

TESE DE DOUTORADO

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A MEDIÇÃO DAS COMPONENTES DE
CORRENTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS ATRAVÉS DE
TRANSDUTORES RESISTIVOS**

ANTONIA NAVARRO GÓMEZ

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A MEDIÇÃO DAS COMPONENTES DE
CORRENTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS ATRAVÉS DE
TRANSDUTORES RESISTIVOS**

ANTONIA NAVARRO GÓMEZ

Texto da Tese de Doutorado submetido à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sinais e Sistemas
Linha de Pesquisa: Sistemas de Controle e Automação de Processos

Orientador: Prof. José Luiz Silvino

Co-orientador: Prof. Silvério Visacro Filho

BELO HORIZONTE
FEVEREIRO DE 2007

“O ato da memória é um ato de construção, não de gravação. Isto é, através da vida, nós criamos experiência e memória, em vez de nos posicionarmos como meros espectadores dos eventos em torno de nós. Remodulamos a memória à medida que vamos ganhando experiência e reconstruímos a experiência com base nas expectativas trazidas da memória”

Philip Hilts.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Julian e Delia, às minhas irmãs e irmãos que mesmo de longe acompanharam de perto esta conquista. Ao meu namorado José Silva pelo carinho e compreensão e presença constante.

Ao prof. José Luiz Silvino, pela boa bondade e motivação em ajudar e colaborar. Agradeço de forma especial ao Prof. Silvério Visacro pela dedicação e pelos momentos de discussão e conselho que muito ajudaram na realização deste trabalho.

A duas grandes amigas e companheiras de doutorado, Rosilene Dias e Cláudia Mesquita, agradeço pela generosidade, exemplo, amizade desenvolvida ao longo desses anos e por muito contribuírem para minha formação profissional.

Aos Professores do LRC, Maria Helena, Peterson de Resende, Amilton Soares, Clever Pereira, Júlio de Melo pela boa bondade, amizade e colaboração.

Aos companheiros de doutorado, Fuad Almeida, Fernando Henrique Silveira, Alberto de Conti e Eduardo Gonzaga, agradeço pela relação sincera de amizade e companheirismo. Aos ex-colegas e amigos, agora professores, Marco Aurélio Schroeder, Moacir, Evandro Ribeiro, Márcio Matias e Ronilson Rocha.

Aos amigos e professores, em especial a Maria Aparecida Soares, Weverson Rocha, Marcelo, Renato Zica, Guilherme, Alex, Valmir, Jésus, Wilson, Maurício, Hilton, Jacomin, Cássia Regina, Anete e Arlete Vidal, Prof. Paulo Seixas, Prof. Hani Yehia e Rodney Rezende.

Ao Vander e José Vicente da CEMIG. De forma especial ao Eng. Paulo Góis do LEMAT-CEMIG pela assistência e auxílio na realização de testes.

Ao pessoal do laboratório LEAT – UFMG, José Luíz, Sérgio e de forma especial a Alisson Senna Filho, pelas discussões, boa bondade e colaboração na longa caminhada.

Aos alunos de iniciação científica Rodrigo Hostt e Leonardo Rocha pela contribuição no desenvolvimento da parte eletrônica do sistema de medição.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela ajuda financeira e a Deus, pela fidelidade.

Deixo meus sinceros agradecimentos a todos que de forma direta ou indireta foram importantes para que este trabalho fosse realizado.

RESUMO

Neste trabalho é desenvolvido um sistema que utiliza transdutores resistivos para medição direta de correntes de descargas atmosféricas em torres instrumentadas. O sistema permite a medição da componente de corrente contínua e da corrente impulsiva. O projeto do transdutor, bem como as características do sistema eletrônico utilizado para monitorar e gravar os sinais medidos são descritos em detalhes.

A utilização de transdutor resistivo na medição de correntes impulsivas das descargas atmosféricas pode conter alguns erros na medição, principalmente na frente de onda e no valor de pico da corrente, devido ao efeito indutivo. Para contornar o possível erro, neste trabalho foram abordados dois aspectos: primeiro, a construção do transdutor resistivo possui um desenho especial (*shunt* coaxial) para minimizar a indutância e segundo, o desenvolvimento analítico de uma função de correção para compensar a indutância residual do *shunt*.

Experimentos laboratoriais foram realizados a fim de avaliar e calibrar o funcionamento do sistema de medição e do transdutor. Tais experimentos consideram valores típicos de correntes de descargas atmosféricas.

Uma vez considerado satisfatório o desempenho do sistema de medição, o mesmo foi incorporado à Estação Morro do Cachimbo. O registro da medição de uma corrente de descarga real, incidente na torre da Estação, é apresentado neste trabalho.

Verificado o bom desempenho tanto em condições do laboratório quanto em campo, decidiu-se pela incorporação definitiva do sistema de medição desenvolvido à estação do Morro do Cachimbo.

ABSTRACT

In this work, a system is developed for direct lightning current measurements in instrumented towers. This system uses resistive transducers and allows the measurement of both the impulsive and continuous components of the lightning current. The design of the transducer is described in detail, as well as the characteristics of the electronic system applied to monitoring and recording the measured signals.

Due to inductive effects, the application of resistive transducers to measure impulsive lightning currents may lead to errors, especially in the wavefront and in the peak current. To minimize these eventual errors, two different aspects were dealt with: firstly, the resistive transducer was designed to have a special shape to reduce inductive effects (coaxial shunt); secondly, a correction function was derived analytically to compensate the residual inductance of the shunt.

Laboratory experiments were performed in order to evaluate and calibrate the measuring system and the transducer itself. Such experiments considered the injection of typical lightning currents. Once the performance of the measuring system was considered satisfactory, it was incorporated to the Morro do Cachimbo Station. The results derived from an actual lightning strike on the tower are presented here.

Given the good performance of the measuring system in both laboratory and field conditions, it was decided to definitely incorporate it to the Morro do Cachimbo Station.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 – RELEVÂNCIA DO TEMA	1
1.2 – OBJETIVO DO TRABALHO	4
1.3 – ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	4
CAPITULO 2 - COMPONENTES DA CORRENTE DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	7
2.1 – INTRODUÇÃO	7
2.2 – BREVE HISTÓRICO SOBRE SISTEMAS DE MEDIÇÕES DE CORRENTE DE DESCARGAS	8
2.3 – CONSIDERAÇÕES SIMPLIFICADAS SOBRE OS TIPOS DE DESCARGAS	13
2.4 – ABORDAGEM SIMPLIFICADA DOS PROCESSOS ENVOLVIDOS NA DESCARGA ATMOSFÉRICA	16
2.4.1 - Ruptura Preliminar Entre as Regiões Positivas e Negativas das Cargas (Preliminary Breakdown)	16
2.4.2 - Canal Precursor de Descargas (Stepped-Leader)	16
2.4.3 - Processo de Conexão	17
2.4.4 - Primeira Corrente de Retorno	18
2.4.5 - Correntes de Retorno Subseqüentes	19
2.5 – A COMPONENTE CONTÍNUA DA CORRENTE DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	20
2.5.1- Definição da Corrente Contínua	20
2.5.2 - Padrões de Comportamento Observados na Ocorrência da Componente Contínua de Longa Duração	23
2.5.3 - Formatos da Corrente Contínua	24
2.5.4 - Estatísticas de Ocorrência da Corrente Contínua	25
(a) - A Corrente Contínua em Descargas Negativas e Positivas	25
(b) - A CCLD Relacionado ao Número de <i>Strokes</i> por <i>Flash</i>	31
(c) - A CC relacionada à Ordem de <i>Strokes</i>	33
(d) - CC Relacionado ao Intervalo de Duração entre <i>Strokes</i>	35
2.9 – CONCLUSÕES	36

CAPÍTULO 3 - CONSTITUIÇÃO DE UM SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE CORRENTES DAS DESCARGAS	37
3.1 – INTRODUÇÃO	37
3.2 – TRANSDUTOR RESISTIVO	38
3.2.1 - Considerações Gerais Para a Construção do Transdutor Resistivo	39
3.2.2 - Aspectos Construtivos do Dispositivo Shunt	40
3.2.3 - Materiais Utilizados	44
3.3 – CARACTERÍSTICAS DE COMPONENTES UTILIZADOS NO SISTEMA DE MEDIÇÃO	47
3.4 – OPERAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	49
3.4.1 - Funcionamento do Sistema de Medição	51
3.5 – CONCLUSÃO	54
CAPÍTULO 4 - FUNÇÃO PARA CORREÇÃO DO SINAL MEDIDO E RECONSTITUIÇÃO DA CORRENTE	57
4.1 – INTRODUÇÃO	57
4.2 – DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DO TRANSDUTOR RESISTIVO	59
4.2.1- O Efeito Pelicular	60
4.3 – PROPRIEDADES ELÉTRICAS DO CONDUTOR	61
4.3.1 - Impedância Interna do Condutor	62
4.3.2 - Impedância Externa do Condutor	66
4.3.3 - Impedância Longitudinal do Condutor	67
4.4 – RESULTADOS ANALÍTICOS DO CONDUTOR	67
4.5 – FUNÇÃO DE CORREÇÃO	68
4.6 – FLUXOGRAMA DA FUNÇÃO DE CORREÇÃO	69
4.7 – RECONSTRUÇÃO DAS ONDAS DE CORRENTE	70
4.7.1 - Forma de Onda Teórica	70
4.7.2 - Forma de Onda Experimental	71
4.8 – CONCLUSÃO	73

CAPÍTULO 5 - MEDIÇÃO DE CORRENTES IMPULSIVAS DE ALTA E BAIXA AMPLITUDE.....	74
5.1 – INTRODUÇÃO	74
5.2 – TESTES DO SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA CORRENTES IMPULSIVAS DE BAIXA AMPLITUDE	75
5.3 – TESTES DO SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA CORRENTE DE ALTA AMPLITUDE E ALTAS REQÜÊNCIAS.....	81
5.4 – CONSTRUÇÃO DO TRANSDUTOR PARA MEDIR CORRENTES DE BAIXA AMPLITUDE	86
5.5 – TESTES E ANÁLISES DO TRANSDUTOR RESISTIVO PARA CORRENTES DE BAIXA AMPLITUDE	90
5.6 – SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CORRENTES IMPULSIVAS DE ALTA E BAIXA AMPLITUDE	91
5.7 – CONCLUSÃO	92
CAPÍTULO 6 - RESULTADO DE MEDIÇÃO REAL	94
6.1 – INTRODUÇÃO	94
6.2 – ESTAÇÃO MORRO DO CACHIMBO - MCS	95
6.3 – MEDIÇÕES REALIZADAS	97
6.4 – RECONSTITUIÇÃO DA FORMA DE ONDA	98
6.5 – PARÂMETROS TÍPICOS DA FORMA DE ONDA DE CORRENTE MEDIDA	100
6.6 – CONCLUSÕES	102
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E PROPOSTA DE CONTINUIDADE	103
7.1 – INTRODUÇÃO	103
7.2 – PRINCIPAIS CONCLUSÕES E ASPECTOS ORIGINAIS DO TRABALHO	104
7.3 – PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
APÊNDICE A - DANOS EM CABOS OPGW CAUSADOS POR CORRENTE CONTÍNUA DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.	
APÊNDICE B - MANUAL DO CONVERSOR ELETRO ÓPTICO.	
APÊNDICE C - MANUAL DO CONVERSOR ÓPTICO ELÉTRICO.	
APÊNDICE D - MANUAL DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.	

1 Introdução

1.1 Relevância do Tema

A fonte efetiva dos efeitos mais severos e destrutivos das descargas atmosféricas consiste na corrente da descarga.

Por conseguinte, a caracterização dos parâmetros desta corrente é de fundamental interesse para a engenharia de proteção bem como para a pesquisa científica sobre o fenômeno.

O conhecimento atual sobre tais parâmetros decorre, sobretudo, dos resultados obtidos nas medições diretas da corrente de descarga realizadas por Berger na torre instrumentada da estação de San Salvatore, na Suíça. Tais medições, iniciadas em 1958 e que se estenderam até meados da década de 1970 [Berger et al., 1975], deram origem à maior base existente sobre parâmetros de corrente de descarga. Essa base de dados constitui a mais importante referência utilizada para o dimensionamento de práticas de proteção contra descargas e para avaliação dos efeitos do fenômeno.

A medição direta da corrente de descarga é efetuada por meio de transdutores de corrente instalados em estruturas elevadas (usualmente torres e mastros), selecionadas por sua maior probabilidade de incidência. Tais transdutores, de natureza diversa, são posicionados ao longo do percurso em direção ao solo da corrente de eventuais descargas incidentes na estrutura.

Os transdutores mais tradicionais são os designados *shunts* de corrente, que predominavam no passado. Estes consistem em dispositivos resistivos colocados em série na estrutura. Por apresentarem valor de indutância muito reduzido (inferior à centena de picohenrys), tais dispositivos possuem valor muito reduzido de tempo de subida da onda de tensão detectada (de ordem inferior a uma centena de nanossegundos) e larga faixa de passagem (frequência de *cut-off* superior a 8 MHz). Considerando-se os tempos típicos das ondas das descargas reais, tais características permitem utilizar uma relação linear para recuperar a onda da corrente de descarga a partir da onda de tensão gerada pelo fluxo da corrente e medida nos terminais do *shunt*, $(i(t) = v(t)/R)$.

Outros transdutores são também adotados, particularmente, as bobinas de Pearson e de Rogowski. De forma simplificada, pode-se dizer que estas se aproximam construtivamente de transformadores de corrente com núcleo de material não magnético. Tais bobinas são capazes de fornecer em seus terminais derivada de corrente que flui pelo seu primário, com muita exatidão. Com o uso de integradores (acoplados ou não às bobinas) é possível recuperar a corrente de descarga. Ambas as bobinas apresentam desempenho muito satisfatório em altas frequências, mas carecem de melhor desempenho para o registro das parcelas lentas da corrente de descarga.

Cada tipo de transdutor apresenta vantagens e desvantagens. Os transdutores de corrente são desacoplados condutivamente do circuito de corrente (o primário consiste no próprio condutor onde flui a corrente e é separado do restante da bobina por ar, pois se posiciona na janela do toróide correspondente). Diferentemente dos transdutores diferenciais (bobinas), os *shunts* apresentam como inconveniente a ligação condutiva direta com o circuito da corrente, o que pode ocasionar transferência de potenciais para o circuito de medição. Por outro lado, os *shunts* podem fornecer um retrato fiel da corrente de descarga, incluindo suas

componentes rápida e lenta, não possuindo a mesma limitação dos derivadores para detectar as componentes lentas da onda de corrente de descarga.

Tradicionalmente, o interesse maior nas medições da corrente de descarga residia na caracterização de sua componente impulsiva, responsável pelas sobretensões promovidas pelas descargas diretas e indiretas nos isolamentos dos sistemas elétricos e eletrônicos. Atualmente, existe um interesse crescente na medição integral da corrente, pois verificou-se que as componentes lentas, sobretudo a componente contínua de longa duração, podem também contribuir para a promoção de importantes danos em componentes de sistemas físicos, associados à intensa dissipação de energia, tais como os danos em cabos OPGW (*Optical Ground Wire*), que são muito utilizados nas linhas de transmissão.

Nesta perspectiva, o interesse no uso de *shunts* para medição de correntes de descarga fica revitalizado, sobretudo pelo fato desses dispositivos possibilitarem a medição de todas as componentes da onda de corrente.

Infelizmente, a literatura técnica não contempla adequadamente a consideração de alguns aspectos envolvidos na utilização de transdutores resistivos para medição das correntes de descargas atmosféricas e, tampouco, na construção destes. Existem algumas complexidades não exploradas, principalmente aquelas associadas à limitação da potência máxima permitida de dissipação do dispositivo, decorrente dos requisitos de comportamento térmico do material que compõe o transdutor e dos meios utilizados para se assegurar valores muito reduzidos de indutância para manter uma relação " $v(t) / i(t)$ " constante. Tais aspectos tornam o desenvolvimento da tecnologia de fabricação deste tipo de *shunt* um desafio científico relevante.

1.2 Objetivo do Trabalho

O presente trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de um sistema de medição baseado em transdutor resistivo para permitir a medição e registro integral da corrente de descargas atmosféricas e sua instalação na Estação Morro do Cachimbo.

Para alcançar tal objetivo, foi desenvolvida toda a tecnologia envolvida na construção de dispositivos *shunts* e a experiência para integrar o transdutor num sistema de medição para registro integral da onda da corrente de descarga.

Atualmente, o sistema de medição, que contém o transdutor resistivo, já está incorporado ao sistema existente na Estação Morro do Cachimbo para a aquisição de dados tanto da componente impulsiva quanto da componente contínua da corrente das descargas incidentes na torre da estação. Esta realização ampliou a capacidade de registro de corrente da estação, antes limitada a uma janela de tempo de 400 μ s, para registro apenas da parcela impulsiva da corrente.

1.3 Organização do Texto

A tese está organizada em sete capítulos, incluindo a presente Introdução.

Seguindo esta abordagem introdutória, o Capítulo 2 – Componentes da Corrente de Descargas Atmosféricas, apresenta conceitos e definições a respeito da descarga atmosférica, destacando a componente contínua da corrente. Após uma introdução aos parâmetros relevantes da descarga atmosférica, são consideradas as circunstâncias nas quais existe maior possibilidade da ocorrência da componente contínua da corrente de descarga. Finalmente, são apresentados dados de medições da componente contínua obtidos em diferentes países.

O Capítulo 3 – Constituição de um Sistema para Medição de Correntes das Descargas, descreve e mostra as etapas da construção do resistor *shunt* coaxial, detalhando e justificando os materiais utilizados na construção. São abordados os componentes que compõem o sistema de medição, como conversores eletro-óptico e óptico-elétrico.

Finalmente, explica-se o modo de operação do sistema de medição quando incorporado à Estação Morro do Cachimbo.

O Capítulo 4 – Função para Correção do Sinal Medido e Reconstituição da Corrente, apresenta uma breve revisão teórica a respeito do efeito pelicular. Também são deduzidas matematicamente as impedâncias interna, externa e longitudinal do condutor utilizado. São apresentados resultados analíticos da variação da resistência interna e das reatâncias interna e externa em função da frequência. Finalmente, apresenta-se a elaboração da função de correção e o fluxograma do programa computacional elaborado para determinar a mesma.

O Capítulo 5 – Medição de Correntes Impulsivas de Alta e Baixa Amplitude, apresenta os resultados obtidos das formas de onda das correntes medidas experimentalmente, ilustrando os resultados preliminares. Também é mostrada a construção de um outro transdutor resistivo (que será utilizado para medir correntes de baixa amplitude) e também as características, configurações e o funcionamento do sistema de medição.

O Capítulo 6 – Resultado de Medição Real, apresenta a medição de corrente de descarga obtida. Tão logo o sistema foi incorporado à Estação Morro do Cachimbo, obteve-se um registro. Neste capítulo têm-se alguns parâmetros da onda de corrente de descarga atmosférica medida com o sistema.

O Capítulo 7 – Conclusões, apresentam os principais tópicos observados ao longo do desenvolvimento desta tese, bem como alguns comentários e propostas para futuros trabalhos.

As Referências Bibliográficas trazem a relação dos trabalhos que de forma direta orientaram esta pesquisa e que servem como consultas adicionais para subsidiar no aprofundamento do tema pesquisado.

A tese apresenta cinco apêndices:

Apêndice A – Tem-se uma breve descrição dos cabos OPGW e danos causados ao mesmo por descargas atmosféricas.

Apêndice B – Apresenta-se parte do Manual do Conversor Eletro Óptico.

Apêndice C – Apresenta-se parte do Manual do Conversor Óptico Elétrico.

Apêndice D – Apresenta-se parte do manual da placa de aquisição de dados utilizada no sistema de medição.

2 Componentes da Corrente de Descargas Atmosféricas

2.1 Introdução

O fenômeno descarga atmosférica é um agente causador de distúrbios eletromagnéticos de elevadas magnitudes em sistemas elétricos, capazes de promover desligamentos das redes elétricas, queima de equipamentos elétricos, perda da continuidade de produção, acidentes com pessoas ou animais, enfim, toda uma gama de transtornos e prejuízos. Isto torna o fenômeno objeto de diversos estudos na área de engenharia.

O conhecimento dos parâmetros desta poderosa intempérie natural é primordial para otimizar projetos, proteger equipamentos e redes elétricas, proteger seres humanos e animais, bem como garantir a continuidade no fornecimento de energia elétrica e promover a redução dos custos. Estudos sobre descargas atmosféricas são realizados em diversas partes do mundo e

sabe-se que as peculiaridades do ambiente interferem diretamente sobre as características das descargas atmosféricas.

Sabe-se que a corrente da descarga constitui a fonte da maior parte dos danos promovidos pelo fenômeno. Esta corrente tem perfil complexo e seus estágios comportam diferentes componentes. Habitualmente sempre foram destacados os parâmetros referentes à corrente impulsiva das descargas. Entretanto, a componente contínua da corrente pode também causar significativos danos, por exemplo nas linhas de transmissão (especialmente aquelas linhas compostas com cabos OPGW). O Apêndice A, considera danos nos cabos OPGW devido à componente contínua de corrente de descarga.

O tema Descargas Atmosféricas tem sido considerado em diversas pesquisas desenvolvidas no LRC¹. Neste capítulo, descreve-se em linhas gerais alguns aspectos fundamentais a respeito das componentes de correntes das descargas atmosféricas, dando maior atenção à componente contínua, pois já existe volume apreciável de informação sobre a componente impulsiva, o que facilita a sua compreensão.

2.2 Breve Histórico Sobre Sistemas de Medições de Corrente de Descargas

Existem vários meios de se coletar dados sobre as descargas atmosféricas: torres instrumentadas, que utilizam transdutores de corrente, medição de fluxo dos campos magnéticos gerados pelas descargas a partir de antenas; sistema de localização de descargas atmosféricas dentre outros. Cada sistema de medição apresenta uma peculiaridade e um tipo de aplicação diferente.

A seguir são relacionados e comentados alguns centros de relevância histórica na medição de correntes de descargas através de torres instrumentados.

¹ LRC – “*Lightning Research Center*” – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas da UFMG (convênio UFMG – CEMIG).

Monte San Salvatore, Suíça: A partir de 1943 o comitê de Pesquisas de Alta Tensão da Suíça realizou estudos para coletar dados de correntes de descargas. As medições foram realizadas no topo de duas torres de televisão de 55 m de altura localizadas no *Monte San Salvatore*, próximo à cidade de Lugano [Berger, 1967]. As medições das correntes foram realizadas desde o término da construção das torres e os dados coletados eram então armazenados. Outras informações a respeito das medições são detalhadas em [Berger et al., 1975].

As medições de corrente das descargas atmosféricas que atingiram a torre foram realizadas utilizando-se dois resistores não-indutivos ($0,8 \Omega$ e $0,05\Omega$) localizados no topo da torre. Com o resistor de $0,05 \Omega$ mediam-se correntes de amplitude mais elevadas (1 kA – 200 kA), enquanto o resistor *shunt* de $0,8 \Omega$ foi utilizado para medir correntes de baixa amplitude (50 A - 24 kA) [Uman,1984].

Alguns anos depois do término da construção, campos elétricos eram medidos e suas informações eram armazenadas durante a ocorrência das descargas [Uman,1984].

CN Tower, Toronto: a torre “*Canadian National Tower*”, Canadá, possui uma altura de 553m. As medições de descargas na torre datam desde 1978.

As medições de correntes são feitas por meio de uma bobina de *Rogowski*, instalada na metade da torre a uma altura de 475 m. O sistema de medição e o transdutor foram interligados por cabos condutores convencionais do tipo triaxiais blindados para transmissão do sinal. Posteriormente, uma segunda bobina de *Rogowski* foi instalada a uma altura de 35 m acima da primeira, ou seja, a uma altura de 510 m [Hussein et al., 2001]. Este último transdutor utiliza transdutores eletro/ópticos (EO) na torre e óptico/elétrico (OE) na entrada do digitalizador e cabo de fibra óptica para a transmissão do sinal. Assim, a aquisição de dados obteve melhorias, comparando-se com a primeira bobina.

