descarga parcial obtido com a detector comercial.

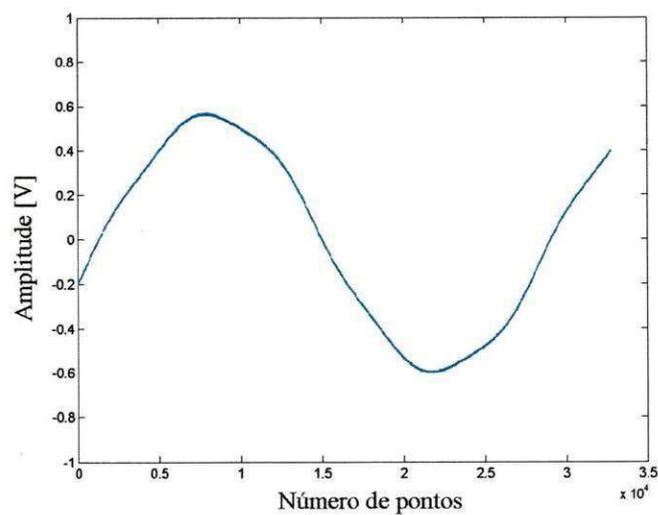


Figura 4.30- Sinal amostra da tensão aplicada sobre a configuração 3

A Figura 4.31 representa o sinal de descarga parcial obtido após o amplificador, sem nenhum tratamento matemático, e Figura 4.32, o mesmo sinal após o tratamento matemático realizado com o ToolBox Wavelet do MATLAB®.

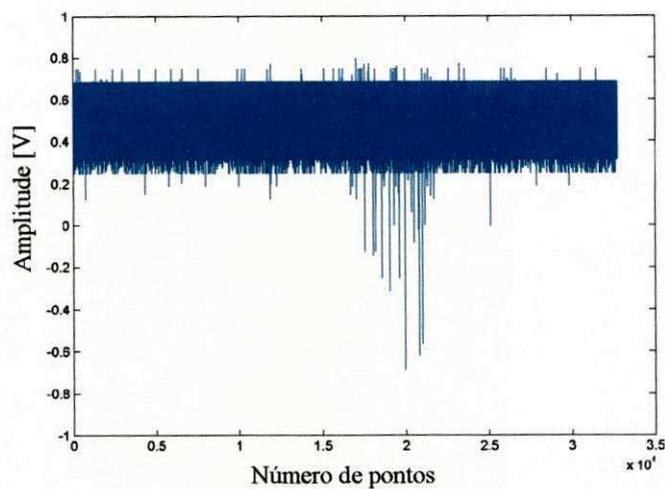


Figura 4.31- Sinal de descarga parcial obtido com o detector

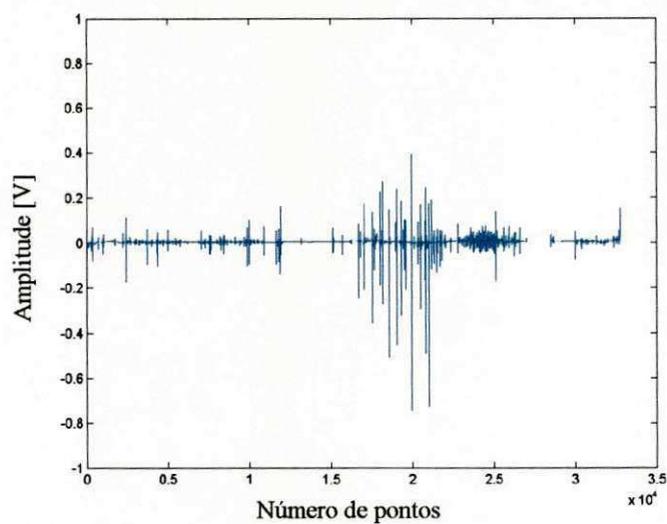


Figura 4.32- Sinal de descarga parcial processado.

A Figura 4.33 representa a soma do sinal de descarga parcial processado com a amostra da tensão de alimentação do circuito.

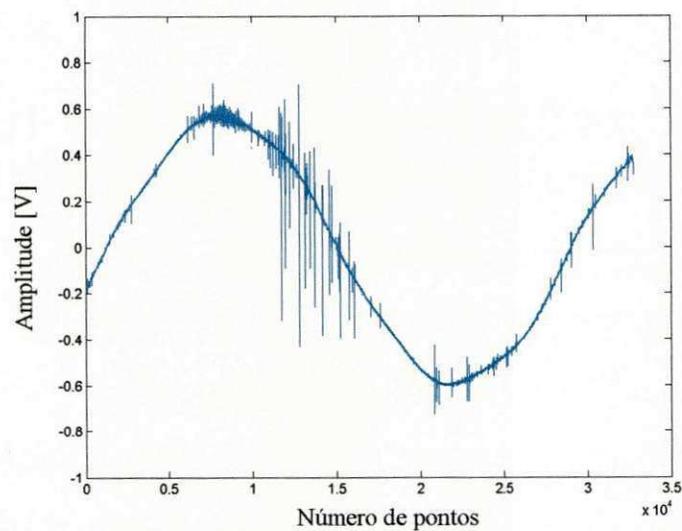


Figura 4.33- Sinal resultante da soma dos sinais das Figuras 4.30 e 4.32.

São mostradas nas Figura 4.34 e Figura 4.35, respectivamente, a decomposição wavelet em 10 níveis para o sinal de descarga parcial adquirido com o detector comercial Figura 4.29, e com o detector desenvolvido, Figura 4.32.