CSIR, África do Sul: em 1972 foi criado o CSIR (*Council for Scientific and Industrial Research*) com o intuito de se estudar o fenômeno da descarga atmosférica. Os estudos foram realizados numa torre de 60 m de altura, situada na África do Sul [Eriksson,1978].

Para realizar as medições de correntes de descargas, foi colocado na base da torre um transformador de corrente (TC) com característica de ampla banda de passagem. Os dados obtidos nesse TC são então transformados e gravados automaticamente por um sistema de aquisição digital. Além disso, há outros equipamentos como centelhadores e elos magnéticos no topo da torre, utilizados para estimar a amplitude da corrente e verificar as polaridades das descargas.

Torre de Gaisberg, Áustria: O início dos estudos se deu em 1998 [Diendorfer et al., 2000], em uma torre de telecomunicações utilizada para transmissão de ondas de rádio localizada no *Monte Gaisberg*, a 5 km de Salzburg. A torre possui uma altura de 100m.

No caso específico dessa torre, as correntes são medidas no topo por meio de um resistor *shunt* de resistência de 0,25 m Ω , com resposta em frequência de zero a 3,2 MHz. A transmissão dos dados medidos no resistor *shunt* para o ponto de armazenagem é feito por fibra óptica em dois canais, um na escala de zero a 2,1 kA e outro na escala de zero a 40 kA. Associada ao registro da onda de corrente tem-se a informação precisa do instante de ocorrência, obtida por meio de um sistema GPS (*Global Positioning System*) [Diendorfer et al., 2002].

Torre de Peissenberg, Alemanha: Trata-se de uma torre de 160 m de altura, localizada próximo da cidade de Munique. A estação foi utilizada para investigação da corrente e do campo eletromagnético associado às descargas atmosféricas, desde 1978 até 1999. Dois sistemas de medição foram utilizados; o primeiro no topo da torre e o segundo na base da torre. Ambos os sistemas utilizam sensor de derivada de corrente (di/dt) e um transformador de corrente (*Pearson CT*: 0,15 Hz - 200 kHz) para medir derivada da corrente e a corrente das descargas. O sinal é armazenado em um osciloscópio digital capaz de armazenar um milhão de pontos utilizando intervalo de amostragem de 1 μ s. A estação permitia o registro simultâneo do evento tanto no topo como na base da torre [Fuchs et al., 1998] [Heidler et al., 2000] [Heidler et al., 2001].

Chaminé de Fukui, Japão: A torre *Fukui*, localizado no Japão, possui uma altura de 200 m, foi utilizada para medir correntes de descarga e outros parâmetros associados com o fenômeno, como o campo eletromagnético. Para a medição da corrente, a torre foi equipada com dois resistores *shunts* coaxiais (2 m Ω e 10 m Ω), localizados no topo da torre. São utilizados

conversores eletro-óptico (E/O), óptico-elétrico (O/E) e cabos de fibra ótica para a transmissão do sinal até uma sala de medição [Goshima et al., 2000].

Com o resistor *shunt* de 10 mΩ, medem-se correntes de baixa amplitude (200 A - 5 kA). As correntes de valores mais elevados (4 kA - 250 kA) são medidas pelo resistor *shunt* de 2 mΩ [Miki et al., 2002]. Os resultados obtidos mostram que as descargas atmosféricas no inverno do Japão podem ser divididas em dois tipos: o primeiro, com formas de onda de curta duração, elevada amplitude e intensa luminosidade do canal; o segundo, com formas de onda de longa duração, baixos valores de amplitude e de luminosidade do canal.

Torre Meteorológica, Japão: Um outro grupo de pesquisadores japoneses, liderados por Goto, também mediu as correntes das descargas atmosféricas incidentes em uma torre durante tempestades de inverno. A medição das correntes foi realizada por meio de dois sistemas instalados no topo de uma torre de 150 m de altura, situada a 125 m acima do nível do mar. A configuração do sistema pode ser observada em [Goto et al., 1995]. O primeiro sistema era composto por dois *shunts* coaxiais, um de 2 mΩ, instalado em um captor e outro de 4 mΩ, instalado também na torre só que conectado a um condutor em forma de anel. Além dos *shunts*, o sistema era composto por conversores E/O e O/E, cabos de fibra ótica e registradores de transitórios controlados por computador. Foram utilizados três registradores de transitórios, dois com capacidade de memória de 32 kB e outro de 64 kB. As memórias dos dois primeiros registradores eram divididas em 5 partes; o intervalo de amostragem era de 100 ns com período delimitado de 0,5 ms, de modo a possibilitar o armazenamento de cinco *strokes* de uma mesma descarga. O terceiro registrador com intervalo de amostragem de 1 μs, foi utilizado para armazenar descargas múltiplas com corrente contínua [Goto et al., 1995].

Torre Ilyapa, Colômbia: Um grupo de pesquisadores colombianos, liderados por Horácio Torres, fez a instalação de uma torre de 35 m de altura para medições de correntes incidentes. A razão da baixa altura da torre foi para minimizar a ocorrência de descargas ascendentes [Torres et al., 1999a]. Na base da torre foram instalados equipamentos de medição, como: bobina de Rogowski diferenciadora, bobina de Rogowski integradora, transformador de corrente Pearson (modelo 1423) e um resistor *shunt* (0,52 mΩ) [Torres et al., 2000]. A configuração da estação pode ser vista na referência [Torres et al., 1999a].

Descargas Induzidas por foguetes em Camp Blanding, Flórida-EUA: O “*ICLRT - International Center for Lightning Research and Testing*” realiza medições de onda de correntes de descargas provocadas artificialmente pelo lançamento de foguetes.

A técnica utilizada para iniciar as descargas consiste no lançamento de um pequeno foguete com um fio de cobre bem fino amarrado em sua cauda e preso no solo [Rakov,1999]. Quando o sensor de campo elétrico mede um valor na faixa de 4 kV/m a 10 kV/m, existe uma grande probabilidade de ocorrer uma descarga, sendo então lançado o foguete. Ao atingir entre 200 e 300 m de altitude, o campo próximo à ponta do foguete aumenta de tal forma que ocorre a formação do líder ascendente, que vaporiza o fio e inicia a chamada corrente contínua inicial. Após o término da corrente contínua inicial, em geral, inicia-se a primeira descarga subsequente, que, assim como as demais, segue o caminho traçado pelo fio [Fernandez et al., 1998].

As medições da forma de onda da corrente de descarga são realizadas por meio de um resistor *shunt* não-indutivo (1 mΩ), localizado no lançador de foguetes [Rakov et al., 2001]. A corrente no lançador passa através do sensor antes de atingir a terra. Registradores de transitórios e osciloscópios digitais foram usados para gravar os sinais medidos pelo *shunt*. Os osciloscópios digitais foram instalados a cerca de 100 m do lançador e conectados aos sensores por meio de fibras óticas [Rakov,1999]. Diversos estudos mostram que a maioria das descargas que ocorrem em *Camp Blanding* é do tipo ascendente.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Cachoeira Paulista, Brasil: No local são realizados estudos sobre descargas artificiais, induzidas por foguetes [Saba et al., 2005], [Ballarotti et al., 2005] [Saba et al., 2006].

Estação Morro do Cachimbo, Belo Horizonte: A Estação foi instalada em 1985 pela CEMIG² nas proximidades de Belo Horizonte a uma altitude de 1453 m acima do nível do mar. A partir de 1998, a Estação foi incorporada ao LRC [Visacro, 2005]. Tal estação possui uma torre de 60 m de altura sustentada por estais de material isolante. Na base da torre existem duas bobinas de Pearson e o transdutor resistivo para medição da onda de corrente impulsiva

² CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

de descargas incidentes na torre [Visacro et al., 2004], [Gómez et al., 2006]. Recentemente, foi instalada uma terceira bobina de Pearson com capacidade para medir inclusive ondas lentas.

A estação também possui um medidor de campo estacionário “*field mill*” e um sistema para medição da variação de campo elétrico local (um sensor para variações lentas, dE , e um sensor para detectar variações rápidas, dE/dt) [Mazur et al., 2006]. Encontram-se instalados na estação demais equipamentos, como uma câmara rápida de vídeo e um registrador de ondas de correntes que são obtidas por meio de medição indireta [Silvino et al., 2003].

2.3 Considerações Simplificadas Sobre os Tipos de Descargas

Segundo [Uman,1987], uma descarga atmosférica é um transiente, uma descarga elétrica de alta corrente cujo percurso é medido em quilômetros. A descarga nuvem-solo, apesar de não ser a que ocorre com maior frequência, é aquela que desperta maior interesse prático.

As descargas atmosféricas naturais estão normalmente associadas a nuvens de tempestades, embora se saiba que outros fenômenos possam ocasioná-las, tais como erupções vulcânicas, tempestades de areia, etc. As descargas provenientes das nuvens de tempestade (“*cúmulo-nimbos*”) são as descargas mais comuns, embora outras nuvens também possam produzir descargas atmosféricas. A estrutura típica de uma nuvem de tempestade é mostrada na Figura 2.1. Observa-se a predominância de cargas negativas na base da nuvem, embora, eventualmente, sejam ali encontrados pequenos bolsões de cargas positivas. Há um volume de cargas positivas posicionado no topo da nuvem [Uman, 1994].

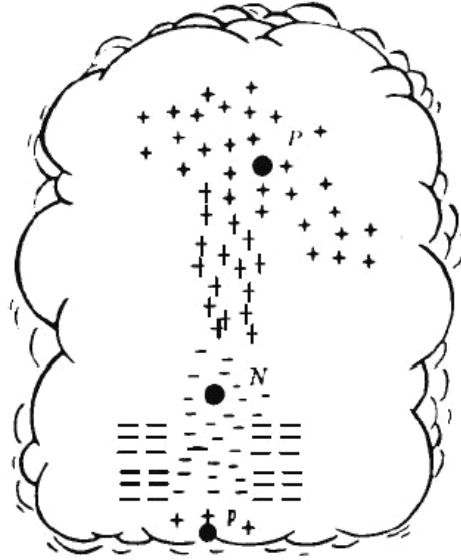


Figura 2.1- Estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade típica [Uman, 1984].

As descargas atmosféricas podem ocorrer dentro da própria nuvem (descargas intranuvem), entre nuvem e solo, da nuvem para o ar e entre nuvens. Mais da metade das descargas atmosféricas ocorre dentro da própria nuvem, mas nem sempre esta descarga é detectável, dificultando o estudo através de estações de observação localizadas na Terra [Uman, 1988].

A descarga atmosférica nuvem-solo pode ser classificada segundo a polaridade do centro de carga da nuvem envolvido e a direção de propagação do canal de descarga de quatro maneiras diferentes, conforme mostra a Figura 2.2.

- Descarga negativa descendente: Iniciada por um canal precursor descendente carregado negativamente a partir da região da nuvem carregada negativamente (Figura 2.2(a)).
- Descarga negativa ascendente: Geralmente origina-se de um objeto alto carregado positivamente e se propaga em direção à região da nuvem carregada negativamente (Figura 2.2 (b)).
- Descarga positiva descendente: Iniciada por um canal descendente carregado positivamente a partir da região da nuvem carregada positivamente (Figura 2.2(c)).
- Descarga positiva ascendente: Normalmente origina-se de um objeto elevado carregado negativamente e se propaga em direção à região da nuvem carregada positivamente (Figura 2.2 (d)).

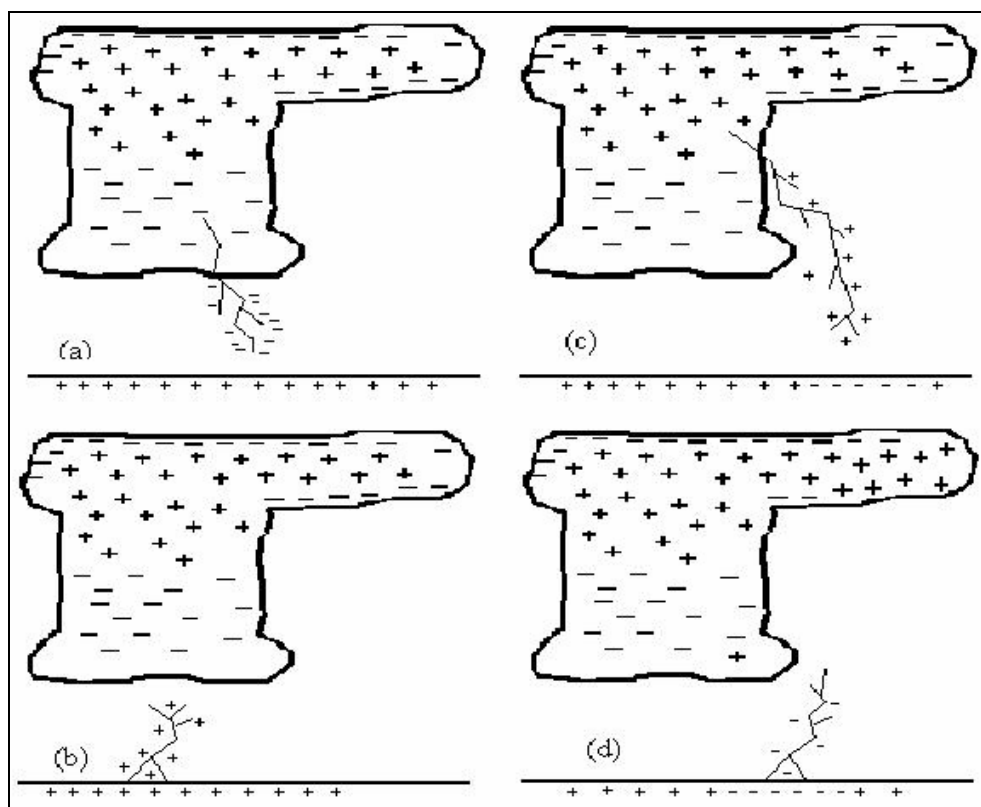


Figura 2.2 – Quatro tipos de descargas atmosféricas nuvem-solo. a) Descarga negativa descendente. b) Descarga negativa ascendente. c) Descarga positiva descendente. d) Descarga positiva ascendente. [Uman, 1994].

As descargas nuvem-solo descendentes de polaridade negativa representam aproximadamente 90% dos casos registrados e os 10% restantes são representados pelos demais tipos [Uman,1994]. Por exemplo, nas medições realizadas na estação “Morro do Cachimbo”, foram observadas que 81% dos casos registrados são de polaridade negativa (ascendentes e descendentes), 16,5% são de polaridade positiva (ascendentes e descendentes) e 2,5% são de polaridade desconhecida [Schroeder et al., 1999].

A seguir, no item 2.4 os processos envolvidos na formação de uma descarga atmosférica são ilustrados com referencia a uma descarga negativa descendente, por ser esta a descarga mais comum.

2.4 Abordagem Simplificada dos Processos Envolvidos na Descarga Atmosférica

2.4.1 Ruptura Preliminar entre as Regiões Positivas e Negativas das Cargas (Preliminary Breakdown)

O processo de evolução da descarga atmosférica é iniciado por uma ruptura preliminar da rigidez dielétrica do ar dentro da nuvem. É necessário que o carregamento da nuvem seja suficiente para produzir uma descarga interna inicial por meio de um fino filamento condutor. Como consequência, grandes quantidades de cargas antes isoladas dentro da nuvem são interligadas por finas estruturas de filamentos condutores na forma de uma extensa rede. As cargas que produzem esta ruptura estão dispostas num meio dielétrico através de partículas de precipitação devido à intensificação do campo elétrico na região da nuvem onde as cargas se concentram.

Tão logo as cargas ocupam uma extensa área suficiente para criar uma polarização, o condutor carregado, que daí resulta, pode então suprir a corrente necessária para formar uma ligação elétrica entre cargas de sinais contrários. Uma descarga somente se inicia se um campo elétrico intenso (ordem de 10^5 a 10^6 V/m) é estabelecido na base da nuvem [Uman, 1994], [Uman, 1989].

2.4.2 Canal Precursor de Descargas (Stepped-Leader)

Ao final do processo de quebra de rigidez, ocorrem rupturas sucessivas do ar formando o canal precursor de descarga (outras vezes chamado de líder escalonado). O canal precursor se propaga em direção a Terra por um caminho tortuoso e em passos sucessivos, conforme Figura 2.3.

Os passos do canal têm uma duração típica de $1 \mu\text{s}$ e dezenas de metros de comprimento (entre 10 e 50 m) e evoluem buscando o caminho mais fácil para a formação de um canal para a

propagação de cargas para o solo [Uman, 1994] e [Uman, 1988]. Entre cada passo, existe uma pausa em torno de 20 a 50 μs , de acordo com [Uman, 1984], e entre 30 e 50 μs [Berger, 1975].

Normalmente, ocorrem ramificações na propagação destes canais em direção ao solo, sendo que grande parte se perde no ar. A velocidade média de propagação do canal é em torno de 200 km/s. A carga transferida pelo *stepped-leader* é em torno de 5 C no sentido do solo, em um tempo médio de algumas dezenas de milissegundos. A corrente média do canal precursor situa-se entre 100 e 1000 A [Uman, 1994], [Uman, 1984].

Quando o canal precursor se encontra a algumas dezenas de metros de distância do solo, a diferença de potencial existente entre a ponta do líder e o solo atinge valores em torno de 10^7 volts [Uman, 1994]. Isto faz com que o campo elétrico sob a ponta do líder se torne muito elevado, criando condições para que ocorra a indução de um ou mais canais ascendentes do solo, os quais irão concorrer para o fechamento com o canal descendente. Quando ocorre a conexão entre os canais, inicia-se o processo de propagação da onda de corrente pelo canal formado.

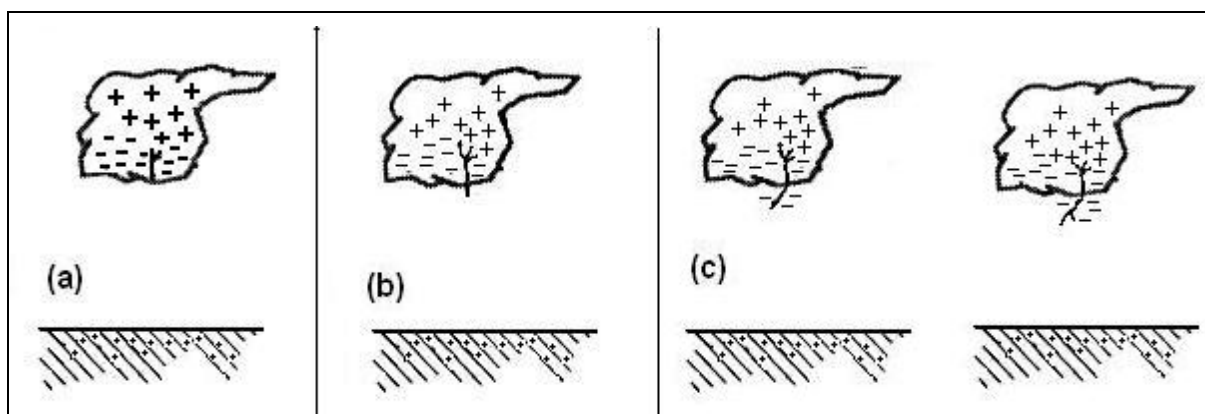


Figura 2.3 - Processos de formação de descargas. a) Ruptura preliminar entre as regiões positivas e negativas. b) e c) canal precursor de descarga "stepped leader".

2.4.3 Processo de Conexão

Os canais ascendentes normalmente se formam a partir de árvores, prédios, torres ou mesmo pessoas quando se encontram em locais abertos. A Figura 2.4 mostra o início do processo de conexão entre o canal precursor de descarga e o canal ascendente.

Quando os canais se encontram, definem o ponto de junção e, completando o canal, produzem a primeira descarga de retorno.

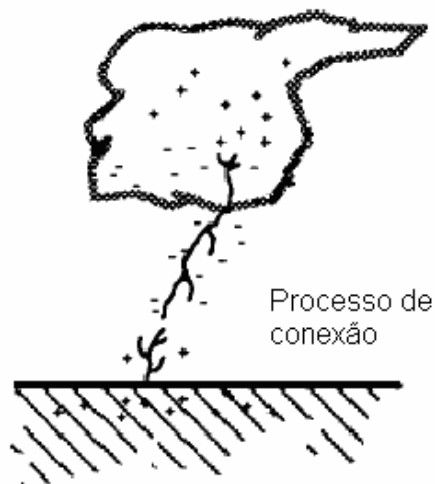


Figura 2.4 – Etapa de processo de conexão.

2.4.4 Primeira Corrente de Retorno

No momento em que ocorre o fechamento (conexão) do canal entre nuvem e solo, é estabelecida uma onda de corrente de alta intensidade, chamada de corrente de retorno (*return stroke*), que se propaga pelo canal, neutralizando as cargas ali acumuladas pelo canal precursor da descarga, Figura 2.5. A velocidade de propagação dessa corrente é maior que 1/3 da velocidade da luz (10^8 m/s) [Uman, 1994]. Próximo do solo a velocidade é mais alta e, à medida que se aproxima das nuvens, a velocidade diminui. O tempo de trânsito típico da propagação desta corrente ao longo do canal é de $100\mu\text{s}$ [Uman, 1994] e [Uman, 1984].

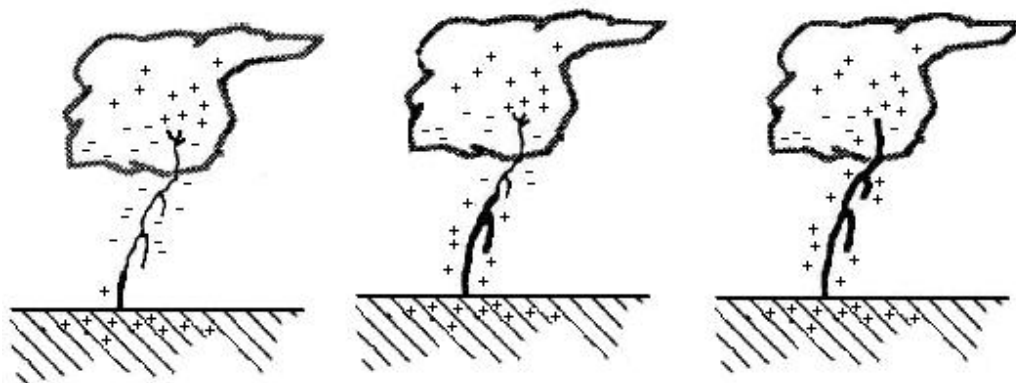


Figura 2.5 – Evolução da etapa de corrente de retorno.

A corrente de retorno negativa possui uma amplitude mediana de cerca de 30 kA, com variação desde uns poucos quiloampères até centenas de quiloampères, tempo de frente de poucos microssegundos e tempo de cauda em torno de 50 μ s, de acordo com [Uman, 1994 e 1984], [Visacro, 2004a].

A temperatura do canal pode atingir 30000 °K e alcançar valores elevados de pressão. O ar ao redor do canal se expande abruptamente, comprimindo o ar na sua vizinhança, quase sempre resultando em uma onda sonora denominada trovão.

Após uma descarga de retorno percorrer o canal, a descarga pode terminar. Entretanto, na maioria dos casos, após uma pausa de 30 a 60 milissegundos, pode ocorrer o recarregamento do canal de descarga, resultando em uma nova corrente de retorno.

2.4.5 Correntes de Retorno Subseqüentes

O recarregamento do canal, na maioria das vezes, ocorre ao longo do caminho principal que se encontra ionizado pela passagem da primeira corrente de retorno. Em alguns casos, pode ocorrer a utilização de parte do canal ionizado e, em seguida, percorrer um novo caminho em direção ao solo, levando, assim, a incidência em um diferente ponto do solo. Usualmente, tal ocorrência acontece para intervalo de tempo inferior a 100 ms após a corrente de retorno anterior. Caso isso não aconteça, o canal ionizado tende a se dissipar. Muito raramente este tempo é excedido, alcançando um limite da ordem de 500 ms.

O número médio de descargas de retorno em uma descarga nuvem-solo negativa é cerca de 3 a 5, podendo chegar a um número elevado como 26 eventos, conforme referência [Rakov e Uman, 1990].

A Figura 2.6 mostra as etapas das correntes de retorno subseqüentes, que geralmente possuem velocidades de propagação da corrente mais elevada, frentes de ondas mais rápidas e na maioria das vezes intensidades menores que as da primeira corrente de retorno.

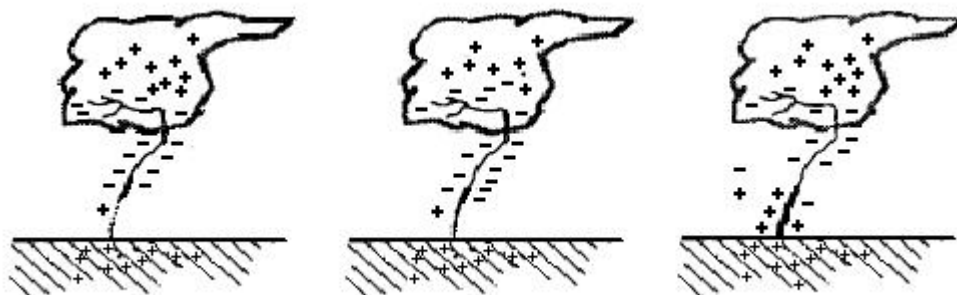


Figura 2.6 – Evolução da corrente de retorno subsequente.

As medições realizadas na Estação do Morro do Cachimbo apresentam valores medianos de intensidades de corrente em torno de 45 kA para a primeira corrente de retorno e de 16,3 kA para as correntes de retorno subsequentes [Visacro et al., 2004].

2.5 A Componente Contínua da Corrente de Descargas Atmosféricas

2.5.1 Definição da Componente Contínua

Considera-se que a corrente de retorno de um *stroke* cesse usualmente após 1 ms. A literatura indica uma duração máxima de 3 ms. Frequentemente, após o fluxo desta corrente, passa a fluir pelo canal de descarga uma corrente de baixa amplitude. Esta pode ocorrer após o único *stroke* de uma descarga (principalmente no caso de descargas positivas) e mais frequentemente nos intervalos *interstrokes* ou ao final de uma seqüência de *strokes* em *flash* negativo com várias descargas individuais.

Esta corrente é conhecida como a componente contínua (CC) e, segundo Rakov, é definida pelo baixo nível de corrente (ordem de dezenas a centenas de ampères), tendo uma duração de algumas dezenas a centenas de milissegundos [Rakov, 2003]. A Figura 2.7 ilustra esta componente. A corrente contínua pode ser vista como um arco quase estacionário entre a fonte de carga da nuvem e a terra, ao longo do trajeto criado pela seqüência ou seqüências da corrente de retorno da descarga [Rakov e Uman,1990]. A literatura inglesa designa esta componente como “*continuing current*”. Vale aqui diferenciar a componente contínua, daquela

parcela de corrente lenta que antecede a primeira corrente de retorno, associada à constituição do canal ascendente e referida na literatura como “*continuous current*”.

Segundo Vlad Mazur [Mazur, 1989], toda descarga individual (*stroke*) é seguida por uma componente contínua, ainda que de duração muito reduzida, da ordem de milissegundos. Para a Engenharia, em função de sua capacidade de dissipar energia, interessa sobretudo a componente contínua de corrente que se mantém no canal por um longo período após uma ou mais descargas de retorno. Esta componente é conhecida como componente contínua de longa duração (CCLD). Pode ocorrer nas descargas nuvem-solo, fluindo após a primeira descarga de retorno ou após alguma das descargas subseqüentes. Frequentemente, esta corrente contém alguns surtos (transientes) que amplificam a corrente por intervalos de tempo da ordem de uns poucos milissegundos. São designados componentes M. As componentes M (pulso de corrente), superpostas à CC, têm separação de tempo da ordem de alguns milissegundos [Thottappillil, 2000] [Thottappillil et al., 1995] [Jordan et al., 1995].

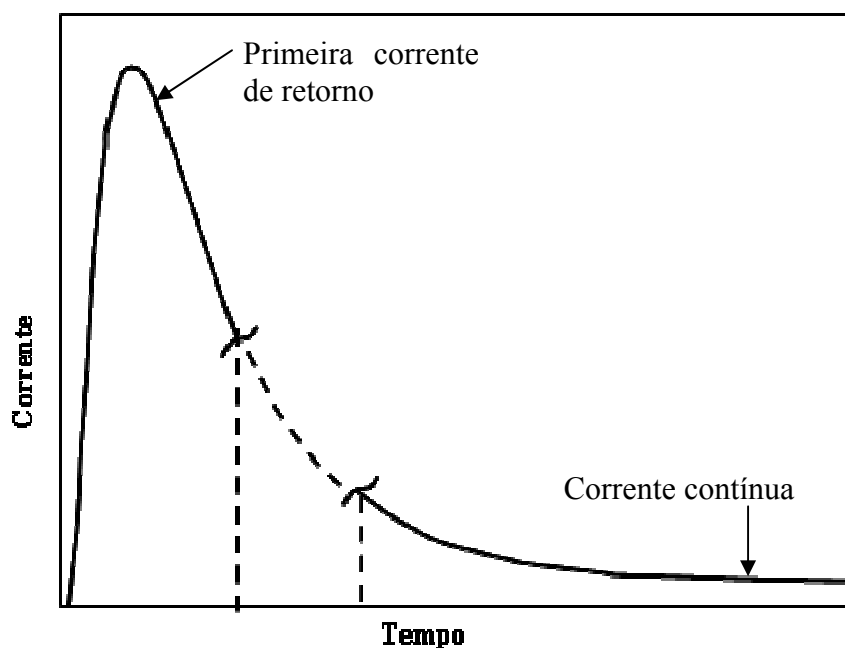


Figura 2.7 – Representação da onda típica da corrente de descarga.

A maioria das informações publicadas na literatura técnica a respeito da ocorrência da componente contínua, é para descargas negativas.

Embora existam outras definições para a corrente contínua de descargas, frequentemente é sugerida aquela apresentada em [Shindo e Uman, 1989] e [Kitagawa et al., 1962], que é definida a partir da observação da variação do campo elétrico associado à descarga:

- A corrente contínua “de curta³ duração” é definida por uma mudança similar do campo elétrico com uma duração entre 10 a 40 ms.
- A corrente caracterizada por uma mudança similar de campo com uma duração entre 1 a 10 ms é definida como corrente contínua “questionável”, devido à incerteza da classificação correta do tipo da corrente (duração relativamente pequena).
- Quando o tempo da corrente excede os 40 ms é denominado corrente de longa duração.

O comportamento do campo elétrico, que permite identificar a componente contínua da corrente, se caracteriza por uma variação lenta e longa do campo elétrico com mesma polaridade que a da corrente de retorno. Este comportamento foi observado sistematicamente nos registros adquiridos por [Kitagawa et al., 1962] e [Brook et al., 1962] no Novo México. A Figura 2.8 ilustra tal variação para uma descarga atmosférica com quatro correntes de retorno. A componente contínua da corrente acontece depois da terceira corrente de retorno, tendo um tempo aproximado desta componente de 200 ms [Rakov e Uman 1990].

Historicamente vários pesquisadores têm se dedicado à investigação específica da componente contínua da corrente de descarga, podendo-se citar [Miki et al., 2002], [Asakawa et al., 1997], [Krehbiel et al., 1979], [Heidler et al., 2001], [Brook et al., 1962], [Wang et al., 1999], entre outros. Alguns trabalharam com a medição direta da componente contínua de descarga em torres instrumentadas [Asakawa et al., 1997] e [Miki et al., 2002]; outros analisaram a componente contínua da descarga a partir das medições do campo elétrico [Brook et al., 1962] e [Heidler and Hopf, 1998]. Também a componente contínua é caracterizada em medições de descargas artificiais [Wang, 2002], [Rakov and Uman, 1990].

³ N. Kitagawa e M. Brook definiram esta componente simplesmente com uma duração menor que 40 ms [Kitagawa et al., 1962] e [Brook et al., 1962].

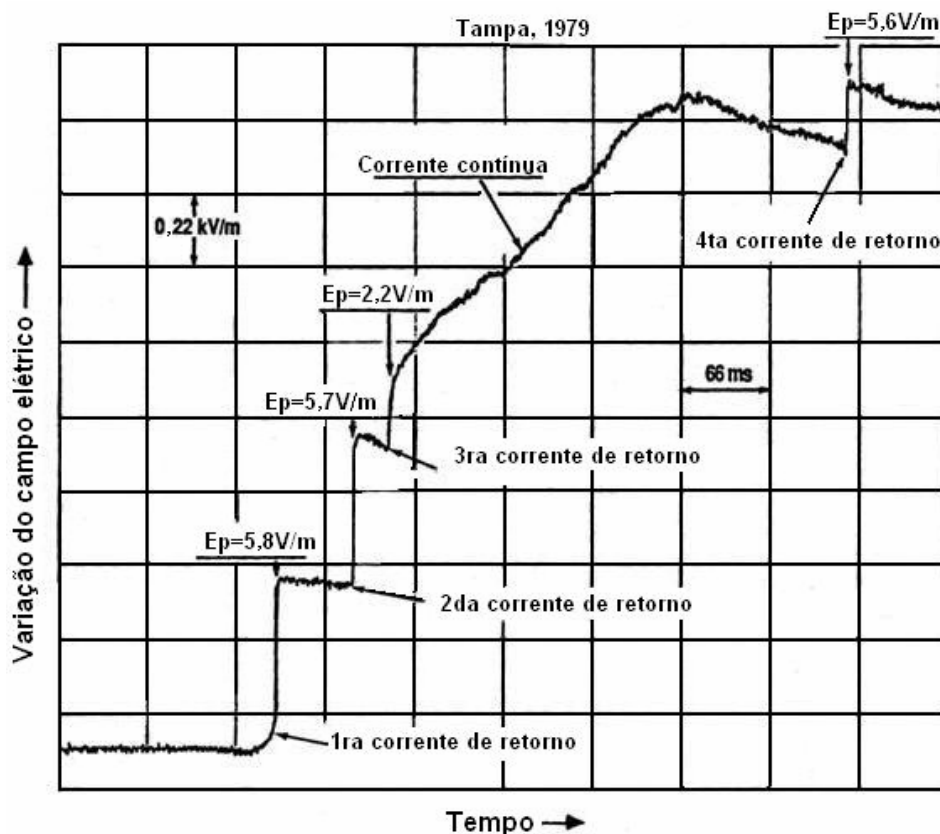


Figura 2.8 - Variação do campo elétrico da descarga atmosférica com quatro *strokes*. A componente contínua acontece depois do terceiro *stroke* [Rakov e Uman 1990].

2.5.2 Padrões de Comportamento Observados na Ocorrência de Componente Contínua de Longa Duração

Rakov e Uman [Rakov e Uman, 2003] sugerem um padrão para o início de uma corrente contínua de longa duração (CCLD). Tal padrão possui as seguintes características:

- *Strokes* que iniciam correntes contínuas de longa duração tendem a apresentar pico inicial de campo elétrico menor que os picos associados aos *strokes* “regulares”. Os *strokes* regulares são definidos como *strokes* que não iniciam CCLD, também não precedem o *stroke* que inicia CCLD e não ocorrem após um intervalo de corrente contínua de longa duração.
- *Strokes* que precedem aqueles que iniciam CCLD são caracterizados por apresentarem valores de pico inicial de campo elétrico relativamente maior que os picos associados aos *strokes* regulares.

- *Strokes* que iniciam CCLD são usualmente precedidos por intervalos *interstrokes* relativamente curtos.

2.5.3 Formatos da Componente Contínua

Em [Fisher et al., 1993], propõe-se a classificação da forma de onda da corrente contínua em quatro tipos, considerando o perfil de evolução da sua onda ao longo do tempo.

A Figura 2.9 mostra os quatro tipos propostos originalmente por Fisher. Posteriormente, outros autores também utilizaram a classificação, como no caso de [Rakov,1999] [Rakov et al., 1994]. As do tipo I (Figura 2.9a) decaem de forma quase exponencial, com componentes-M superpostas. As do tipo II (Figura 2.9b) apresentam superposição de componentes-M seguida por uma diminuição bastante suave e quase exponencial no formato da onda. O tipo III (Figura 2.9c) abrange aquelas descargas em que se dá um lento e progressivo aumento no nível da corrente seguida por uma diminuição também lenta, ocorrendo várias componentes-M superpostas à onda. Finalmente, o caso do tipo IV (Figura 2.9d) tem formato de onda semelhante ao do tipo II, seguido por um patamar de valor praticamente constante que persiste até um rápido decaimento exponencial.

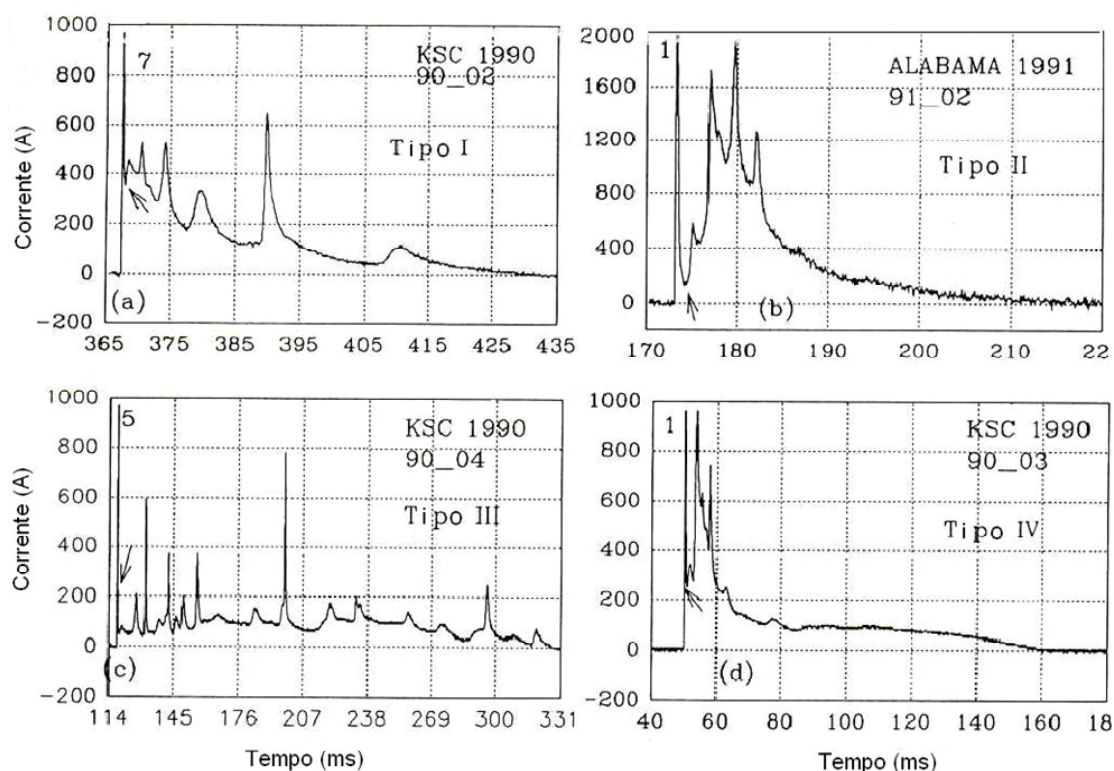


Figura 2.9 – Formatos da corrente contínua [Fisher et al., 1993].

A grande maioria (cerca de 80%) das descargas que contêm a corrente contínua é do tipo I e tipo II.

2.5.4 *Estatísticas de Ocorrência da Corrente Contínua*

Atualmente, existem poucos pesquisadores que investigam a componente contínua de corrente de descarga. A seguir, serão apresentadas algumas estatísticas de ocorrência da componente contínua encontrados na literatura técnica. A maioria destas estatísticas refere-se a descargas nuvem-solo.

As estatísticas apresentadas referem-se às componentes contínuas que foram analisadas a partir da variação do campo elétrico e de dados obtidos de medições diretas em descargas artificiais.

(a) A Corrente Contínua em Descargas Negativas e Positivas

Cerca de 50% das descargas múltiplas contêm a componente contínua da corrente [Thottappillil, 2000]. E segundo [Rakov et al., 2003], cerca de 70% de todas as descargas contêm a corrente contínua.

Em [Heidler e Hopf, 1998], Heidler apresentou também estatísticas sobre a componente contínua, obtidas de medições realizadas na torre de Peissenberg, considerados nos parágrafos seguintes. Tais estatísticas devem ser consideradas em separado das demais estatísticas apresentadas neste tópico, pois a maior parte das correntes se referem a descargas ascendentes.

As demais estatísticas são baseadas em registros de câmara e em descargas induzidas por foguetes, em sua maior parte descargas descendentes.

Das medições do campo elétrico realizado nas proximidades de Munique, Alemanha [Heidler e Hopf, 1998], entre 1984 e 1993 afirma-se que cerca de 25,7% de um total de 109 descargas não possuía a componente contínua. Entretanto, cerca de 12,8% de todas as medições (total 145) continham três componentes: componente contínua da corrente, componente M superposta a CC e corrente de retorno subsequente. Cerca de 21% das descargas que possuíam corrente de retorno subsequente continham a componente contínua subsequente.

No período 1992 a 1998 [Heidler et al., 2001] foram registradas descargas nuvem-solo na torre de telecomunicações - *Peissenberg*, na Alemanha. Neste período, foi armazenado um total de 145 descargas, aproximadamente 2/3 continham componente contínua e 1/3 destas descargas continham impulsos (componente M) superpostos à componente contínua.

A Figura 2.10 mostra um exemplo típico da variação do campo elétrico durante uma descarga negativa. A figura foi identificada a partir de uma imagem de vídeo do canal iluminado de descarga e observações de campo elétrico [Heidler e Hopf, 1998]. A duração da componente contínua é de aproximadamente 200 ms.

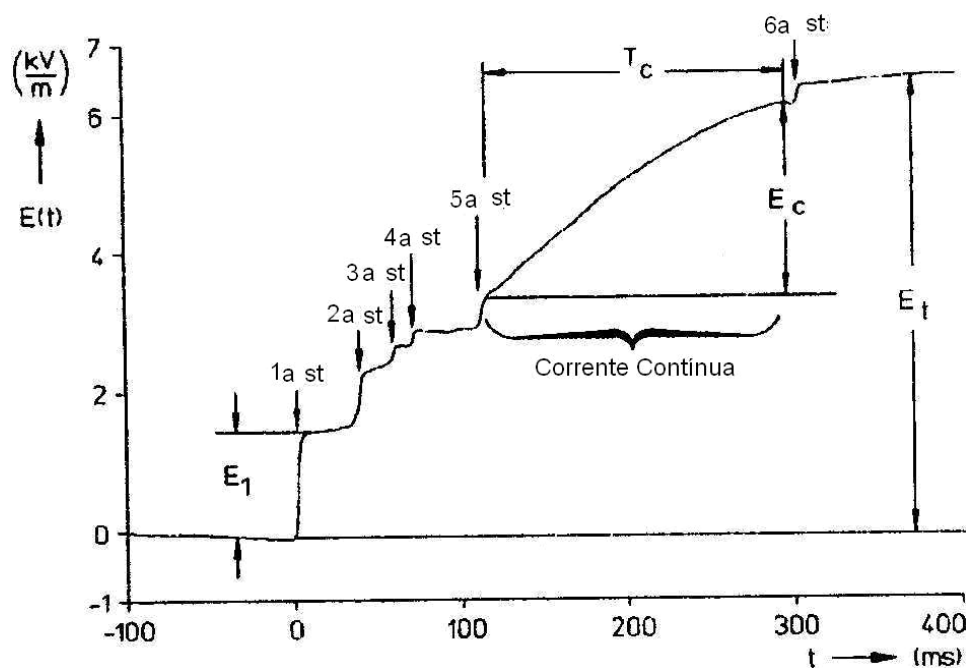


Figura 2.10 – Variação do campo elétrico para uma descarga negativa com CC depois do 5º *stroke* (st); E_c (variação lenta do campo elétrico); T_c (tempo da variação lenta do campo elétrico); [Heidler e Hopf, 1998].

Na Tabela 2.1 são mostradas algumas estatísticas das medições realizadas em Munique como o número de correntes de retorno, tempo de duração da componente contínua e duração total da descarga. Na tabela observa-se que a componente contínua contém uma duração mínima de 67 ms e máxima de 551 ms. Segundo [Kitagawa et al., 1962] este tempo varia de 40 a 500 ms. Segundo [Heidler e Hopf, 1998] o tempo de duração média da componente contínua foi de 221 ms. Para efeitos de comparação, o tempo médio da CC é de 229 ms (duração da luminosidade) segundo [Kitagawa et al., 1962] e 115 ms segundo [Shindo e Uman, 1989].

	Nº de descargas de retorno	Duração da componente contínua (ms)	Duração do <i>flash</i> (ms)
Média aritmética	4,79	221	444
Desvio padrão	2,08	103	180
Máxima	11	551	837
Mínima	1	67	148
5 %	8,54	391	755
95 %	2	82,7	193

Tabela 2.1 - Características de 47 descargas negativas com componente contínua [Heidler e Hopf, 1998].

Heidler e Hopf [Heidler e Hopf, 1998] também reportaram que a máxima duração de uma descarga foi de 431 ms para uma descarga positiva com quatro correntes de retorno e cerca de 837 ms para uma descarga negativa com 11 correntes de retorno. O tempo médio das descargas negativas medidas pelos autores foi de 282 ms e 160 ms para as descargas positivas.

Das 47 descargas com componente contínua (Tabela 2.1) 44% ocorreram após a última corrente de retorno. Segundo [Thomson,1980], 9 (56%) registros continham componente contínua depois da última corrente de retorno de um total de 16 descargas.

Cerca de 48% das descargas negativas medidas por [Heidler e Hopf, 1998] continham ao menos uma componente contínua de corrente. Segundo [Thomson,1980], em aproximadamente 47% (total de 34 descargas múltiplas) tiveram ao menos uma corrente contínua. Em [Livingston e Krider, 1978] a porcentagem das descargas que contêm correntes contínuas variam de 29% a 46% e segundo [Shindo e Uman, 1998] 22 (19%) descargas de um total de 90 descargas negativas registradas contêm a corrente contínua.

Os dados apresentados na Tabela 2.2 são baseados nas medições realizadas por [Kitagawa et al., 1962] no período de 1959 – 1960, Socorro - Novo México. Observa-se que 88 (46%) descargas de um total de 193 descargas analisadas continham a componente contínua da corrente.

Tipos	Total de descargas	Descargas sem componente contínua	Descargas com componente contínua
Descargas simples	27	25	2
Descargas múltiplas	166	80	86
Total de descargas sem CC	-	105	-
Total de descargas com CC	-	-	88

Tabela 2.2 - Classificação de um total de 193 descargas nuvem-solo [Kitagawa et al., 1962].

Na Tabela 2.2, também pode-se observar que 166 descargas são múltiplas (várias correntes de retorno) e aproximadamente 51% (86) destas contêm a componente contínua. De um total de 27 descargas com uma única corrente de retorno, 7% (2) possui componente contínua.

Noventa descargas negativas nuvem-solo foram medidas por [Shindo e Uman, 1989] na cidade de Tampa, Florida (Tabela 2.3). Destas, 40 descargas continham a componente contínua. Somente 3 de um total de 19 descargas simples continham a CC (os números entre parênteses referem-se a dados de descargas simples). Segundo [Heldler e Hopf, 1998], 5% das descargas analisadas continham a CC e eram de tipo simples e segundo [Rakov e Uman, 1990] 6% das descargas únicas continham a CC e 49% das descargas múltiplas continha CC. Cerca de 80% de todas as descargas negativas são de tipo múltiplo, portanto existe maior probabilidade de acontecer a CC [Thottappillil, 2000], [Rakov, 2000].

	Descargas sem CC	Descargas com CC	Total de descargas
Número	50 (16)	40 (3)	90 (19)
Nº de descargas por <i>flashes</i>	141(16)	237 (3)	378 (19)
Nº de intervalos entre <i>strokes</i>	74	197	271

*Os valores entre parêntesis indicam os números relativos a descargas com uma única corrente de retorno.

Tabela 2.3 – Dados analisados por [Sindo e Uman, 1989].