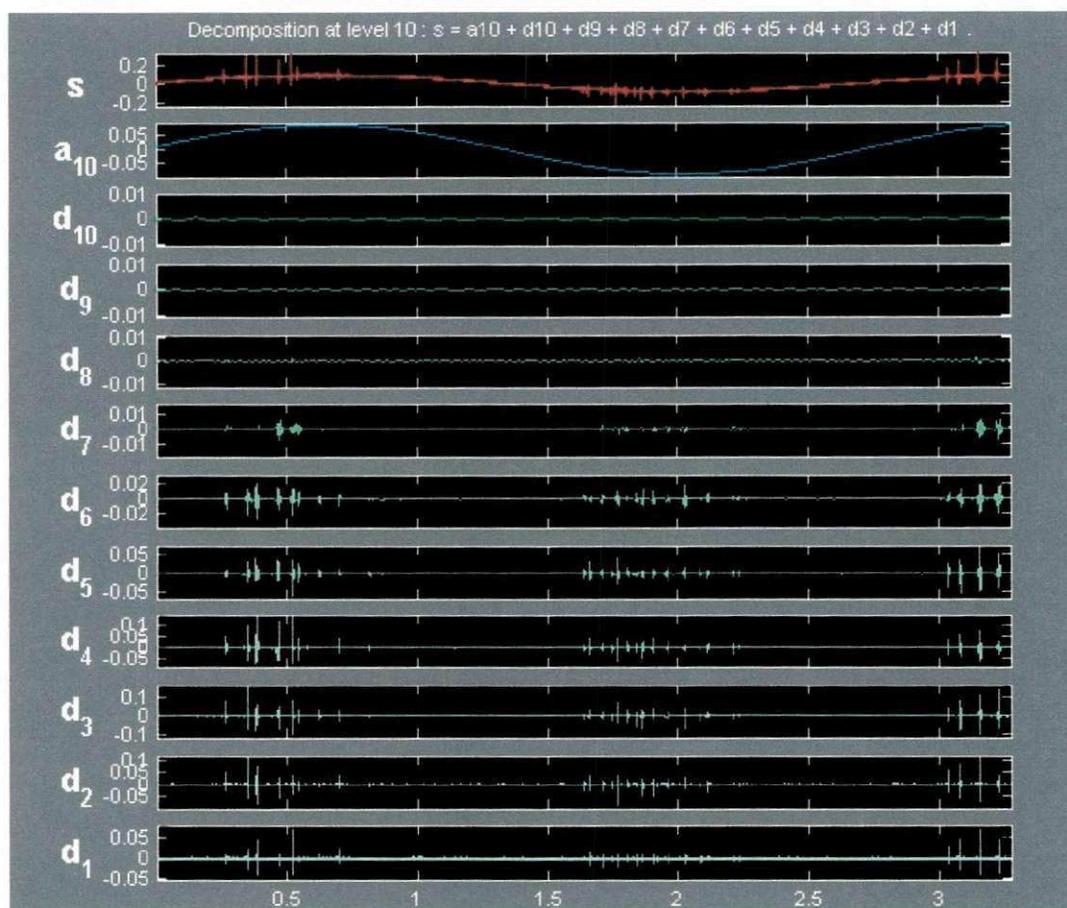


Figura 4.34- Decomposição wavelet para os sinais de descargas parciais (2) obtidos com o detector comercial.

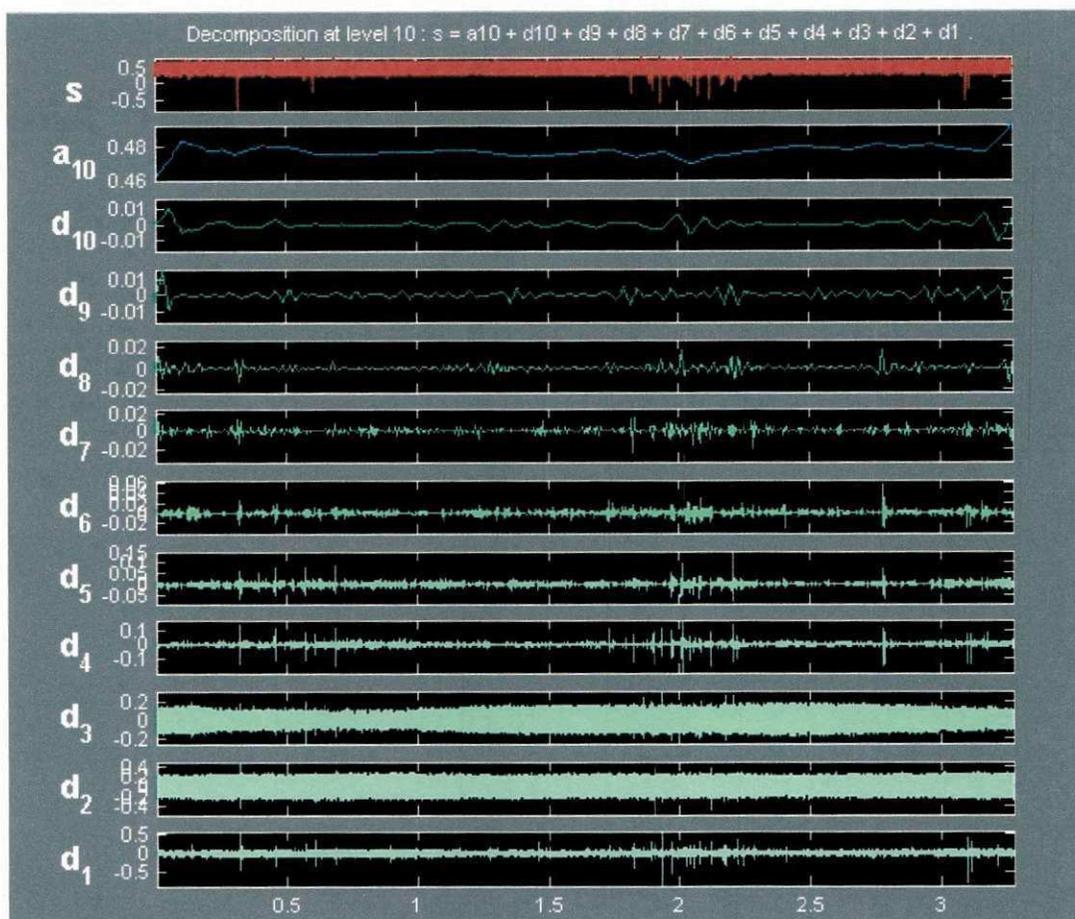


Figura 4.35- Decomposição wavelet para os sinais de descargas parciais (2) captados com o detector desenvolvido.