No período de 1993 a 1997, na torre de telecomunicações de Peissenberg foram avaliados 392 registros e um total de 104 descargas continham a componente contínua de corrente [Fuchs, 1998a] [Zundl, 1996]. Na Figura 2.11 é mostrada a forma típica da onda da corrente

medida em Peissenberg. Observa-se que alguns impulsos são superpostos na CC e outros impulsos acontecem depois da CC. Em algumas descargas a CC também acontece depois do último *stroke*.

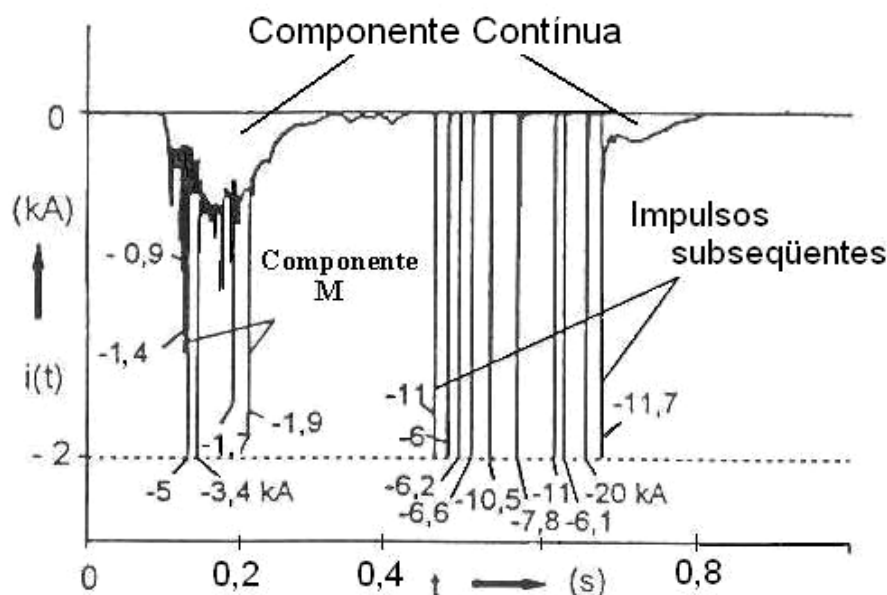


Figura 2.11 – Medição de corrente de descargas na torre de Peissenberg [Heidler et al.,2001].

Na Figura 2.12 mostra-se as ondas de corrente medidas em descargas artificiais em Alabama. A máxima amplitude medida foi de 2 kA. Na figura todas as correntes de retorno são numeradas. O maior pulso contendo a componente M acontece depois do terceiro *stroke* conforme é mostrado na Figura 2.12 (a) e o pulso maior da corrente contínua inicial na Figura 2.12(b), onde ICC indica a componente contínua inicial; CC a componente contínua propriamente dita. Note que a ICC é maior na Figura 2.12(b) [Rakov et al., 2001].

Para garantir a existência da componente contínua da corrente na descarga atmosférica, o número médio de *strokes* deve ser de 6 a 7 [Rakov e Uman,1990]. Entretanto, [Thottappillil, 2000] descreve que o número de *strokes* em descargas negativas deve ser de 4, desta forma existiria uma grande possibilidade de garantir pelo menos uma CC na descarga.

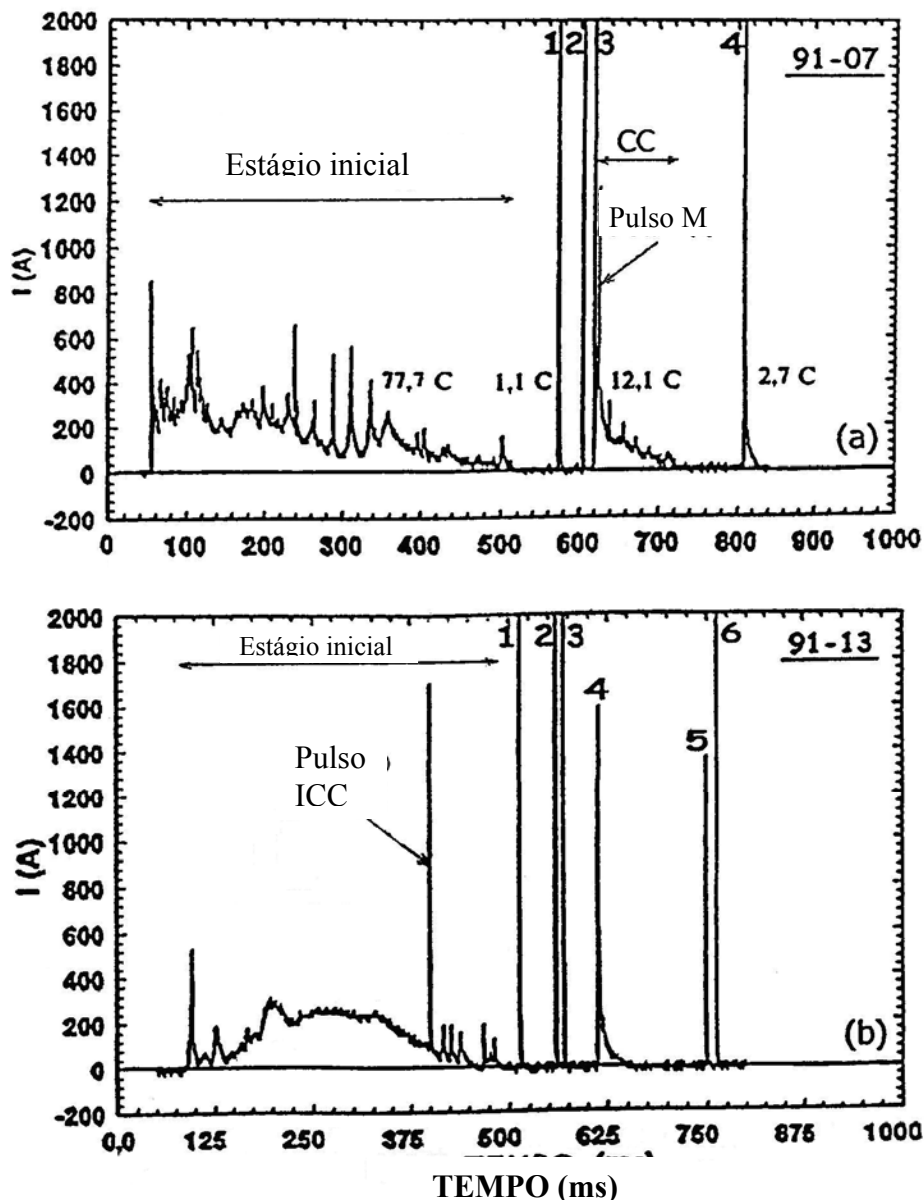


Figura 2.12 – Onda de corrente medida em descargas artificiais [Rakov et al., 2001].

De acordo com [Schonland, 1956] aproximadamente 20% de todas as descargas medidas na África do Sul continham ao menos uma componente contínua (número total da descarga não mencionada). Segundo [Thomson, 1980], em Papua, Nova Guiné, aproximadamente 47% de um total de 34 descargas múltiplas continha a contínua da corrente.

A Tabela 2.4 mostra a comparação das medições das descargas medidas por Rakov na Flórida, no ano de 1979, e por Kitagawa em Novo México, no ano de 1959.

	Tampa, Flórida [Rakov e Uman,1990]	Socorro, Novo México [Kitagawa et al., 1962]
Tipo de medição	Campo elétrico, 1979.	Gravações fotográficas e medição de campo elétrico, 1959.
Nº total de descargas	63	72
Descargas contendo corrente contínua	27 (43%)	36 (50%)
Ocorrência de CC no final de uma descarga	11 (17%)	16 (22%)
Descargas com pelo menos duas componentes CC	0	4 (6%)
Descargas que contêm CC com diferente terminação do canal de propagação	1	3
Nº médio de canais por descargas Sem CC Com CC	1,6 (1,9) 1,3 (1,6)	1,8 1,7
Nº médio de <i>strokes</i> por descarga durante os intervalos dos <i>strokes</i> Sem CC Com CC	4,3 8,5	7,2 8,5
Descargas com CC no final do evento	3,8	5,5
Total de descargas contendo CC	6,6	7,2

Tabela 2.4 - Comparação das medições de descargas atmosféricas com e sem componente contínua [Rakov e Uman, 1990].

Na Tabela 2.4 pode-se observar que o número total de descargas múltiplas medidas na Flórida foi de 63 e no Novo México foi de 72, dos quais 27 e 36 continham a componente contínua respectivamente. Observou-se que 4 descargas no Novo México tiveram 2 componentes contínuas por descarga.

(b) A CCLD Relacionada ao Número de *Strokes* por *Flash*

A porcentagem da componente contínua de longa duração versus o número de *strokes* por *flash* é mostrada na Figura 2.13, onde a parte mais escura (sombreado) de cada coluna da

figura indica que a componente contínua da descarga acontece depois da última corrente de retorno. Os números mostrados na parte superior de cada coluna da Figura 2.13 indicam o número total de *flashes* medidos.

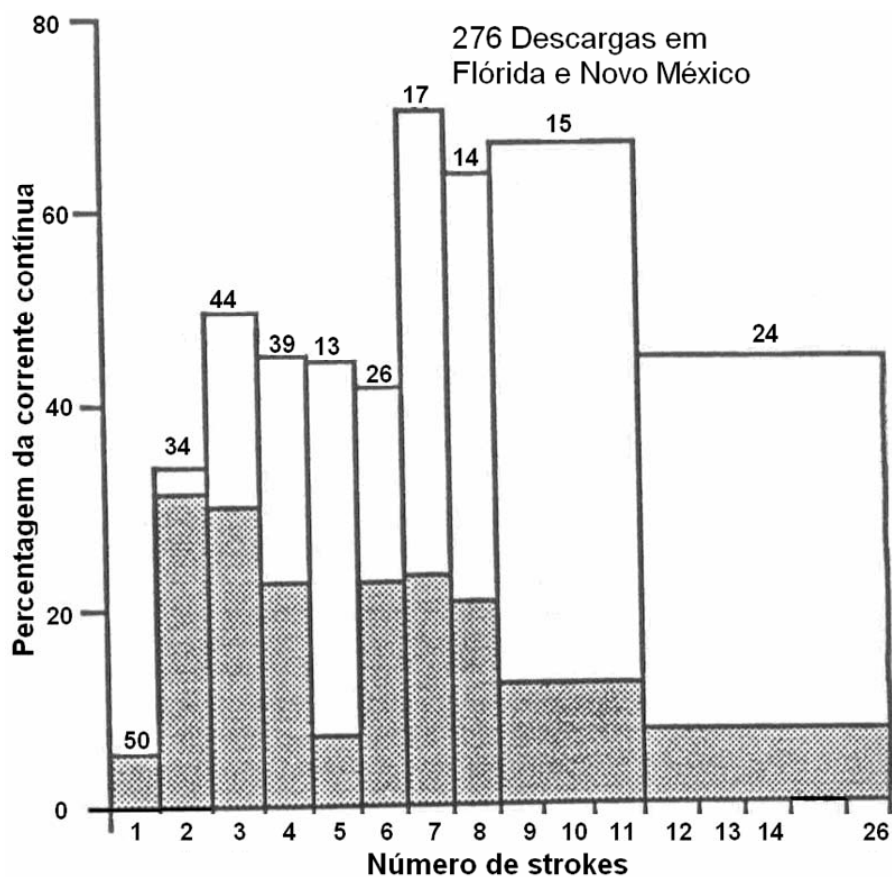


Figura 2.13 - A CCLD relacionado ao número de *strokes* por *flash* [Rakov e Uman,1990].

Para melhor compreensão do gráfico, é extraído um exemplo de resultado indicado a seguir: cerca de 12% dos *flashes* (34 de 276) apresentaram 2 *strokes* por *flash*. Cerca de 35% dos *flashes* com multiplicidade 2 apresentam CCLD, sendo que a maioria desses apresentaram a CCLD ao final do segundo *stroke* (cerca de 33% do número de *flashes* de multiplicidade 2).

Aproximadamente 3 (6%) de um total de 50 descargas com uma única corrente de retorno contém a componente contínua de longa duração (1 de um total de 23 na Flórida e 2 de 27 no Novo México), e cerca de 49% de um total de 226 descargas múltiplas continha a componente contínua (48% de um total de 126 descargas na Flórida e 51% de um total de 100 descargas no Novo México). De 111 descargas com componente contínua de longa duração 46% tinham CC

após o último *stroke* (47% de 60 descargas na Flórida e 45% de um total de 51 descargas no Novo México).

A Tabela 2.5 indica alguns estudos de relevância apresentados na literatura, referentes à ocorrência da corrente contínua de longa duração. Também são indicados os parâmetros analisados em cada uma das referências.

Localização e Referência	Tipo de medições	Total de descargas	Descargas com CC	Parâmetros analisados nas referências
Tampa, Flórida [Rakov e Uman,1990]	Uma estação de campo elétrico, e várias estações de TV em 3 tempestades, 1979.	76	28	- N° de <i>strokes</i> por <i>flash</i> - Ordem de <i>stroke</i> - Intervalo entre <i>strokes</i> - Duração do líder - Amplitude do campo elétrico
KSC, Florida [Rakov e Uman,1990]	Uma estação de campo elétrico em 11 tempestades, 1976-77.	57	23	- N° de <i>strokes</i> por <i>flash</i> - Ordem de <i>stroke</i> - Intervalo entre <i>strokes</i>
Gainesville, Florida [Rakov e Uman,1990]	Uma estação do campo elétrico em 2 tempestades, 1982.	4	3	- N° de <i>strokes</i> por <i>flash</i> - Ordem de <i>stroke</i> - Intervalo entre <i>strokes</i>
KSC, Florida [Rakov e Uman,1990]	Uma estação de campo elétrico em 1 tempestade, 1984.	4	3	- N° de <i>strokes</i> por <i>flash</i> - Ordem de <i>stroke</i> - Intervalo entre <i>strokes</i>
KSC, Florida [Livingston e Krider, 1978]	Uma estação de campo elétrico em 2 tempestades, 1975.	8	4	- N° de <i>strokes</i> por <i>flash</i> - Ordem de <i>stroke</i> - Intervalo entre <i>strokes</i>
Socorro, Novo México [Krehbiel et al., 1979]	Várias estações de campo elétrico em 1 tempestade, 1971.	4	3	- N° de <i>strokes</i> por <i>flash</i> - Ordem de <i>stroke</i> - Intervalo entre <i>strokes</i>
Socorro, Novo México [Kitagawa,Brook, 1962]	Fotografia e uma estação de campo elétrico em 3 tempestades, 1959-1960	193	88	- N° de <i>strokes</i> por <i>flash</i> - Ordem de <i>stroke</i> - Intervalo entre <i>strokes</i> - Carga por <i>stroke</i>

Tabela 2.5.- Dados utilizados para análise da componente contínua da corrente [Rakov e Uman,1990].

(c) A CC relacionada à Ordem do *Stroke*

O histograma da Figura 2.14 apresenta a porcentagem da ocorrência da componente contínua versus a ordem da corrente de retorno, desconsiderando o número de *strokes* por *flashes*. A região sombreada corresponde aos eventos cuja CC ocorre no final do *flash*. O número indicado na parte superior de cada coluna indica o número total de *strokes*.



Figura 2.14 - Relação entre a CCLD e a ordem de corrente de retorno [Rakov e Uman,1990].

A maioria das CCLD é iniciada por *strokes* subsequentes como pode ser observado na Figura 2.14. Um percentual de CCLD muito pequeno é observado para os primeiros *strokes*. Segundo [Rakov e Uman, 2003], somente 2 primeiros *strokes* (Ambos em KSC - Flórida, 1976 - 1977) de um total de 297 descargas com múltiplas correntes de retorno continham a componente contínua de longa duração.

A partir do histograma tem-se que 5,8% (210 de 1363) do número total de *strokes*, são *strokes* de segunda ordem. Desses *strokes*, aproximadamente 5% possuem a CCLD ao final deste evento.

A Tabela 2.6 mostra a porcentagem de *strokes* seguidos por componente contínua de longa duração no final do *flash* em função da ordem do *stroke*, relativo a medições realizadas na Flórida e no Novo México [Rakov e Uman,1990] e [Kitagawa et al., 1962].

Localização geográfica	Ordem de corrente de retorno									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9-11	12-16
Flórida	0,7 (149)	5,6 (126)	5,6 (107)	10,3 (78)	2,1 (47)	8,6 (35)	8,0 (25)	5,9 (17)	0 (25)	0 (19)
Novo México	1,0 (197)	4,8 (84)	9,7 (72)	1,7 (59)	0 (53)	5,8 (52)	5,0 (40)	6,5 (31)	2,8 (72)	2,7 (75)

Tabela 2.6 - Porcentagem da ocorrência da componente contínua no final de *flash* (Os números entre parêntesis indicam o número total de *strokes* desconsiderando o número de *strokes* por *flash*) [Rakov e Uman,1990].

(d) CC Relacionado ao Intervalo de Duração entre Strokes

A percentagem de intervalos entre *strokes* que contém a componente contínua é mostrada na Figura 2.15. O histograma na parte superior apresenta o número total de intervalos entre *strokes*. Encontram-se as maiores probabilidades de ocorrer a CC naqueles intervalos entre *strokes* compreendidos entre 8 e 32 ms.

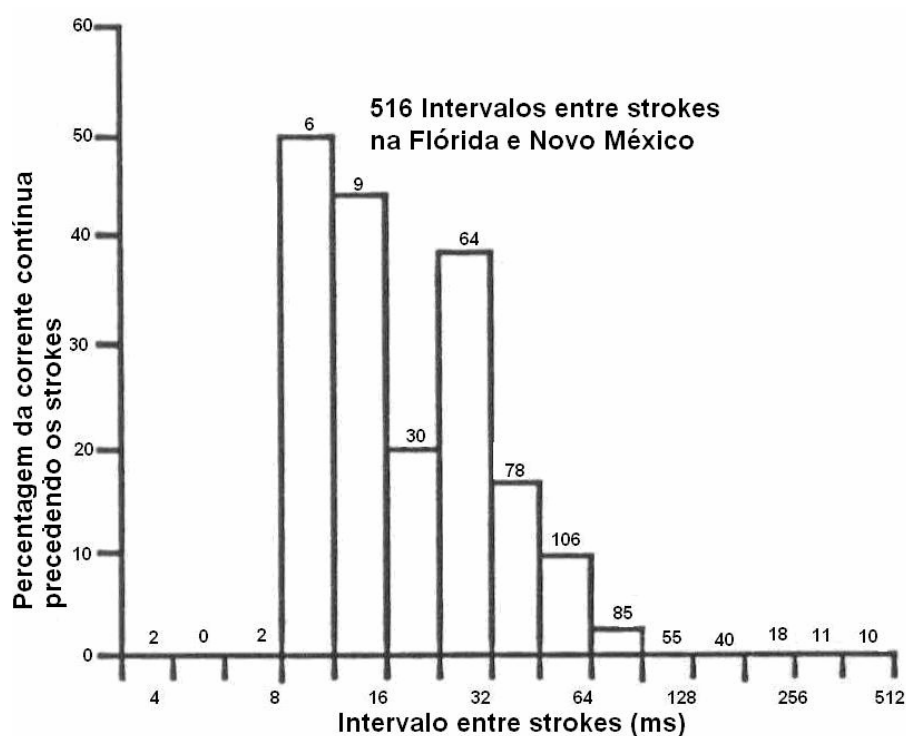


Figura 2.15 – Probabilidade da componente contínua depois do intervalo entre *strokes* [Rakov e Uman,1990].

2.6 Conclusões

As considerações do presente capítulo realçam a necessidade de um conhecimento integral da corrente de descarga para permitir a estimativa realista de seus efeitos, necessária à definição e ao dimensionamento de adequadas ações de proteção contra estes.

Nesta perspectiva é fundamental conhecer os parâmetros de todas as componentes desta corrente. Tradicionalmente, apenas a componente impulsiva tem merecido ações sistemáticas de investigação. A componente contínua de longa duração é capaz de transferir cargas da ordem igual ou superior a um *stroke* e, portanto, promover efeitos térmicos intensos e destrutivos. Esta componente, ainda requer investigações sistemáticas para melhor caracterização de seus parâmetros.

Este cenário enseja o desenvolvimento de sistema de medição capaz de registrar todas as componentes da corrente de descarga, que constitui a motivação principal do presente trabalho.

3 Constituição de um Sistema para Medição de Correntes das Descargas

3.1 Introdução

O fenômeno descarga atmosférica vem sendo largamente estudado por pesquisadores de diversos países ao longo dos anos. Um dos parâmetros de estudo de maior interesse é a forma da onda de corrente da descarga (amplitude, tempo de frente e polaridade).

Conforme descrito no capítulo 2, algumas descargas apresentam componente de corrente de longa duração denominada também componente contínua da descarga atmosférica. Esta componente apresenta amplitude na ordem de algumas centenas de ampères e tempo de duração de centenas de milissegundos, alcançando até 1 segundo em alguns casos. Neste caso precisa-se ter em conta esta característica da onda de corrente para se projetar um sistema de

proteção adequado, já que o tempo de duração da corrente é maior, comparando com a corrente impulsiva que usualmente é estudada.

Visando medir os parâmetros de ambas componentes de corrente de descarga atmosférica em torres instrumentadas, projetou-se construir um transdutor resistivo especial.

Neste capítulo, é apresentado o desenvolvimento de um sistema de medição, para obter dados das correntes de descargas que incidem na torre da estação “Morro do Cachimbo”. São apresentados os aspectos construtivos do transdutor especial e o funcionamento do sistema de medição como um todo.

3.2 *Transdutor Resistivo*

O transdutor resistivo é o mais utilizado para medição de qualquer corrente elétrica, sendo também o mais utilizado para medir correntes de descargas atmosféricas. A intensidade de corrente tradicionalmente é obtida pela lei de Ohm, a partir da tensão medida no transdutor, conforme a Figura 3.1. Tal método apresenta alguns inconvenientes em medição de descargas: a alta corrente, que provoca aquecimento do resistor; a tensão, que causa problemas de isolamento elétrico do sistema de medida e a alta frequência, que acentua o efeito pelicular.

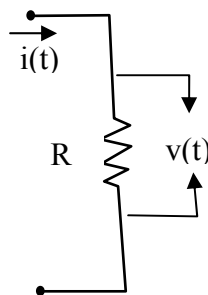


Figura 3.1 – Determinação da corrente por meio do transdutor resistivo.

$$i(t) = \frac{v(t)}{R} \quad (3.1)$$

No caso do transdutor construído (item 3.2.2), tem-se uma indutância. Sendo assim, não mais pode ser utilizada a Equação (3.1) para calcular a corrente. Em vista deste impasse, elaborou-se uma função de correção para recuperar a corrente medida com o transdutor. O procedimento desta elaboração encontra-se no capítulo 4.

3.2.1 *Considerações Gerais Para a Construção do Transdutor Resistivo*

Para efeitos da medição de corrente de descargas atmosféricas em torre instrumentada, foi projetado um transdutor especial. As considerações básicas levadas em conta para execução do projeto são:

- A indutância do transdutor *shunt* deve ser a mínima possível devido às características do sinal de descarga a ser medido [Torres et al, 1999b]. Para contornar este problema, projetou-se um transdutor resistivo coaxial que foi unido na base. Assim, a indutância no dispositivo será minimizada. Neste caso, a corrente fluirá a partir do topo do cilindro interno, saindo pelo topo do cilindro externo. O material resistivo utilizado na construção do dispositivo foi níquel-cromo (Ni80%Cr20), também chamado Nikrothal, porque o valor da resistividade varia pouco com a temperatura.
- Geralmente, a “energia” associada a uma descarga atmosférica é muito elevada. Segundo [Berger,1975], a “energia” da primeira corrente de retorno de uma descarga negativa tem valor mediano $5,5 \times 10^4 \text{ A}^2\text{s}$ ($1 \text{ A}^2\text{s} = \text{J}/\Omega$). No caso das medições da Estação Morro do Cachimbo este valor é um pouco maior: $10,7 \times 10^4 \text{ A}^2\text{s}$. Para a corrente de descarga positiva, Berger indica um valor mediano de $65 \times 10^4 \text{ A}^2\text{s}$. A dissipação da energia de tal magnitude envolve correntes de descarga elevadas que mesmo com curta duração podem aquecer excessivamente o transdutor levando a leitura errada devido à alteração de características elétricas. Para minimizar este efeito construiu-se a parte externa do transdutor resistivo utilizando um material de alta condutividade (alumínio). Este material é unido ao topo do cilindro externo formado pelo material Nikrothal (Figura 3.2).
- Devido ao formato do transdutor resistivo (cilindro coaxial), utiliza-se a parte interna para alojar os equipamentos do sistema de medição (circuito eletrônico, conversores, baterias etc.). Para que estes equipamentos não sofram danos com o eventual calor gerado pelo fluxo da corrente de descarga, construiu-se um cilindro de concreto refratário que tem como principal característica uma boa isolamento térmica. Este é posicionado na parte interna do dispositivo. Este elemento também é utilizado para dar robustez à construção.