4.3.3 Análises

Analisando-se os sinais de corona e descargas parciais adquiridos pelo detector desenvolvido (Figura 4.16, Figura 4.24 e Figura 4.31), nota-se que os sinais detectados têm amplitude duas vezes maior que a amplitude do ruído (Figura 4.14), e de acordo com Kreuger (1989), quando isto ocorre torna a sensibilidade do detector aceitável.

O detector comercial superpõe eletronicamente os sinais de descargas parciais a uma senóide de frequência industrial. A superposição possibilita a diferenciação dos tipos de descargas utilizando a técnica de análise de fase. Nas Figura 4.19, Figura 4.26 e Figura 4.33

podem ser vistos os sinais adquiridos com o detector desenvolvido, superpostos matematicamente a uma senóide representativa da tensão de alimentação. Comparando-se os sinais de descargas parciais obtidos com o detector comercial (Figura 4.15, Figura 4.22 e Figura 4.29) com o desenvolvido, percebe-se que a superposição matemática resultou em possibilidades de qualificação dos sinais de descargas parciais pela técnica de análise de fase.

Analisando a decomposição dos sinais de corona e descargas parciais, adquiridos com o detector comercial e o projetado, é possível perceber as diferenças. Nos sinais procedente do detector comercial (Figura 4.20, Figura 4.27 e Figura 4.34), devido a sua banda de passagem ser estreita, algumas componentes de frequência importantes do sinal são atenuadas, e como consequência a decomposição não consegue caracterizar as diferenças entre os sinais de corona e descargas parciais.

O fato contrário ocorre quando os sinais foram captados pelo detector desenvolvido (Figura 4.21, Figura 4.28 e Figura 4.35), ou seja, os sinais correspondentes às descargas parciais, independente da amostra utilizada, apresentaram um padrão semelhante com um maior número de repetições nos sinais d_8 e d_9 . Quando o sinal é corona, a ocorrência maior acontece em d_{10} . Com isto é possível caracterizar, ou seja, colocar uma assinatura padrão em sinais de corona e de descargas parciais. Quando se consegue caracterizar um sinal, torna-se possível desenvolver metodologias para o seu reconhecimento automático.

Em relação ao circuito do amplificador (Figura 3.18), pode ser melhorado em diversos aspectos:

1. Sua resistência de entrada é de 580Ω . Pode-se aumentar essa resistência aumentando-se os resistores de base, de emissor e de coletor. Dessa forma, mantém-se o ganho, mas aumenta-se a resistência de entrada. Entretanto, como a conexão entre o circuito sob teste e o amplificador é feito com cabo coaxial, para se evitar reflexões de onda, é melhor se colocar a impedância de entrada com mesmo valor, ou seja, com 50Ω . Para isso é necessário diminuir os valores dos resistores de base, emissor e coletor do primeiro estágio. Em qualquer caso, para

que a frequência de corte fique a mesma é necessário se mudar o valor do capacitor C_i .

2. Para melhorar a relação sinal-ruído pode-se substituir o transistor bipolar do primeiro estágio do amplificador por um JFET.
3. Pode-se reduzir o ganho total do amplificador para aproximadamente 10 000 de forma a se reduzir ruídos e se evitar oscilações.