O objetivo era desenvolver um sistema para medir a corrente integral de descarga, incluindo a parcela impulsiva e a componente contínua.

No caso da medição de ondas rápidas, o dispositivo deve ser considerado como um resistor em série com uma indutância. Com isto, a onda de tensão medida nos terminais do dispositivo deve ter um tratamento especial. Para converter o sinal de tensão, não deve ser utilizada a lei de Ohm, mas deve ser elaborada uma função de correção para dar um tratamento adequado à forma da onda medida [Gómez et al., 2004], [Gómez et al., 2005].

3.2.2 Aspectos Construtivos do Dispositivo Shunt

O transdutor foi construído no LRC (Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas). Apresenta forma coaxial (Figura 3.2) sendo constituído por um material resistivo. O transdutor possui 325 mm de diâmetro externo e 226 mm de altura. A Figura 3.2 apresenta o corte transversal, com os nomes dos materiais utilizados e suas respectivas dimensões.

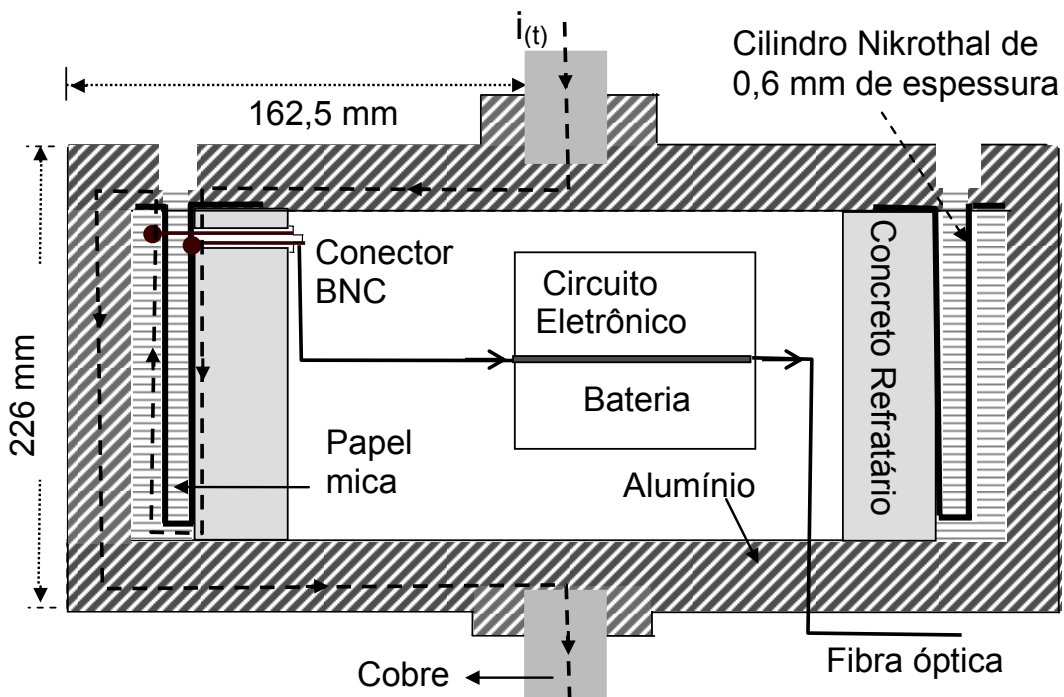


Figura 3.2 - Corte transversal do transdutor resistivo desenvolvido.

Na Figura 3.3, tem-se a tampa superior do transdutor, que foi construída utilizando o alumínio devido a suas propriedades físicas como por exemplo baixa densidade e alta

condutividade e também devido ao baixo custo do mesmo.

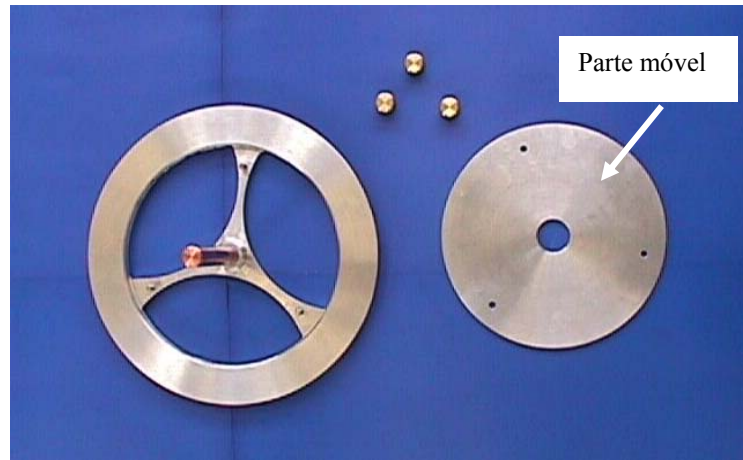


Figura 3.3 – Tampa superior do transdutor resistivo.

Na Figura 3.4, observa-se o corpo do transdutor resistivo construído de material Nikrothal unido à “parede lateral”, que foi construída utilizando o alumínio. Esta “parede” será o “caminho” do fluxo da corrente da descarga para a terra. As duas hastes mostradas nesta figura foram construídas utilizando um tarugo de cobre, que servem para a conexão do transdutor com a torre de 60 m de altura da Estação Morro do Cachimbo.

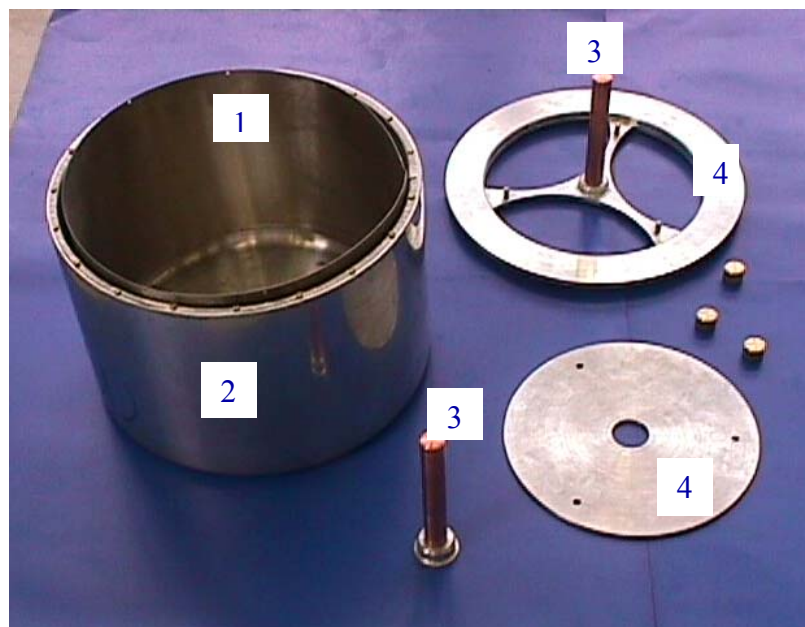


Figura 3.4 - Partes da construção do transdutor *shunt*: (1) parte interna construída com Nikrothal; (2) parede externa composta de alumínio; (3) hastes de cobre; (4) tampa de alumínio.

Na Figura 3.5, apresenta-se o transdutor *shunt* com a parede interna de concreto refratário incorporada. A finalidade desta é garantir o isolamento térmico aos componentes de medição que serão guardados dentro do cilindro e, aproveitando sua consistência, garantir robustez ao dispositivo. Observa-se também na Figura 3.5 que o conector BNC foi adicionado na parte interna para que, por meio deste, seja conectado ao sistema de medição existente e assim poder medir o sinal que flui no dispositivo *shunt*.

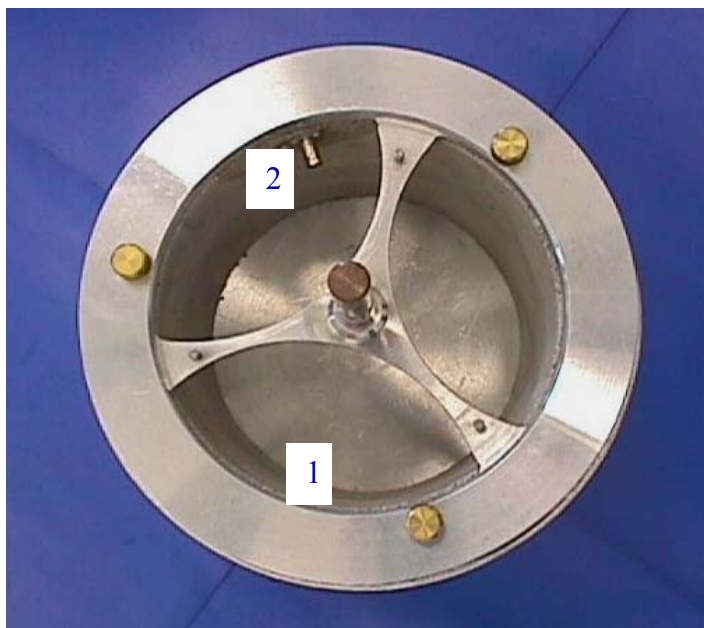


Figura 3.5 – Parte interna do transdutor: (1) Concreto refratário adicionado na parte interna; (2) Conector BNC fixado no cilindro do refratário.

A Figura 3.6 apresenta os tirantes (1) (fixam a tampa e o corpo do transdutor resistivo). Os tirantes foram construídos com latão. Também se encontra incorporado o papel de mica, situado entre as lâminas de Nikrothal e a parte externa de alumínio (2). Este material foi utilizado devido a seu bom isolamento elétrico (aproximadamente de 1,5 kV) com elevada resistência a altas temperaturas.

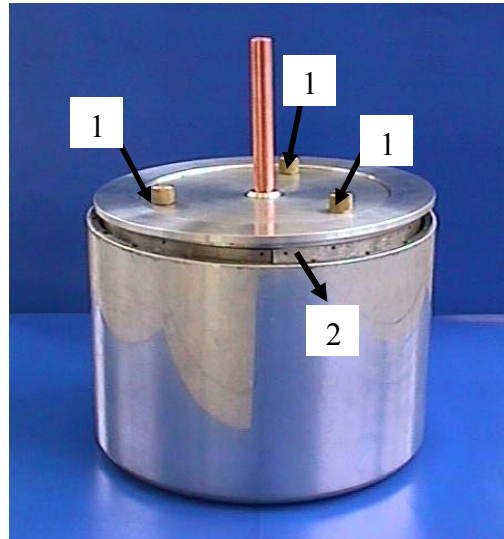


Figura 3.6 - O transdutor resistivo observado de cima: (1) Tirantes; (2) Papel de mica.

Na Figura 3.7, observa-se o dispositivo completo montado, pronto para instalação.



Figura 3.7 - O transdutor resistivo completo.

3.2.3 *Materiais Utilizados*

Durante a fase de projeto da construção do transdutor resistivo, pesquisou-se vários materiais existentes no mercado, objetivando-se a escolha dos materiais que atendessem às necessidades implícitas na medição direta de corrente de descarga, observando-se as propriedades físicas e mecânicas de cada material e também levando em consideração os custos envolvidos. Os principais materiais utilizados na construção do transdutor resistivo estão descritos a seguir.

Nikrothal ou níquel cromo (Ni80%Cr20%) - É uma liga sólida de alta qualidade e alto custo. É um produto de destaque entre materiais resistivos a altas temperaturas. No mercado podem ser encontrados vários tipos de estruturas e espessuras como: fio, fita, chapa etc, de liga resistiva níquel cromo.

Devido à facilidade de manipulação do material Nikrothal e à resistividade quase estável em altas temperaturas (até aproximadamente 1200 °C), o produto é largamente utilizado em aplicações que requerem valor constante da resistência elétrica em altas temperaturas, sendo aplicado em uma série de aparelhos elétricos, eletrodomésticos, fornos industriais, chuveiros e estufas.

Na Tabela 3.1 mostra-se os componentes químicos que compõem a liga Nikrothal. Observa-se que o componente químico de maior quantidade é o níquel (74%), seguido de cromo (21%). As ligas Nikrothal contêm 0,10 % de carbono, substância de menor quantidade.

	C %	Si %	Mn %	Cr %	Fe %	Ni %	Outros elementos
Min	-	1,0	-	19,9	-	79	aprox. 0,1%
Max	0,10	1,7	1,0	21,0	2,0	74	aprox. 0,8%

Tabela 3.1 - Composição química do Nikrothal.

O Nikrothal apresenta outras propriedades importantes, tais quais:

- A resistividade elétrica a 20°C é 1,09 $\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$.
- A densidade é 8,30 g/cm^3 .

Na Tabela 3.2, tem-se o coeficiente de expansão térmica da liga Nikrothal, para várias faixas de temperatura.

Temperatura [°C]	Expansão térmica $\times 10^{-6}K^{-1}$
20 – 250	14,1
20 – 500	14,9
20 – 750	16,0
20 – 1000	17,2

Tabela 3.2 - Coeficiente de expansão térmica.

Alumínio - O alumínio geralmente é encontrado na natureza em forma de silicatos. É um sólido branco de densidade $2,7 \text{ g/cm}^3$, com temperatura de fundição de 660° C . Em estado puro, é leve e maleável.

Sua principal característica é um bom condutor de calor e eletricidade. Uma grande vantagem do alumínio é o baixo peso específico e baixo custo. Por isso, foi escolhido para ser utilizado na parte externa e na tampa do dispositivo. Algumas propriedades físicas e mecânicas do alumínio são citadas na Tabela 3.3.

Peso específico (g/cm^3)	2,71
Temperatura de fusão ($^\circ\text{C}$)	660
Módulo de elasticidade (MPa)	69000
Coeficiente de expansão linear ($L/^\circ\text{C}$)	23×10^6
Condutibilidade térmica 25°C ($\text{Cal/cm } ^\circ\text{C}$)	0,56
Condutibilidade elétrica (IACS)%	62,00
Modulo de elasticidade (Kg/mm)	7000
Ductilidade	17 – 20

Tabela 3.3 - Propriedades físicas e mecânicas do alumínio.

Devido à elevada condutividade elétrica, o alumínio é empregado no setor elétrico (cabos, fios etc.). A grande vantagem do alumínio é a leveza, mas também possui elevada resistência à corrosão, sendo utilizado em diferentes artigos domésticos e industriais etc. Devido à baixa

densidade, o alumínio é utilizado como material de construção mecânica (em carros, aeronaves etc.).

Concreto Refratário - É um bom isolante térmico. Os concretos refratários possuem múltiplas aplicações, por exemplo eles são utilizados nas indústrias siderúrgicas, de cimento, de vidro, petroquímica, e outras, onde são necessárias excelentes propriedades térmicas e outras propriedades mais específicas, como resistência à corrosão, abrasão e choque térmico etc.

O seu emprego é recomendado para temperatura máxima de utilização de até 1.450°C. As características principais das peças moldadas são as seguintes:

- Possibilidade de utilização 20/24 horas após a moldagem.
- Resistência mecânica elevada.
- Resistência às variações bruscas de temperatura.
- Mínimas dilatações e retrações.
- Maleabilidade absoluta de utilização, que permite tanto a moldagem de peças, por mais delicadas que sejam, como a construção de peças monolíticas de muitas toneladas.
- Fácil manipulação; não requer mão-de-obra especializada.

Existem vários tipos de concreto refratário no mercado. O escolhido para utilizar na construção do sistema de medição foi o “CASTIBAR-N”, devido às características encontradas neste tipo de concreto refratário, como alta resistência mecânica (200 kg/cm²) e alta temperatura de suportabilidade (1400 °C). A densidade deste material é de 2000 kg/m³.

Papel de Mica - A mica natural é considerada como um dos melhores isolantes elétricos já conhecidos mundialmente, por apresentar características inigualáveis, sendo, portanto:

- Incompressível.
- Quimicamente inerte.
- Não funde até aproximadamente 550 °C.

Considerando suas propriedades físico-químicas, a mica encerra extensas e variadas aplicações industriais.

O papel de mica foi utilizado na construção do dispositivo devido ao fato de possuir baixa condutividade elétrica (a mica é um bom isolante e um bom dielétrico), sendo resistente a altas temperaturas (550°C).

3.3 Características de Componentes Utilizados no Sistema de Medição

O transdutor resistivo é o componente mais importante do sistema de medição desenvolvido e possui uma resistência elétrica de 0,75 mΩ. O valor da resistência foi calculado matematicamente, utilizando a seguinte fórmula: $R = \frac{rl}{D\pi\delta}$, onde r é a resistividade do Nikrothal; l é o comprimento total do condutor (0,405 m); D é o diâmetro do *shunt* e δ a espessura (0,6 mm) do Nikrothal.

Também a resistência elétrica do dispositivo para corrente contínua foi obtida através de medição direta utilizando-se um multímetro de alta precisão (HP modelo 34401A de 6,5 dígitos) e injetando-se diferentes valores de correntes contínuas no dispositivo. O valor médio encontrado da resistência foi de 0,75 mΩ.

Comparando-se as duas resistências (método matemático e medição), encontra-se uma pequena diferença de 0,03 mΩ. Acredita-se que esta diferença seja devido ao processo da construção do dispositivo, como por exemplo elementos de soldagem, pequenos erros dimensionais etc. No sistema de medição, será admitido o valor 0,75 mΩ como sendo a resistência do dispositivo.

No sistema de medição, além do transdutor resistivo, têm-se outros componentes, como: dois conversores, antena (sensor magnético), circuitos eletrônicos, fibra óptica, placa de aquisição e o computador. Estes componentes são resumidamente detalhados a seguir.

Conversor eletro-óptico (E/O) – No sistema de medição foi utilizado um conversor eletro-óptico cuja função é transformar o sinal elétrico em sinal óptico. O conversor E/O geralmente

é utilizado em conjunto com outro conversor. Neste caso, foi utilizado o conversor óptico/elétrico.

Podem-se destacar duas características básicas do conversor E/O utilizado. A faixa de entrada para a tensão (0V a 1V ou de 0V a 5V a ser escolhido) e a faixa de frequência de operação (0 a 60 MHz). O conversor pode ser alimentado com bateria de 12V ou adaptador próprio de $12V \pm 0,5 \text{ VDC} / 100\text{mA}$. Outras informações podem ser encontradas no manual do fabricante “*Terahertz Technologies Inc*” em anexo no Apêndice B.

Transmissor óptico – Para transmitir o sinal medido da base da torre à casa blindada (distância aproximada de 15 m) é utilizado o cabo de fibra ótica (Multimodo 62,5/125 μM), devido às vantagens da comunicação por cabos com fibras ópticas comparadas com outros cabos já conhecidos; entre elas estão a imunidade a ruídos provenientes de interferências eletromagnéticas, baixos níveis de perdas, além da alta taxa de transmissão de dados etc.

Conversor óptico-elétrico (O/E) – Outro conversor utilizado foi o conversor O/E. Este conversor é responsável pela conversão de sinal luminoso ao sinal elétrico. As características do conversor são: a faixa de frequência de operação (0 a 125 MHz) e dois ganhos (1 ou 10, a ser escolhido). O conversor pode ser alimentado com uma bateria de 9 V, outras informações no Apêndice C .

Placa de aquisição de dados - A placa de aquisição de dados tem 4 canais. Cada canal pode ser configurado para uma entrada de $\pm 1\text{V}$ ou $\pm 5\text{V}$. A resolução da placa é de 12 bits, a faixa de frequências de medição é de 10 a 20 MHz (depende do número de canais utilizado). A taxa máxima de amostragem da placa de aquisição para as medições é de 25 MS/s. Outras informações da placa de aquisição podem ser encontradas no endereço www.measurementcomputing.com e no Apêndice D.

3.4 Operação do Sistema de Medição

Conforme Figura 3.8, na base da torre (aproximadamente a 70cm do solo), é instalado o transdutor resistivo. A parte interna do dispositivo foi aproveitada para abrigar a parte eletrônica do sistema de medição: o conversor E/O, o circuito eletrônico e as baterias para alimentar o conversor. O sistema de medição de corrente desenvolvido foi incorporado ao sistema de medição existente na MCS¹ no final do mês de dezembro de 2005.

Na MCS encontram-se outros medidores de corrente de descarga. Um deles é a bobina de Pearson, que também se encontra na base da torre. O dispositivo está posicionado acima e em série com a bobina de Pearson. Outras informações a respeito da medição de corrente realizado pelo transdutor de Pearson podem ser encontradas em [Visacro, 2004], [Schroeder et al., 2002] [Visacro et al., 2005a]. As diferenças do sistema de medição de corrente de ambos os transdutores encontram-se detalhadas em [Gómez et al., 2006].

Próximo da torre de medição, aproximadamente a 15 m, encontra-se uma cabine blindada, também chamada de “casa blindada” onde estão os equipamentos responsáveis pelo gerenciamento e controle da aquisição e do armazenamento dos dados medidos. Estes equipamentos são: o computador, placa de aquisição de dados, circuitos eletrônicos, conversor O/E. Acima da casa blindada tem-se um sensor de campo magnético (antena).

¹ MCS – “Morro do Cachimbo Station” – Estação Morro do Cachimbo



Figura 3.8 – O transdutor resistivo instalado na base da torre para medição de corrente de descarga.

3.4.1 *Funcionamento do Sistema de Medição*

Quando a tempestade se encontra nas proximidades da estação, o sensor (antena), localizado no teto da casa blindada, detectará o campo magnético irradiado das descargas que ocorram a uma distância de aproximadamente até 10 km. Então, imediatamente, será ligado o LED do circuito eletrônico 1 (circuito de acionamento) que está localizado dentro da casa blindada (ver Figura 3.12). O funcionamento do sistema de medição desenvolvido é independente dos outros sistemas que se encontram na estação de medição.

Quando o LED do circuito de acionamento é ligado, este envia, no mesmo instante, um sinal de alerta por meio de cabo de fibra óptica para o segundo circuito 2 (circuito de medição), que se encontra dentro do transdutor *shunt*. Quando o circuito de medição recebe esta informação o relé é acionado, energizando o conversor E/O. A partir de então estes componentes estarão “*on line*” e permanecerão assim durante um tempo de aproximadamente 10 minutos. Caso não persistam descargas na proximidade da torre de modo a sensibilizar a antena, todo o sistema será desligado, permanecendo em funcionamento só o circuito de acionamento e o computador.

No caso da descarga incidir na torre de medição, o sinal que flui no transdutor *shunt* será registrado pelo sistema. Esse sinal será a diferença de potencial detectada nos terminais do dispositivo. O mesmo será atenuado em 20 vezes e convertido em sinal óptico por meio do conversor E/O e transmitido via fibra óptica para o conversor O/E (na casa blindada). O sinal, convertido em sinal elétrico, é então armazenado no computador por meio da placa de aquisição de dados em um banco de dados para posterior análise a seguir.

Para automatizar o sistema de medição desenvolvido, (armazenamento e visualização de sinais detectados) foi desenvolvida uma interface entre a placa de aquisição de dados e o *software LabView da National Instruments*. A seguir, encontram-se alguns detalhes.

A configuração inicial do funcionamento do sistema de medição desenvolvido é mostrada na Figura 3.9 onde podem ser observados quatro atributos ou funções a serem executadas pelo usuário, AQUISIÇÃO, EMULAÇÃO, VISUALIZAÇÃO E TÉRMINO.



Figura 3.9 – Configuração do modo de funcionamento do sistema de medição.

Na caixa de aquisição (Figura 3.10), têm-se duas funções: ARMADO e DESARMADO. Quando a descarga estiver nas proximidades da torre a configuração que entra em execução será o modo ARMADO (quer dizer: esperando uma descarga cair na torre) Assim, todo o sistema estará à espera de algum sinal. Esta espera será por um tempo de 10 min. Caso não exista nenhum sinal na antena durante este tempo, o sistema entrará em modo DESARMADO, sendo desligado (*off line*) até que um novo aviso da antena seja captado pelo circuito de acionamento. Este passo será repetido tantas vezes quando o sistema for solicitado pela antena.

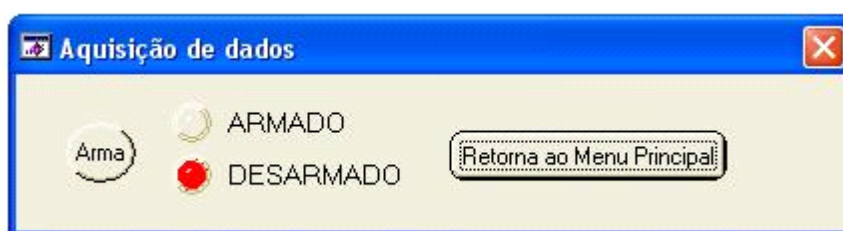


Figura 3.10 – Funções armado e desarmado do sistema de medição.

No caso da descarga atingir a torre, o sinal será “capturado” e armazenado no computador. Enquanto esta operação é efetuada, o sistema não pode capturar nenhum outro tipo de sinal. (Esta operação é realizada num tempo de aproximadamente 1s). Após o ciclo de aquisição, o sistema encontra-se novamente preparado no modo de espera para outras possíveis medições. Não havendo novos eventos no tempo de 10 minutos, o sistema será desligado.

Na Figura 3.11 observa-se uma janela para a visualização do sinal medido. O tempo total de medição do sinal é de 1 segundo. A máxima amplitude de corrente a ser medida foi fixada em 200 kA. A amplitude equivalente na tensão será 5V (valor limitado pelo conversor E/O) devido ao atenuador do sinal que se encontra no circuito de medição. A máxima taxa de amostragem utilizada na medição foi 4 MS/s. Para percorrer o tempo de 1 μ s, é necessário ter

pelo menos 4 amostras, com isso no tempo de 1 segundo são armazenadas 4 milhões de amostras.

Cada forma de onda armazenada pelo sistema de medição é identificada pelo nome “DESCARGAS” data e hora de ocorrência de cada sinal. Sendo assim, a procura do registro da forma de onda é agilizada.

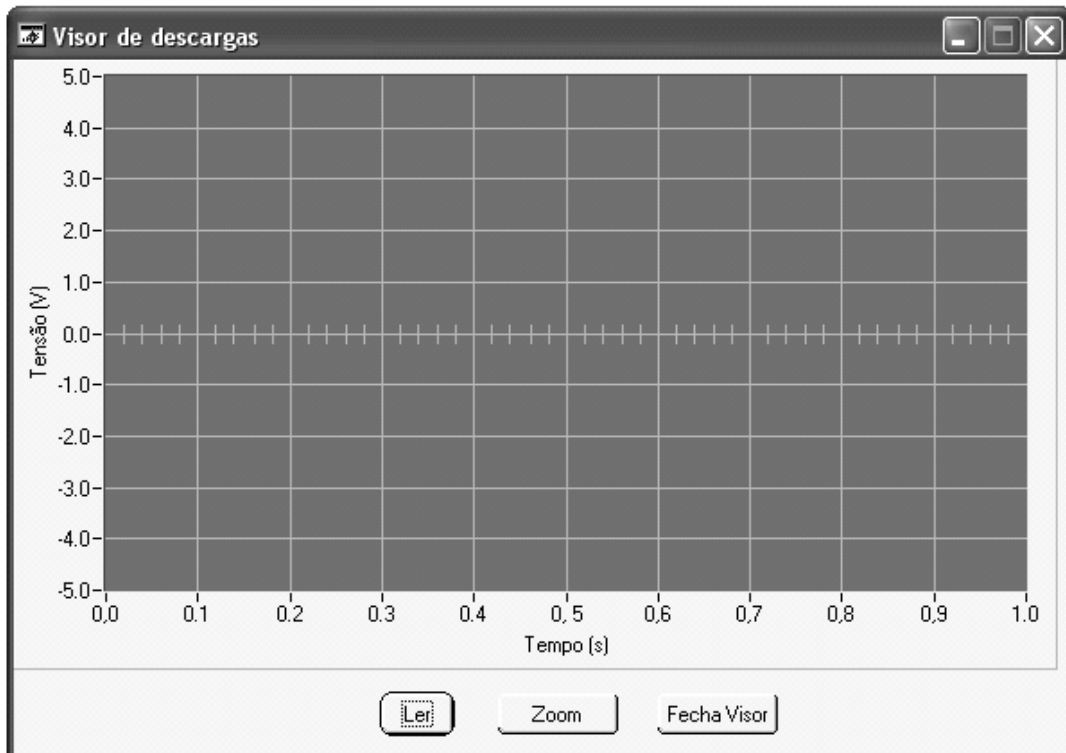


Figura 3.11 – Visor de visualização do sinal medido pelo sistema.

Um esquemático geral do sistema de medição da corrente de descarga desenvolvida é mostrado na Figura 3.12. Este esquemático é composto de dois blocos “aquisição de dados” e “sistema de medição”. Este último contém a torre, sustentada por cabos isolados. A corrente das descargas atmosféricas flui estritamente pela estrutura metálica da torre, sendo medida pelo transdutor resistivo.

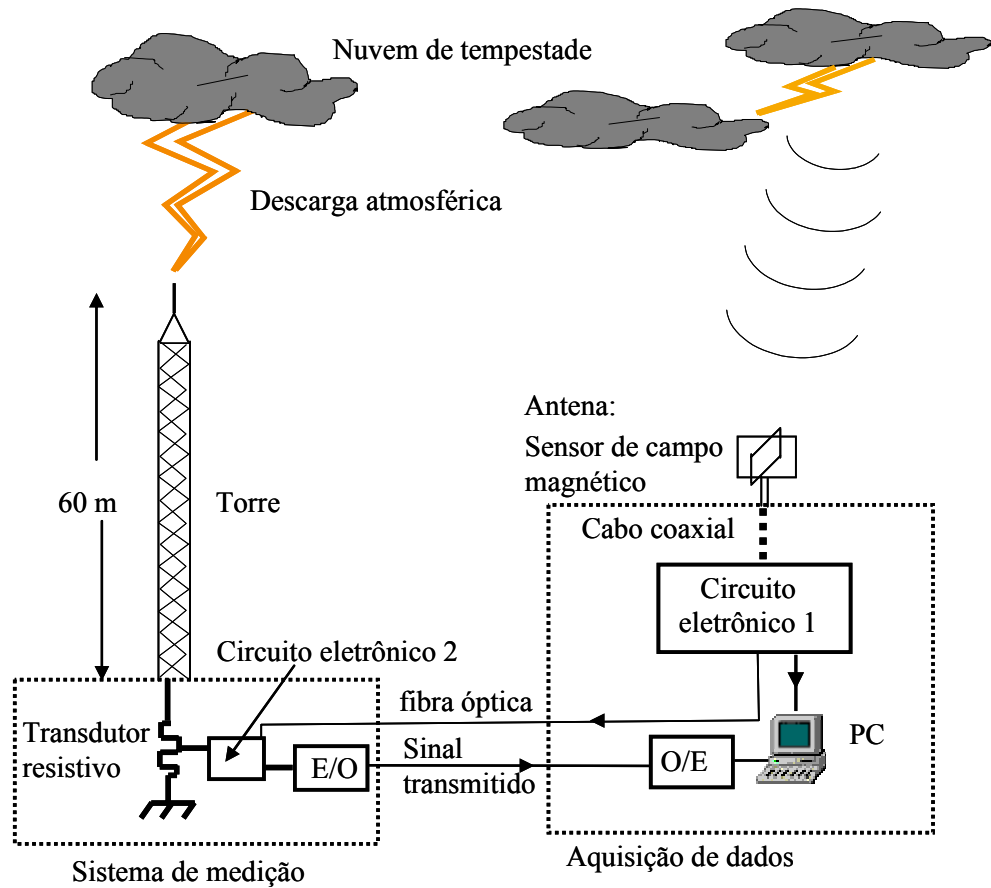


Figura 3.12 - Diagrama do sistema de medição da corrente de descarga.

3.5 Conclusão

Na construção do transdutor resistivo *shunt* foi utilizado o material resistivo Nikrothal 80 de 0,6 mm de espessura. O transdutor resistivo tem uma resistência de 0,75 mΩ. O transdutor pode ser utilizado para realizar medições de pulsos de correntes em altas e baixas frequências e pode medir picos de correntes muito elevados, acima dos 1000 kA (ondas tipo 8/20 μs).

Na Tabela 3.4 mostra-se a variação da resistividade do material resistivo com a temperatura. Para obter o valor da resistividade (ρ) na respectiva temperatura, multiplica-se a $\rho = 1,09 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$, por um fator C_t de acordo a tabela abaixo.

Temperatura	20°C	100°C	200°C	300°C
C_t	1,00	1,01	1,02	1,03

Tabela 3.4 - Incremento da resistividade (ρ) com a temperatura.

Na Tabela 3.5 mostra-se a variações da resistividade (ρ), resistência (R) e capacidade de calor específico (c) do transdutor resistivo com o incremento da temperatura.

Temperatura	20°C	100°C	200°C	300°C
ρ ($\Omega \cdot m$)	$1,09 \times 10^{-6}$	$1,1009 \times 10^{-6}$	$1,1118 \times 10^{-6}$	$1,1227 \times 10^{-6}$
R m Ω	0,754	0,7615	0,7684	0,7765
c (kJ/kg. °C)	0,46	0,46	0,48	0,50

Tabela 3.5 – Variação de alguns parâmetros do transdutor resistivo.

Na Tabela 3.6 mostra-se a variação da energia dissipada com o incremento da temperatura que pode ser dissipado pelo transdutor resistivo.

Temperatura	20°C	100°C	200°C	300°C
E_{\max}	13,8 kJ	69 kJ	144 kJ	225 kJ

Tabela 3.6 – Valores de energia dissipada do transdutor resistivo.

Foram realizadas análises em simulações de *Spice* para identificar parâmetros como: tempo de subida e banda de passagem (frequência de corte) do transdutor resistivo, tais valores encontram-se na Tabela 3.7, para frequência de $f = 1$ MHz.

Transdutor Resistivo LRC	Resistência de baixa frequência (m Ω)	Banda de passagem (MHz)	Tempo de subida (ns)	Limite da energia dissipada (kJ)
	0,75	1,2	300	144

Tabela 3.7 - Especificações do transdutor resistivo construído no LRC.

Na tabela 3.8 são mostrados três modelos de resistores com as respectivas especificações, fabricados por *T & M research products*. O modelo K-8000-16 é utilizado nas medições de corrente em descargas artificiais na Flórida [Rakov et al., 1998].

Modelo	Resistência (mΩ)	Banda de passagem (MHz)	Tempo de subida (ns)	Energia máx. dissipada (kJ)
K-4000-8	1,25	12	30	4
K-5000-10	1	8	45	5
K-8000-16	0,625	3,2	113	8

Tabela 3.8 - Especificações de outros modelos de *shunts*.

Comparando os valores apresentados nas Tabelas 3.7 e 3.8, observa-se que o transdutor resistivo construído no LRC apresenta 300 ns de tempo de frente e o modelo K-5000-10 apresenta 8 ns de tempo de subida. Comparando os valores de banda de passagem, existe uma diferença significativa entre eles, devido à maior indutância do transdutor construído no LRC. Entretanto, este dispositivo apresenta um limite de energia dissipada muito superior.

O equipamento de medição de corrente de descarga encontra-se instalado na estação de medição de parâmetros de descargas atmosféricas “Morro do Cachimbo”, desde dezembro de 2005, para medição das correntes de descargas que incidem na torre.

A onda de corrente da descarga é medida na base da torre, onde é instalado o transdutor resistivo. Acoplado a este, encontra-se o conversor E/O, que é alimentado por uma bateria de 12V, que recebe o sinal elétrico e o converte em óptico. A transmissão do sinal para a sala blindada é realizada por meio de um cabo de fibra óptica.

Dentro da “sala blindada” encontra-se um conversor O/E. Este conversor é o responsável pela detecção e conversão de sinal óptico em elétrico, o qual é transferido e armazenado no computador, permitindo assim, análises posteriores.

4 **Função para Correção do Sinal Medido e Reconstituição da Corrente**

4.1 Introdução

A construção e o emprego de *shunts* para medir a corrente de descargas incluem certas complexidades não relatadas suficientemente na literatura técnica.

O primeiro aspecto corresponde à necessidade de se assegurar que a resistividade do material utilizado na construção do dispositivo não varie significativamente com o usual aumento da temperatura decorrente do fluxo das intensas correntes de descarga.

Outro aspecto refere-se ao caráter predominantemente indutivo do transdutor *shunt* nas condições reais de sua utilização, que limita a possibilidade de determinação da corrente diretamente da onda de tensão detectada no *shunt* através de uma relação linear. Embora tradicionalmente seja prática usual a determinação da corrente da relação $[v(t) = R.i(t)]$, o erro envolvido torna-se significativo, pois para as frequências típicas da frente de onda, o caráter indutivo do dispositivo prevalece.

A boa engenharia recomenda a determinação de uma função de correção adequada para o tratamento do sinal medido, com a finalidade de se obter resultados de maior fidelidade para as ondas de corrente.

Este capítulo contém algumas definições importantes do condutor do dispositivo transdutor descrito no capítulo 3, tais como a influência do efeito pelicular na condução de corrente em altas frequências (variação das resistências, reatâncias interna e externa em função da frequência). É importante a análise de algumas propriedades do condutor para efeitos da elaboração da função de correção.

Também, apresenta-se uma formulação analítica, que é baseada na utilização da equação de *Bessel* para o efeito pelicular. Esta formulação é a mais comumente utilizada no cálculo da impedância. Com base nesta formulação, obtém-se a impedância interna do condutor, onde a parte real é a resistência e a parte imaginária corresponde à reatância indutiva devido ao efeito pelicular. A partir da reatância, calcula-se a indutância interna do condutor. Os valores da resistência e da indutância interna fornecidos por essa técnica apresentam boa exatidão para as aplicações relacionadas à descarga atmosférica.

O objetivo da elaboração da função de correção é possibilitar a reconstituição do sinal medido pelo transdutor resistivo.

Finalmente, mostram-se alguns testes laboratoriais para comparação de ondas de corrente medido com a bobina de Rogowski e o sinal medido com o transdutor resistivo e reconstituído utilizando a função de correção.

4.2 Determinação da Impedância do Transdutor Resistivo

A determinação da impedância do transdutor é de vital importância para a elaboração da função de correção.

Na Figura 4.1 mostra-se parte da construção do dispositivo, onde internamente pode-se observar o condutor. Este tem o sinal elétrico circulando a partir do topo do cilindro interno, saindo pelo topo do cilindro externo. O diagrama detalhado é mostrado no capítulo 3; como material isolante é utilizado a mica, entre o cilindro interno e externo a fim de evitar que haja contato entre eles.

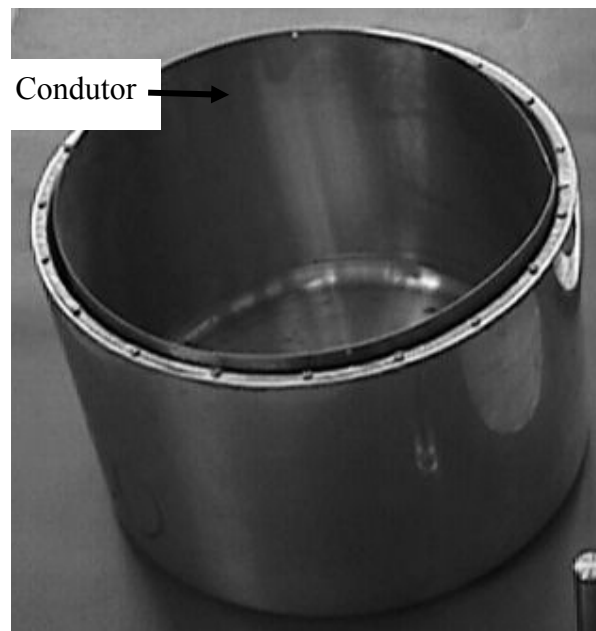


Figura 4.1. Posicionamento do condutor no resistor *shunt*.

No próximo item estuda-se o comportamento da resistência elétrica do condutor em altas frequências.

4.2.1 *O Efeito Pelicular*

O efeito pelicular é responsável pelo aumento da resistência do condutor e diminuição da indutância interna devido a um aumento da frequência. Este efeito também é função da condutividade σ e da permeabilidade magnética μ do condutor.

O efeito pelicular acontece sempre que um condutor é excitado por uma corrente alternada. Essa excitação resulta em uma distribuição não uniforme de corrente elétrica na área da seção transversal do condutor. Essa distribuição da corrente causa aumento na resistência efetiva do condutor e diminuição na indutância interna em função da frequência.

O efeito pelicular pode ser descrito da seguinte maneira: a corrente elétrica alternada tende a passar mais pela superfície do condutor e menos no centro dele, e, por causa desse comportamento, a resistência do condutor será maior para frequências mais altas, uma vez que se tem menos espaço físico para a circulação de uma corrente de maior frequência mas de semelhante "densidade". Quanto mais alta for a frequência, mais para a superfície do condutor se dirigirá a corrente, e menor a área usada para passagem. Portanto, no centro do condutor só passará corrente considerável se o sinal for DC ou se a espessura do condutor for da ordem da profundidade de penetração.

As correntes alternadas possuem essa tendência de atravessar o condutor mais próximo da superfície porque o campo magnético gerado pela corrente alternada inicial, no centro do condutor, sofre de um retardo em sua resposta com relação às rápidas mudanças na amplitude da corrente, ou seja, o campo magnético é mais lento. Por isso, o campo que está interno ao condutor "empurra" a corrente para fora deste. Quanto mais alta for a frequência, maior será o retardo dos campos magnéticos, e mais eles empurram a corrente para fora, até que em frequências muito altas a corrente só vai fluir numa fina película na superfície, ou seja, na parte externa do condutor.

4.3 Propriedades Elétricas do Condutor

Considerando-se um condutor coaxial cilíndrico conforme ilustrado na Figura 4.2, para se deduzir a distribuição de corrente no condutor (com seção transversal circular de raios interno “a” e externo “b”), e, conseqüentemente, a impedância, algumas hipóteses simplificadoras devem ser feitas:

- Os campos elétrico e magnético variam no tempo;
- Simetria cilíndrica na distribuição dos campos eletromagnéticos;
- O condutor é homogêneo e não magnético ($\sigma = const.$ e $\mu = const.$);
- $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ (lei de Ohm pontual);
- A corrente de deslocamento ($\frac{\partial D}{\partial t}$) é muito pequena quando comparada com a corrente de condução.

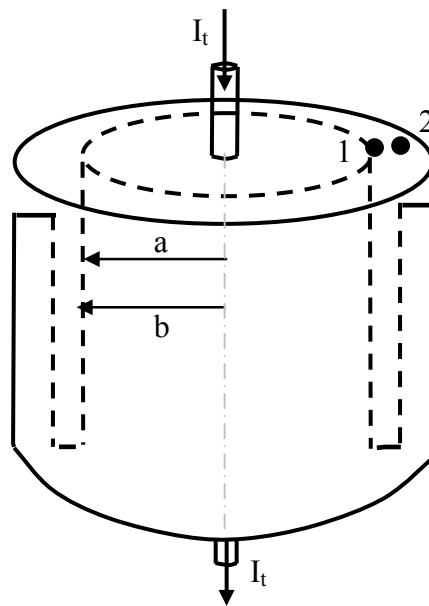


Figura 4.2 Geometria do condutor cilíndrico.

Sejam ϵ , μ , σ , respectivamente, a permissividade dielétrica, a permeabilidade magnética e a condutividade elétrica do material do condutor, supostas escalares e constantes.

4.3.1 Impedância Interna do Condutor

Para calcular a impedância interna do condutor, consideram-se as condições acima mencionadas. Nestas condições, as equações de Maxwell se reduzem a:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cong \vec{J} \quad (4.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (4.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (4.4)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (4.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.6)$$

Tomando o rotacional da Equação (4.1), e tendo em vista as hipóteses acima, obtém-se:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4.7)$$

A Equação (4.7) é conhecida como “equação de difusão”, devido a sua semelhança formal com as equações que surgem em problemas de difusão de calor. Esta equação pode ser usada para determinar a distribuição de intensidade do campo elétrico na seção transversal de condutores de qualquer estrutura geométrica e, conseqüentemente, determinar a densidade de corrente. Para equações deste tipo, só existem soluções analíticas fechadas quando os condutores têm a forma de placas ou cilindros.

Supõe-se que, no interior do condutor, o campo elétrico possui componente longitudinal E_z e o campo magnético possui componente tangencial H_ϕ (demais componentes de ambos são desprezíveis). Fazendo estas considerações, com auxílio da lei de Ohm pontual e utilizando as equações de Maxwell, calculam-se o campo elétrico ($\vec{E} = E_z \hat{z}$) e o campo magnético ($\vec{H} = H_\phi \hat{\phi}$).

Considerando-se a Equação (4.7) aplicada a um condutor cilíndrico, devido à simetria do problema e usando coordenadas cilíndricas (r, ϕ, z) , obtém-se

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial E_z(r, t)}{\partial r} \right] = \mu \sigma \frac{\partial E_z(r, t)}{\partial t} \quad (4.8)$$

Fazendo $E_z(r, t) = E_z(r) \exp(j\omega t)$, a Equação (4.8) transforma-se em:

$$\frac{d^2 E_z(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dE_z(r)}{dr} - k^2 E_z(r) = 0 \quad (4.9)$$

Onde $k^2 = j\mu\sigma\omega$. A Equação (4.9) tem a forma de uma equação diferencial de Bessel, portanto, sua solução é a seguinte:

$$E_z(r) = AI_0(kr) + BK_0(kr) \quad (4.10)$$

Onde A e B são coeficientes constantes e arbitrários que serão determinados pelas condições de fronteira, e $I_0(kr)$, $K_0(kr)$ são funções de Bessel modificadas de primeiro e segundo tipos, respectivamente, e ordem zero.

Analogamente à Equação (4.9), calcula-se a equação para o campo magnético.

$$H_\phi(r) = \frac{1}{\mu j \omega} \frac{dE_z(r)}{dr} \quad (4.11)$$

Considerando as propriedades de derivação das equações de Bessel, obtém-se a componente do campo magnético [Maksiejewski, 1993].

$$H_\phi(r) = \frac{k}{\mu j \omega} [AI_1(kr) - BK_1(kr)] \quad (4.12)$$

Onde $I_1(kr)$ e $K_1(kr)$ são funções de Bessel modificadas de primeiro e segundo tipo, respectivamente, e de ordem um.