As análises dos fatos expostos anteriormente confirmam que o detector desenvolvido, que inclui o impedor e o amplificador, consegue detectar e diferenciar os sinais de corona e de descargas parciais.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

As técnicas de medição das descargas parciais têm sido usadas no monitoramento do envelhecimento dos equipamentos elétricos. A constatação da sua presença pode identificar situações danosas e perigosas para a isolação de um equipamento submetido à alta tensão. O trabalho de detecção e medição de pulsos de descargas parciais utilizando um amplificador de banda larga é uma parte importante para o desenvolvimento de metodologias que objetivam o monitoramento automático das descargas parciais. Uma medição ideal dos parâmetros essenciais presentes nos sinais de descargas parciais é obtida quando o detector de descargas parciais tem a capacidade de não distorcer ou atenuar estes parâmetros. Para tanto foi desenvolvido um detector de banda larga, formado por um impedor de 50Ω e um amplificador com faixa de passagem de 50 MHz e frequência de corte inferior de 2,75 MHz.

Para validação do detector desenvolvido foram realizados vários ensaios. Assim, foram utilizadas as configurações existentes LAT/DEE/UFCG. Elas são utilizadas para gerar padrões de descargas parciais e corona confiáveis e eficientes. As amostras utilizadas foram de polietileno e acrílico. A validação dos resultados foi feita com a comparação entre os resultados obtidos nos ensaios realizados com o detector comercial e o desenvolvido. Para o processamento do sinal, utilizou-se o Toolbox Wavelet do programa MATLAB®. Os resultados obtidos comprovam a detecção dos sinais de descargas parciais com o detector desenvolvido, e através do programa de processamento, evidenciam as diferenças entre sinais de corona e de descargas parciais.

O uso da transformada Wavelet tem se mostrado satisfatório no processamento dos sinais de descargas parciais corrompidos por ruídos. Contudo o processo pode ser melhorado ainda mais, se o sinal adquirido contenha um mínimo de ruído possível.

Como um trabalho de pesquisa, em andamento, algumas limitações são apresentadas:

- As descargas parciais são pulsos de correntes. Idealmente, o sensor de medição dos pulsos deveria ser um sensor de corrente ou uma resistência com valor tendendo para zero. Sensores de corrente, como os de efeito Hall, são limitados para o uso em baixas frequências porque normalmente apresentam uma faixa de passagem de 0 a 250 kHz.
- Um problema observado no projeto do amplificador para altas frequências é a limitação do ganho dos transistores utilizados. Quando se quer um transistor com uma frequência de transição acima de 500 MHz, o ganho de corrente é baixo, entre 15 e 50. Além do mais, amplificadores de banda larga são sensíveis a ruídos. Problemas assim podem ser solucionados se o amplificador for inserido em um ambiente realmente blindado.

Tendo em vista as dificuldades encontradas, propõem-se os seguintes trabalhos:

- Melhorar o circuito de detecção projetado e implementado, observando a redução dos ruídos, ampliação da banda de passagem e melhoramento da resolução;
- Aprofundar os estudos sobre o processamento de sinais de descargas para a otimização da escolha da transformada wavelet discreta.
- Complementar o detector desenvolvido com um circuito para integrar os pulsos obtidos e quantificar o nível do sinal de descargas parciais.

Referências Bibliográficas

AMORIM JÚNIOR, H. P.; LEVY, A. F. S.; LIMA, A. G. G. L. **Transformada Wavelets Aplicadas no Tratamento dos Sinais de Descargas Parciais em Equipamentos Elétricos**. In: 4º Encontro Luso-Afro-Brasileiro de Planejamento e Exploração de Redes de Energia. CEPEL/INESC, Rio de Janeiro/Brasil, Junho de 1999. Disponível na Internet em <http://www.cepel.br/~elab99>, acesso em 08/10/2002.

BARTNIKAS, R.; McMAHON, E. J. (Ed.) **Engineering Dielectrics - Corona Measurement and Interpretation** – vol. I, Philadelphia: ASTM Special Technical Publication STP 669, 1979.

BOLLIGER, A.; LEMKE, E. **PD-Diagnostics** – Its History and Future. PD Workshop, Alexandria, Virgínia, Dezembro, 2001. Disponível na Internet em www.hvtechnologies.com/publica.htm, acesso em 19/11/2002.