Sendo nulas as correntes para $r < a$ e dentro das hipóteses admitidas, o campo magnético é nulo para $r = a$. Com isto, tem-se.

$$H_\phi(a) = 0 \quad (4.13)$$

Substituindo a Equação (4.13) na Equação (4.12) obtém-se:

$$\frac{B}{A} = \frac{I_1(ka)}{K_1(ka)} \quad (4.14)$$

A existência do campo elétrico dentro do condutor de geometria cilíndrica, e a densidade da corrente são proporcionais ao campo de acordo com a lei de Ohm ($J_z = \sigma E_z(r)$). Isto, possibilita a formulação analítica para o cálculo da corrente total que flui no condutor. Essa formulação é obtida em função do campo elétrico na superfície do condutor. Com isto, a corrente elétrica (i) que flui pelo condutor pode ser encontrada pela seguinte equação:

$$i = 2\pi \int_a^b r J_z(r) dr = 2\pi\sigma \int_a^b r E_z(r) dr \quad (4.15)$$

Substituindo a Equação 4.10 na Equação 4.15 e integrando considerando as propriedades de integração das equações Bessel [Balanis,1989] e [Hildebrand,1976]. Obtém-se a corrente total que flui no condutor:

$$i = \frac{2\pi\sigma}{k} [AbI_1(kb) - AaI_1(ka) - BbK_1(kb) + BaK_1(ka)] \quad (4.16)$$

Da Equação (4.16), atendendo a Equação (4.14) obtém-se as constantes **A** e **B**:

$$A = \frac{k}{2\pi\sigma b} \cdot \frac{K_1(ka)}{I_1(kb)K_1(ka) - I_1(ka)K_1(kb)} i \quad (4.17)$$

$$B = \frac{k}{2\pi\sigma b} \cdot \frac{I_1(ka)}{I_1(kb)K_1(ka) - I_1(ka)K_1(kb)} i \quad (4.18)$$

A impedância interna por unidade de comprimento (definida como a relação entre o campo elétrico longitudinal na **superfície exterior** do condutor e a corrente **i**), será:

$$Z_{\text{int}} = R_{\text{int}} + j\omega L_{\text{int}} = \frac{E_z(b)}{i} = \frac{AI_0(kb) + BK_0(kb)}{i} \quad (4.19)$$

Substituindo as Equações (4.17) e (4.18) na Equação (4.19) obtém-se:

$$Z_{\text{int}} = \frac{k}{2\pi\sigma b} \left[\frac{I_0(kb) \cdot K_1(ka) + K_0(kb) \cdot I_1(ka)}{I_1(kb) \cdot K_1(ka) - I_1(ka) \cdot K_1(kb)} \right] (\Omega/\text{m}) \quad (4.20)$$

Na Equação (4.20), as funções $I_0(kb)$, $K_0(kb)$, $I_1(ka)$, $I_1(kb)$, $K_1(ka)$ e $K_1(kb)$ são denominadas “equações de Kelvin”, cujas definições encontram-se em [Abramowitz e Stegun, 1972].

$$Ber_\nu(x) + jBei_\nu(x) = e^{\frac{v\pi j}{2}} I_\nu(xe^{\frac{\pi j}{4}}) \quad (4.21)$$

$$Ker_\nu(x) + jKei_\nu(x) = e^{\frac{-v\pi j}{2}} K_\nu(xe^{\frac{\pi j}{4}}) \quad (4.22)$$

Das Equações (4.21) e (4.22) obtém-se as seguintes equações:

$$I_0\left(xe^{j\frac{\pi}{4}}\right) = Ber_0(x) + jBei_0(x) \quad (4.23)$$

$$I_1 \left(x e^{j\frac{\pi}{4}} \right) = -jBer_1(x) + Bei_1(x) \quad (4.24)$$

$$K_0 \left(x e^{j\frac{\pi}{4}} \right) = Ker_0(x) + jKei_0(x) \quad (4.25)$$

$$K_1 \left(x e^{j\frac{\pi}{4}} \right) = jKer_1(x) - Kei_1(x) \quad (4.26)$$

Substituindo-se as Equações de (4.23) a (4.26) em (4.20), tem-se a impedância interna do cilindro condutor.

$$Z_{int} = \frac{k\rho}{2\pi b} \cdot \left(\frac{D}{N} \right) \text{ (}\Omega/\text{m)} \quad (4.27)$$

onde:

$$D = (Ber_0(kb) + jBei_0(kb)) \cdot (jKer_1(ka) - Kei_1(ka)) + (Ker_0(kb) + jKei_0(kb)) \cdot (-jBer_1(ka) + Bei_1(ka))$$

$$N = (-jBer_1(kb) + Bei_1(kb)) \cdot (jKer_1(ka) - Kei_1(ka)) - (-jBer_1(ka) + Bei_1(ka)) \cdot (jKer_1(kb) - Kei_1(kb))$$

4.3.2 Impedância Externa do Condutor

Na impedância externa propriamente dita, somente a reatância indutiva varia com o aumento da frequência. O cálculo da impedância externa do condutor é dado pela seguinte equação:

$$Z_{ext} = R_{ext} + j\omega L_{ext}, \text{ (}\Omega/\text{m)} \quad (4.28)$$

Onde $R_{ext} = 0$ e L_{ext} é a indutância externa do condutor e pode ser calculada pela seguinte equação:

$$L_{ext} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \cdot l_1, \text{ (H)} \quad (4.29)$$

Sendo:

$l_1 = 0,200$ m comprimento parcial do condutor;

$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$ H.m⁻¹ (permeabilidade magnética do vácuo);

“ b ” raio externo e “ a ” raio interno do condutor;

$\omega = 2\pi f$ a frequência angular.

4.3.3 Impedância Longitudinal do Condutor

A impedância longitudinal (Z_L) em função da frequência do condutor corresponde à soma das impedâncias interna e externa.

$$Z_L(f) = Z_{ext}(f) + Z_{int}(f) \quad (4.30)$$

Portanto a impedância longitudinal resulta em:

$$Z_L = R_{int} + j\omega[L_{int} + L_{ext}] \quad (4.31)$$

4.4 Resultados Analíticos do Condutor

Foi desenvolvido um programa computacional para o cálculo e a análise gráfica da resistência e reatância interna do condutor cilíndrico em ampla faixa de frequência (de zero a uma frequência de 20MHz). A metodologia consiste em aplicar toda a formulação desenvolvida para o cálculo da impedância interna. Assim, a formulação obtida é a impedância interna complexa do condutor cilíndrico. A parte real é a resistência e a parte imaginária é a reatância indutiva interna do condutor.

Na Figura 4.3, pode-se observar os resultados obtidos empregando o programa elaborado. O resultado das variações dos parâmetros em função da frequência e a amplitude da impedância longitudinal, para o condutor coaxial cilíndrico de material NiCr (80% e 20%).

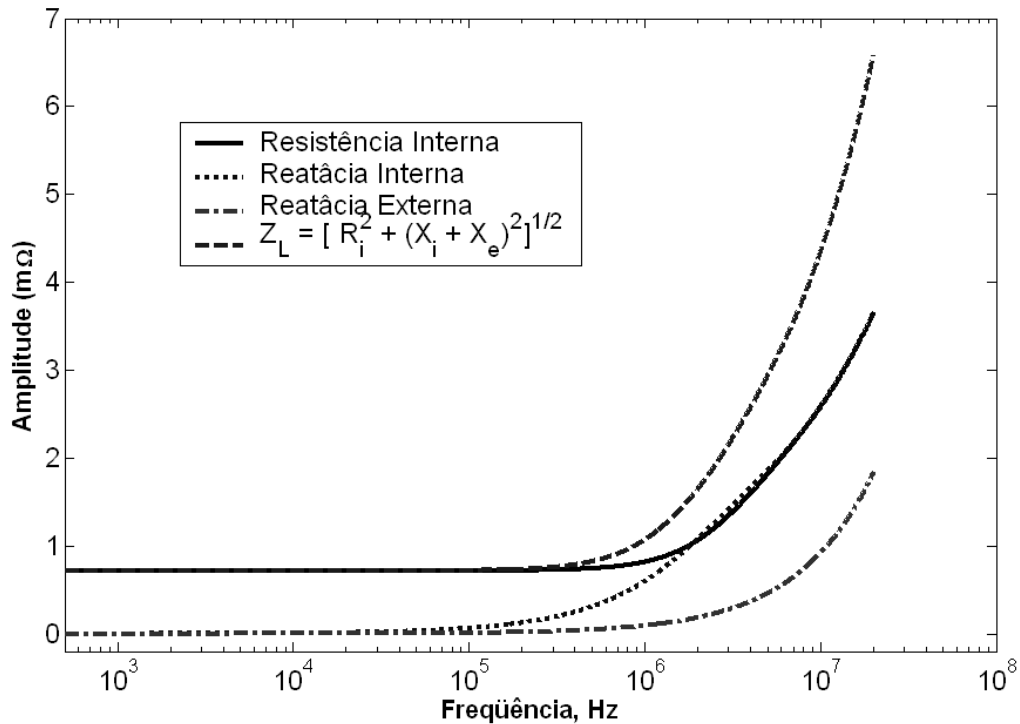


Figura 4.3 – Comportamento da resistência, reatâncias interna e externa, e a impedância longitudinal em função da frequência.

As curvas da Figura 4.3 mostram que acima de 10⁵ Hz a reatância interna começa a aumentar significativamente. O valor da resistência permanece constante até aproximadamente 1 MHz. Ambas as componentes (resistência e reatância interna) a partir do valor 10 MHz variam igualmente [Gómez et al., 2007].

Devido à geometria coaxial do transdutor resistivo desenvolvido, a reatância externa permanece constante até aproximadamente 1 MHz. Somente após este valor a reatância externa varia moderadamente. Assim, o comportamento da indutância interna devido ao efeito pelicular é responsável pela variação longitudinal da impedância.

4.5 Função de Correção

No desenvolvimento do programa computacional para o cálculo da função de correção considerou-se que a corrente elétrica circula a partir do topo do cilindro interno e sai pelo topo do cilindro externo (Figura 4.2).

A diferença de potencial entre os terminais denominados de ponto 1 e ponto 2 (Figura 4.2) é o sinal real medido em função do tempo ($v(t)$).

Utilizando a transformada de Fourier, determina-se o sinal medido em função da frequência $v(f)$.

Logo, pela lei de Ohm, tem-se a denominada função de correção em função da frequência:

$$i(f) = \frac{v(f)}{Z_L(f)} \quad (4.32)$$

Onde,

$i(f)$ é o resultado da variável de entrada dividida pela impedância longitudinal (corrente);

$v(f)$ é a variável medida nos terminais do transdutor resistivo (tensão);

$Z_L(f)$ é a impedância longitudinal, obtida na Equação (4.31).

Para se obter a função de correção em função do tempo, aplica-se a transformada inversa de Fourier

$$i(t) = \frac{v(t)}{Z_L(t)} \quad (4.33)$$

4.6 Fluxograma da Função de Correção

Na Figura 4.4 mostra-se o fluxograma do programa computacional elaborado para o cálculo da função de correção. A queda de tensão ($v(t)$) é o parâmetro de entrada do *shunt*. Todos os cálculos são realizados a partir destes dados, obtendo-se como resultado final a corrente em função do tempo.

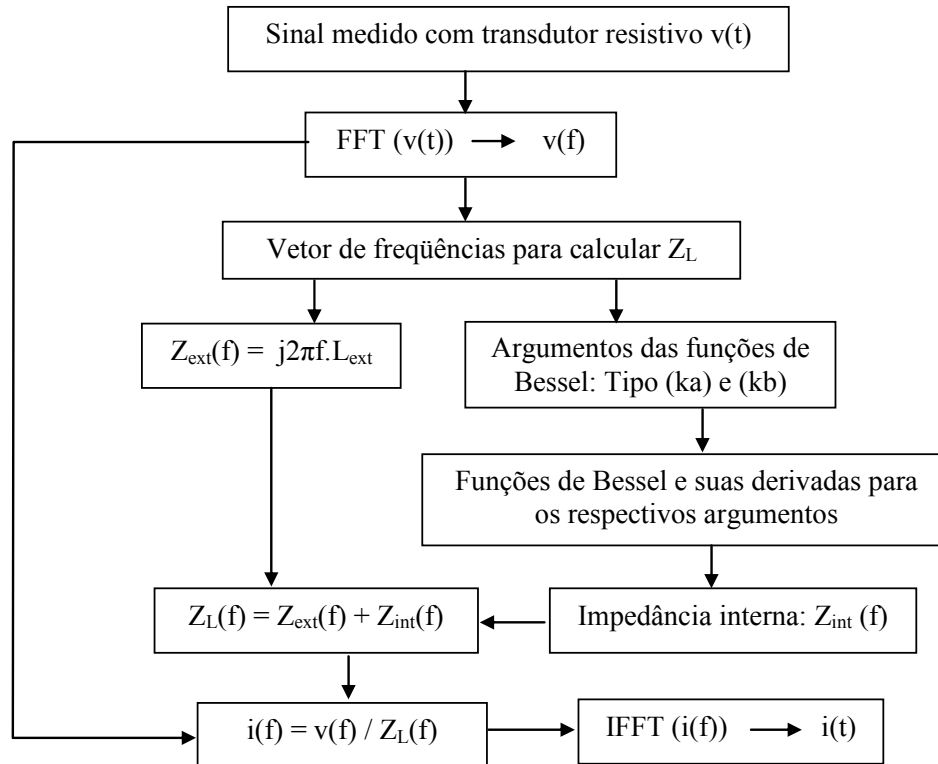


Figura 4.4 – Fluxograma para determinação da função de correção.

4.7 Reconstrução das Ondas de Corrente

Para avaliar a função de correção, foram realizados basicamente dois testes, mostrados a seguir.

4.7.1 Forma de Onda Teórica

Inicialmente, a função de correção desenvolvida foi aplicada para reconstituir a onda de Heidler (2,2/70 μs) [Nucci et al., 1993]. A onda foi considerada como uma onda de tensão cuja amplitude é de aproximadamente 720V e tempo de subida de 2,2 μs.

Na Figura 4.5 mostra-se a comparação das ondas de tensão e corrente (normalizadas) reconstituída utilizando a função de correção elaborada. Conforme a figura, a onda de corrente reconstituída apresenta defasagem (adiantado) em relação à onda de tensão. A corrente reconstituída apresenta uma amplitude de 408 kA e tempo de subida 8 μs.

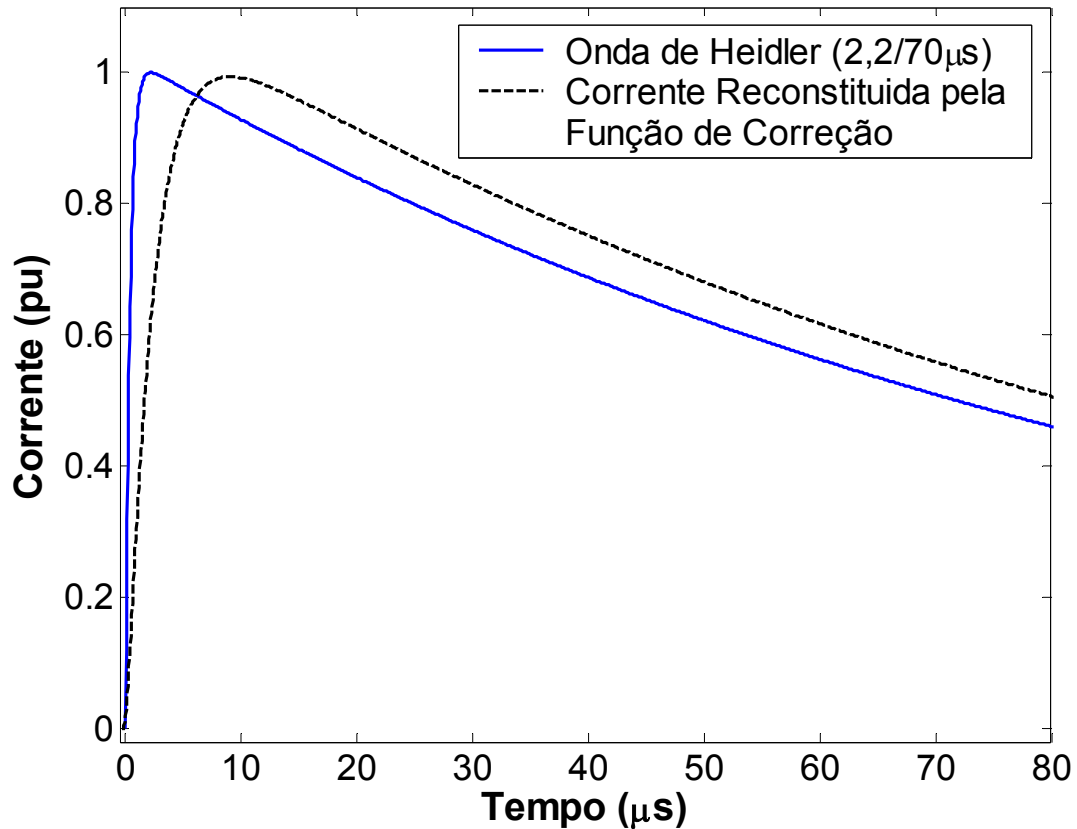


Figura 4.5 – Reconstituição da onda de *Heidler* utilizando a função de correção.

4.7.2 Forma de Onda Experimental

Foi montado um gerador, no laboratório do LRC, para obter ondas impulsivas de diferentes amplitudes e tempo de frente de aproximadamente 2,5 μs . A onda gerada foi medida com dois dispositivos: o transdutor resistivo desenvolvido e a bobina de Rogowski. Esta última foi utilizada como referência da medição da corrente.

A Figura 4.6 mostra a comparação das curvas de tensão e corrente medidas. A oscilação e a defasagem observadas na forma de onda da tensão são devido à indutância natural do dispositivo.

A Figura 4.7 mostra a comparação da onda de corrente reconstituída aplicando-se a função de correção e a corrente medida utilizando bobina de Rogowski. Observa-se a excelente concordância entre elas.

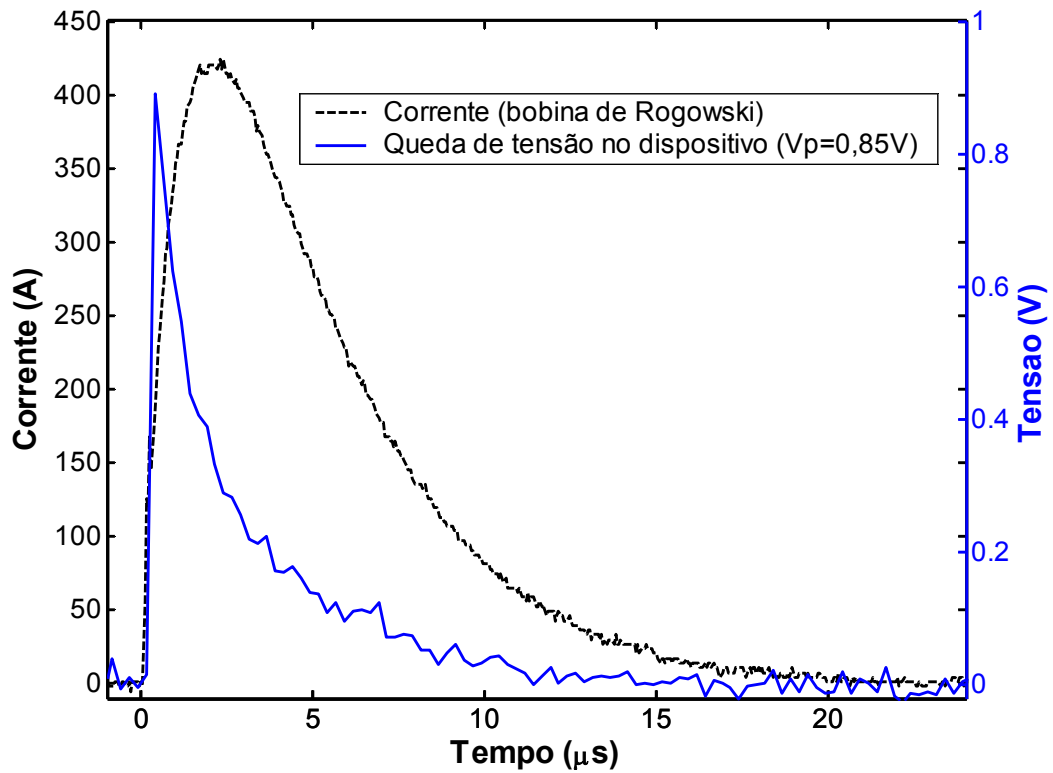


Figura 4.6 – Comparação da onda de corrente e a onda de tensão medida utilizando o *shunt*.

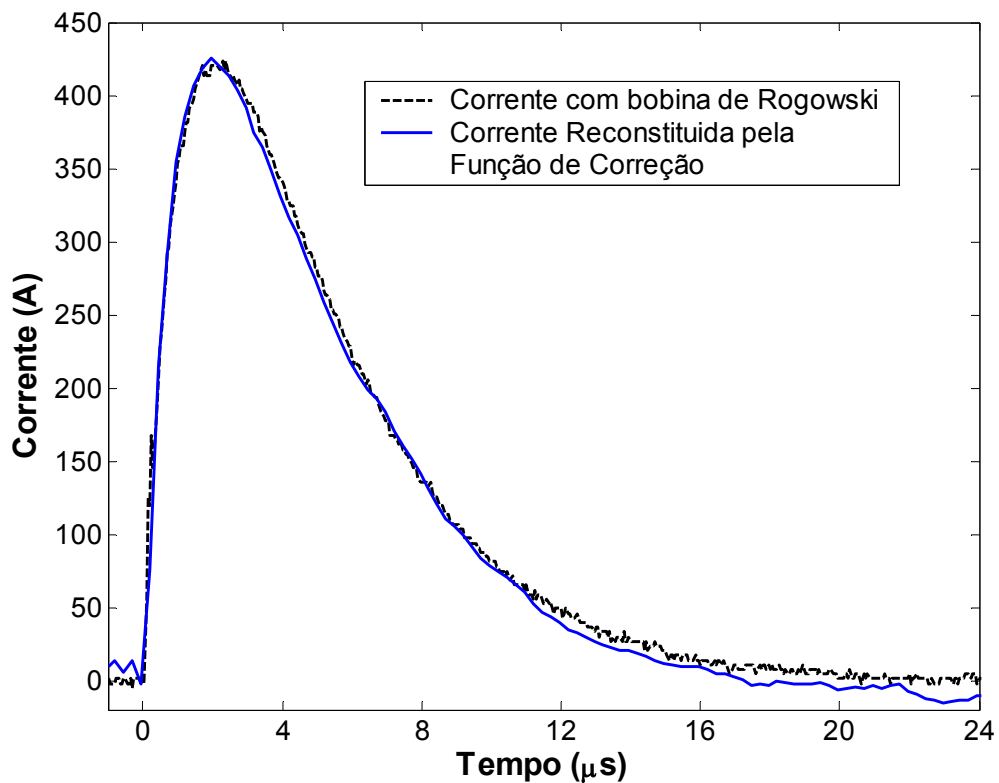


Figura 4.7 – Comparação das ondas de corrente: corrente medida com a bobina de Rogowski e a corrente reconstituída pela função de correção.

4.8 Conclusão

A função de correção foi deduzida matematicamente empregando os dados do condutor utilizado na construção do resistor. A impedância longitudinal foi deduzida utilizando as funções de Bessel. É interessante ressaltar aqui a ênfase no interesse acadêmico desta abordagem para obtenção da função de correção. Uma outra alternativa seria determinar o sinal real de corrente (Entrada) através de uma bobina de Pearson, por exemplo, e o sinal de tensão no *shunt* (Saída). A partir destes dois sinais seria então possível determinar uma função de correção através de procedimentos bem conhecidos de identificação de parâmetros.

Os testes realizados mostraram um resultado satisfatório da reconstituição da onda de corrente, utilizando-se a função de correção proposta.

5

Medição de Correntes Impulsivas de Alta e Baixa Amplitude

5.1 Introdução

Neste capítulo serão mostrados os resultados de testes realizados em laboratório com o sistema desenvolvido e apresentado no capítulo 3 desta tese. Os testes foram realizados antes de se incorporar o sistema de medição na estação “Morro do Cachimbo”.

Foram realizadas duas baterias de testes: primeiro, os testes foram realizados no laboratório do LRC, para correntes de baixa amplitude (aproximadamente 1 kA) e tempo de frente da ordem de 2,5 μ s.

A segunda bateria de testes foi realizada no laboratório LEMAT¹ - CEMIG. Desta vez, os testes foram realizados para correntes de alta amplitude (faixa de 10 kA a 100 kA). Dois tipos de onda de corrente foram injetados ao sistema de medição: 4/10 μ s (4 μ s tempo de subida e tempo de cauda 10 μ s) e 8/20 μ s.