BOGGS, S. A.; STONE, G. C. **Fundamental Limitacions in the Measurement of Corona and Partial Discharge**. IEEE Transactions on Dielectrics and Eletrical Insulation, Vol. EI-17 No. 2, pp. 143-150, Abril, 1982.

BURRUS, C. S.; GOPINATH, R. A.; GUO, H. **Introduction Wavelet and Wavelet Transforms – A Primer**, Prentice – Hall, New Jersey/EUA, 1998.

CAMPOS, N. P. **Análise de Circuitos de Ensaio de Descargas Parciais**. In: I Encontro Nacional sobre Descargas Parciais. Comitê Brasileiro de Eletricidade/ABNT, São Paulo, Brasil, Agosto, 1983.

COSTA, E. G.; NEVES, W. L. **Descargas Parciais**, Publicação interna do LAT/DEE/UFPB, Dezembro, 1996.

COSTA, F. F. **Digitalização e Estudo de Descargas Parciais Utilizando Transformada Wavelet Discreta**. Dissertação de Mestrado, UFPB/CCT/DEE, 2001.

INTERNACIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – IEC 270 **Standard for Partial Discharge Measurements**,1981.

KREUGER, F.H.; GULSKI, E.; KRIVDA, A. **Classification of Partial Discharges**. IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28, No. 6, pp. 917-931, Dezembro,1993.

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

LATINI, M.F. et.al. **Medição de Descargas Parciais em Hidrogerador da Usina de Itaipu – Uma Avaliação Experimental das Limitações, Dificuldades de Medição e Interpretação de Resultados**”. In I Encontro Nacional de Monitoramento - Chesf/Cigré. Paulo Afonso/Brasil, Dezembro,2002.

LEMKE, E.; SCHMIEGEL P. **Introduction to Fundamentals of PD Diagnostics**. LEMKE DIAGNOSTICS GmbH, Alemanha,1993. Disponível na Internet em www.hvtechnologies.com/publica.htm, acesso em 19/11/2002.

MATLAB for Windows User's Guide, The Math Works Inc., 1991

MILLMAN, J.; HALKIAS C.C. **Eletrônica: Dispositivos e Circuitos**. 2ª Ed. Vol I e II. McGraw-Hill do Brasil- São Paulo, 1981.

MOLE, G. **Basic Characteristics of Corona Detector Calibrators**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 2, pp. 198-204, Fevereiro,1970.

MOTA, H. O. **Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados Para Monitoramento e Diagnóstico de Equipamentos Elétricos Pelo Método das Descargas Parciais**, Dissertação de Mestrado, UFMG, 2001.

NBR6940 Técnicas de Ensaio Elétrico de Alta Tensão - Medição de Descargas Parciais, ABNT, 1981.

ROCHA,R.O. et al. **A Monitoração e o Diagnóstico da Condição Operacional de Hidrogeradores - A Experiência Eletronorte/CEPEL**". In: I Encontro Nacional de Monitoramento - Chesf/Cigré. Paulo Afonso/Brasil, Dezembro,2002.

SEDRA,A.S.;SMITH,K.C. **Microeletrônica**. 4^a Ed. MAKRON Books Editora Ltda, São Paulo,2000.

SHIM, I.; SORAGHAN, J. J.; SIEW, W. H. **Aplication of Signal Processing to Detection Partial Discharge Part 2: Optimized A/D Conversion**. IEEE Eletrical Isulation Magazine, vol 16, n. 4, p. 11-15, July/August, 2000.

TETREX Information No. 21, **Partial Discharge Measuring Techniques**. TETREX AG Instruments, Zürich, 1984

STONE, G. C. **Partial Discharge – Parte VII: Pratical Techniques for Measuring PD in Operating Equipment**. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 7, No. 4, pp. 9-16, Julho/Agosto, 1991.

ZEANGEL, W. S.; OSVATH, P.; WEBER, H. J. **Correlations Between the Bandwidth of PD-Detectors and Its Inherent Integration Erros**. Conference Record of 1986 IEE International, Symposium on Electrical Insulation, Washington DC, June 9-11,1986