O objetivo dos testes foi verificar o desempenho do transdutor e calibrar o sistema de medição desenvolvido comparando as características das ondas de correntes medidas (amplitude, tempo de frente etc.) pelo sistema com aquelas medidas por outros dispositivos (Pearson, Rogowski, Resistor de carbono).

Na segunda parte deste capítulo é apresentada a construção de um outro medidor de corrente de descarga. Desta vez, trata-se de um transdutor de maior valor de resistência, que será utilizado para medir correntes de baixa amplitude.

Finalmente, mostram-se alguns testes laboratoriais com o novo medidor de corrente, realizados no laboratório do LRC.

5.2 Testes do Sistema de Medição para Correntes Impulsivas de Baixa Amplitude

Para a simulação em laboratório de uma descarga atmosférica, foi montado o gerador de pulso de corrente, cujo diagrama esquemático é mostrado na Figura 5.1.

¹ LEMAT – CEMIG: Laboratório de Materiais de Alta Tensão da CEMIG.

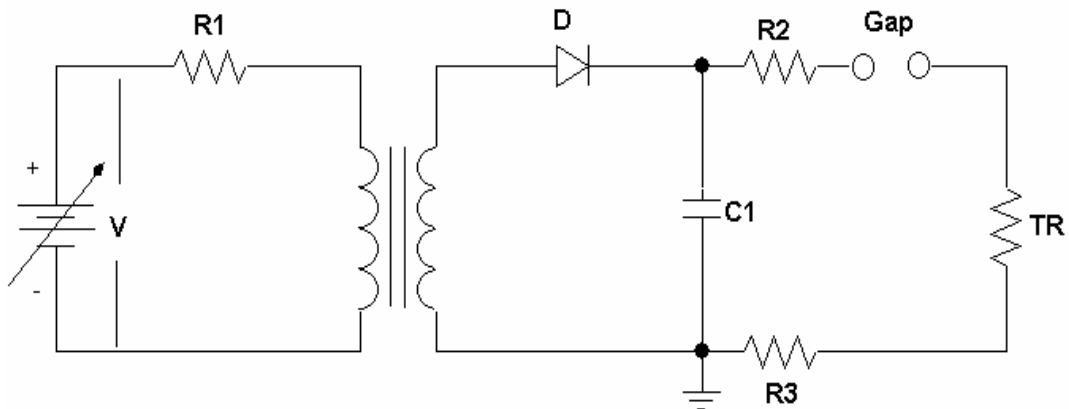


Figura 5.1 - Diagrama do gerador de pulso. $R1 = 20 \Omega$ é o resistor limitador de corrente de carga e $R2 = 10 \Omega$ é o resistor de frente; $R3 = 25 \text{ m}\Omega$ é o “*shunt*” de referência; $TR = 0,75 \text{ m}\Omega$ é o transdutor resistivo; $C1 = 1 \mu\text{F}$ (tensão nominal 15 kV) é o capacitor de carga; “D” é retificador de meia onda; “V” é o variador de tensão (0 a 240 V) e T o transformador de potência 75 VA de 110V/15kV.

As formas de onda obtidas pelo gerador têm perfil aproximado da forma de onda típica de descargas atmosféricas. Foram obtidas ondas de corrente com amplitude até aproximadamente 1 kA e tempo de frente 2,5 μs . Estes valores foram conferidos tanto com a bobina de Rogowski (Figura 5.2), quanto pelo resistor de carbono (projetado em laboratório, de 25 $\text{m}\Omega$ (Figura 5.3) composto de 40 resistores de carbono em paralelo).



Figura 5.2 – Bobina de Rogowski.

Existem vários tipos de bobinas de Rogowski, no caso da Figura 5.2 são denominadas bobinas flexíveis, pois a bobina se localiza sobre um núcleo flexível. A bobina pode ser fechada ao redor do condutor que se deseja medir por meio da união de seus extremos. Neste caso, o importante é que a união se faça corretamente para um circuito fechado e minimizar desta forma toda a influência de correntes externas à bobina. Este tipo de construção é útil quando se trabalha com condutores largos e de difícil acesso, além de ser apropriado para medir corrente sem ter que desconectar o condutor [Ray e Hewson, 2000].



Figura 5.3 – Resistor de carbono.

A Figura 5.4 mostra a medição das ondas de corrente com a bobina de Rogowski e o resistor de carbono. As medições foram realizadas com o objetivo de verificar a onda de corrente real gerada pelo gerador. Observa-se que as ondas foram similares tanto na amplitude como no tempo de frente.

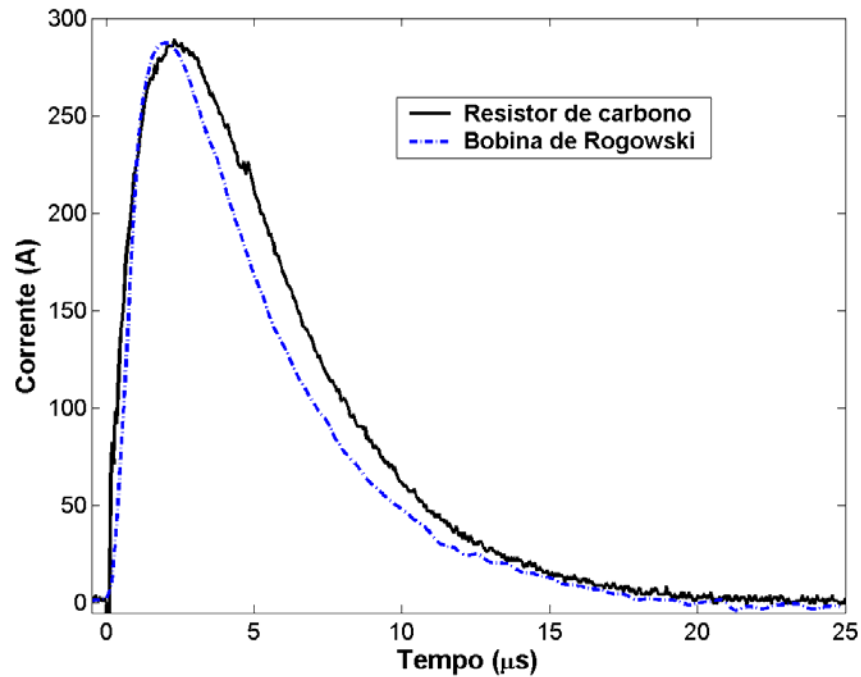


Figura 5.4 – Comparação de onda de corrente entre o resistor de carbono e a Bobina de Rogowski.

Na Figura 5.5 mostra-se a queda de tensão medida nos terminais do dispositivo. A onda foi medida utilizando o sistema desenvolvido apresentado no capítulo 3. Na figura podem ser observados dois aspectos importantes: o primeiro aspecto, a onda medida apresenta uma ligeira oscilação (acredita-se que as causas sejam devido à indutância natural do transdutor resistivo).

Na figura 5.6 apresenta-se a comparação das formas de onda de tensão medida pelo sistema de medição desenvolvido (amplitude 0,87V) e corrente medida pela bobina de Rogowski (amplitude 290 A, tempo de subida $\sim 2,5 \mu\text{s}$). Observa-se que a onda de corrente está adiantada em relação à onda de tensão.

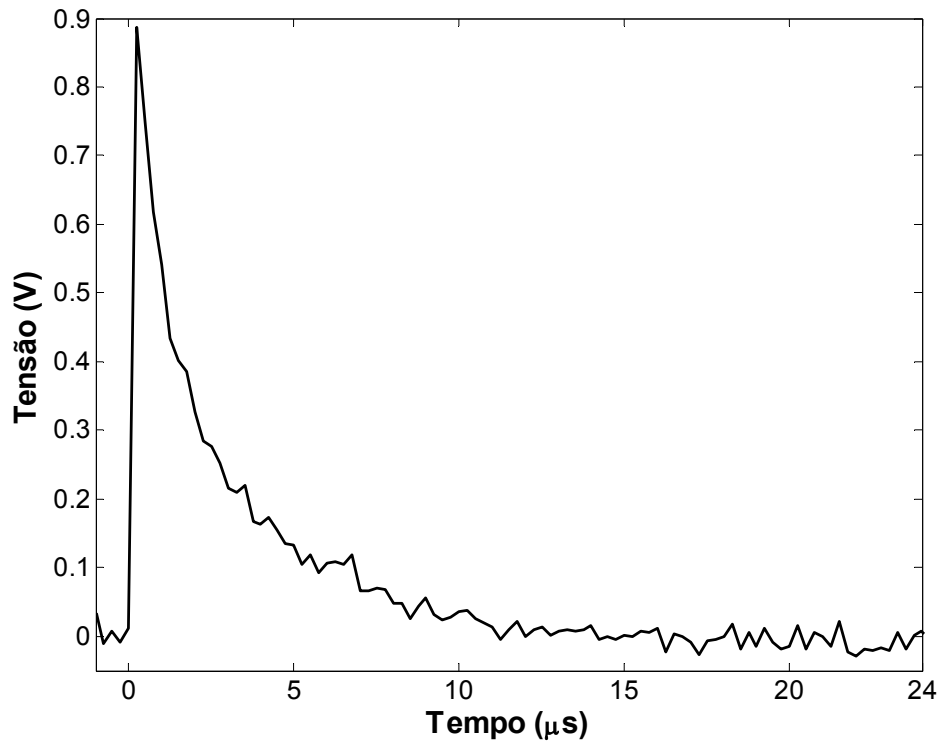


Figura 5.5 – Onda de tensão medida com o transdutor resistivo.

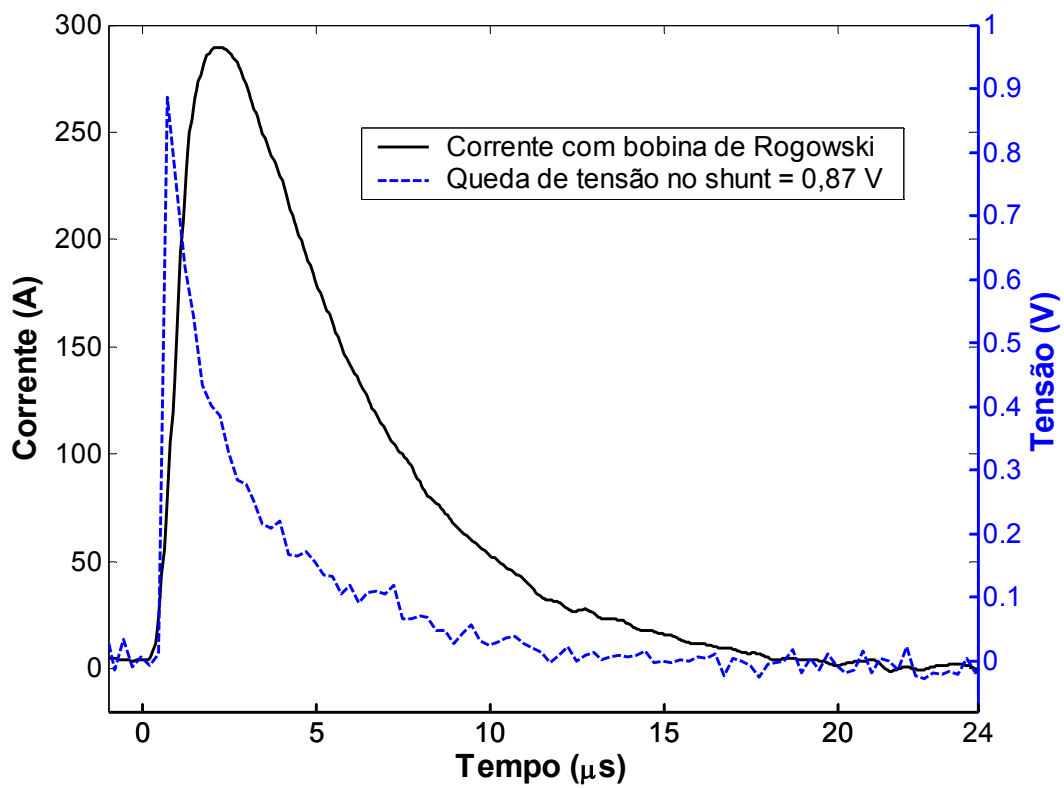


Figura 5.6 – Comparação da queda de tensão medida com o transdutor resistivo e a corrente com a bobina de Rogowski.

Observa-se que a queda de tensão medida com o dispositivo é muito mais rápida, quando comparada com a corrente medida com a bobina de Rogowski. Isto é causado pela indutância do transdutor construído.

Na Figura 5.7 mostra-se a comparação das ondas de corrente medida pela bobina de Rogowski e a corrente reconstituída aplicando a função de correção deduzida ao sinal de tensão medido pelo *shunt*. Observa-se que a onda reconstituída utilizando função de correção tem uma boa aproximação quando comparada com a onda de corrente medida com a bobina de Rogowski.

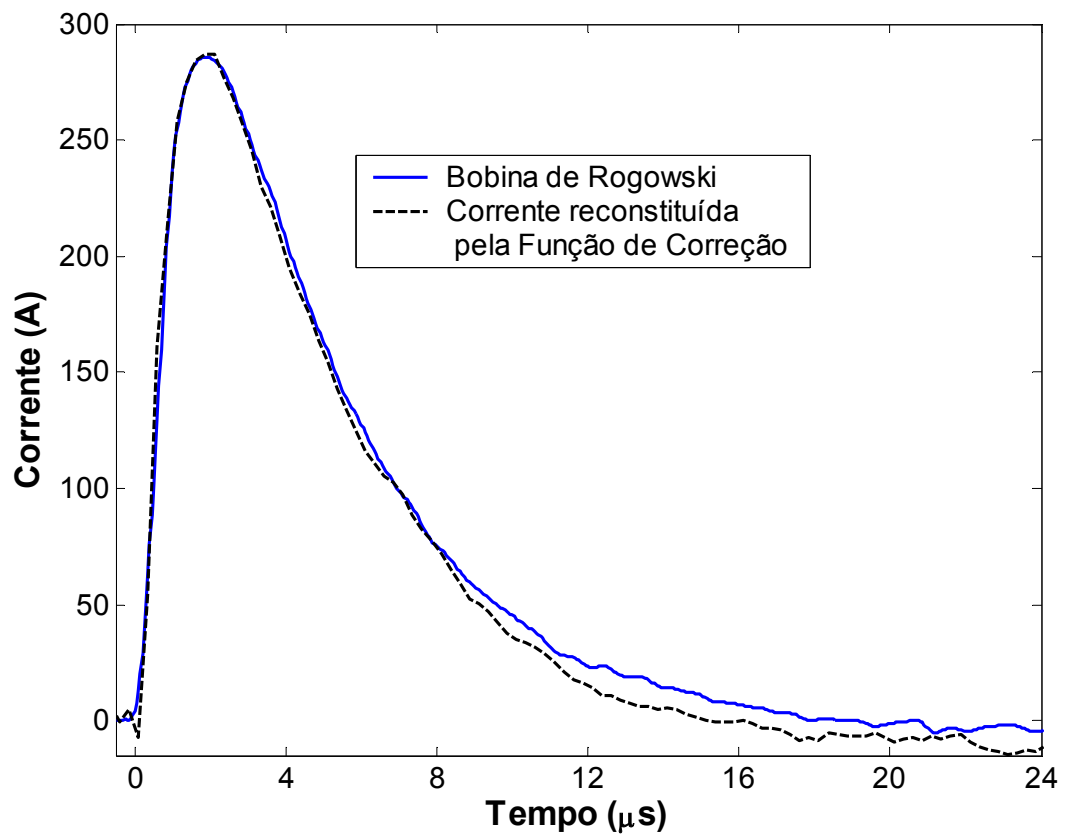


Figura 5.7 – Comparação das ondas de corrente: pela bobina de Rogowski e reconstituída pela função de correção.

Nota-se o casamento dos resultados na frente da onda, onde a bobina de Rogowski tem ótima resposta. A diferença ocorre na parte lenta da onda, justamente na faixa onde tal bobina apresenta uma resposta ruim.

5.3 Testes do Sistema de Medição para Corrente de Alta Amplitude e Altas Frequências

Os testes para corrente impulsiva de altas amplitudes, típicas de corrente das descargas atmosféricas, foram realizados no LEMAT - CEMIG. As ondas de corrente injetadas no transdutor resistivo têm amplitudes e tempo de frente diferentes, sendo que os valores da amplitude variaram de 10 kA a 100kA.

Nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 têm-se as ondas de tensão impulsiva medida nos terminais do transdutor resistivo desenvolvido. São mostradas as medições de corrente de amplitudes de 20 kA a 70 kA realizadas no laboratório. A Tabela 5.1 mostra as características das ondas: forma de onda e amplitude de corrente (valores fornecidos pelo LEMAT), e queda de tensão medida nos terminais do dispositivo desenvolvido.

Figura	Forma de onda (μ s)	Corrente (kA)	Queda de tensão (V)
5.8	8/20	20	16,7
5.9	4/10	46,1	38,3
5.10	4/10	67,8	60,2

Tabela 5.1 - Ondas de corrente utilizados no teste da CEMIG.

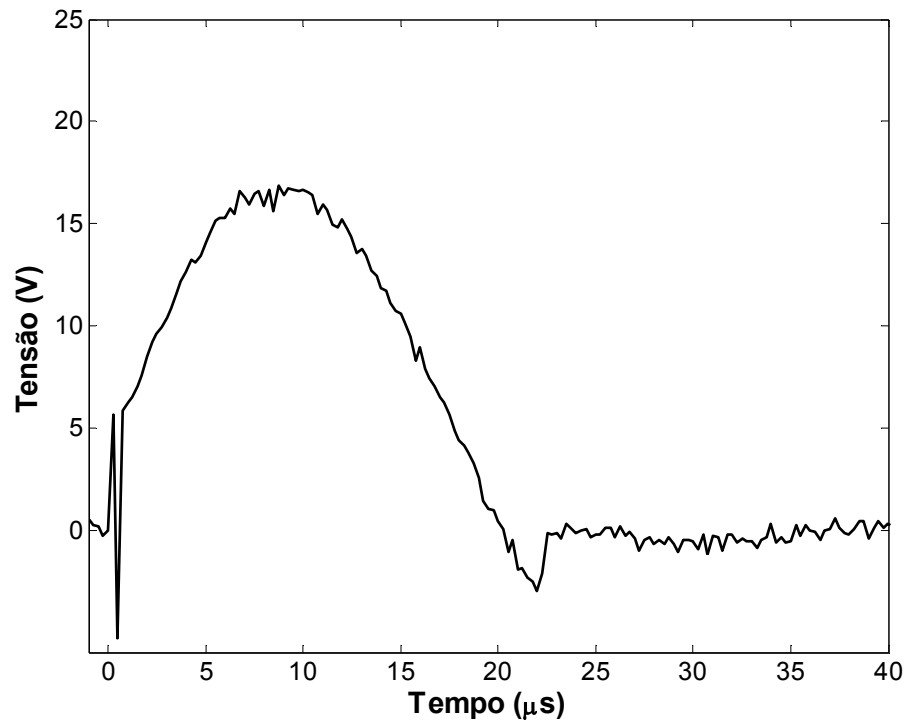


Figura 5.8 – Queda de tensão medida com o sistema de medição: tipo de onda 8/20 μs .

As Figuras 5.9 e 5.10 têm o mesmo tipo de onda, porém têm diferentes amplitudes. Outros resultados similares de forma de onda podem ser encontrados em [Gómez et al., 2005a].

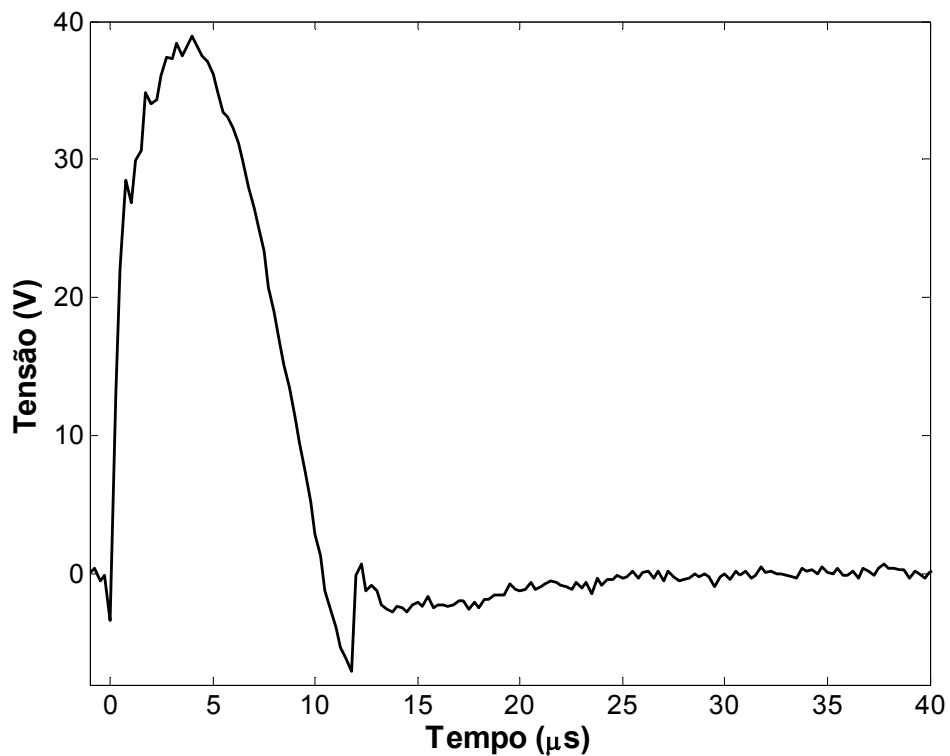


Figura 5.9 – Queda de tensão medida com o sistema de medição: tipo de onda 4/10 μs .

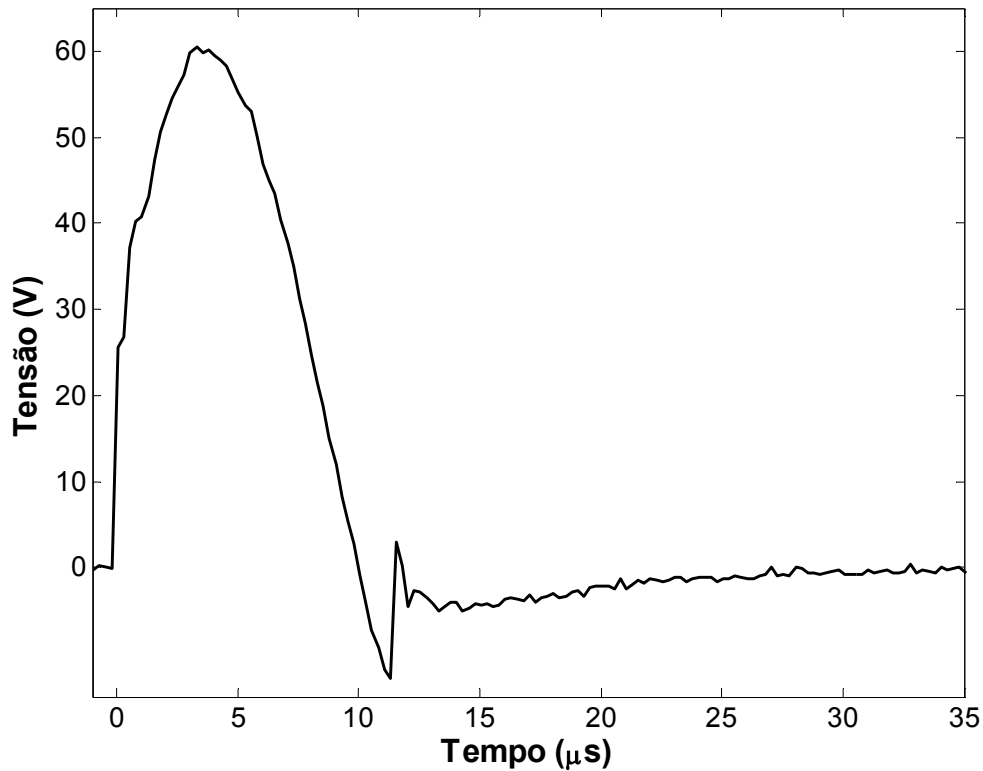


Figura 5.10 – Queda de tensão medida com o sistema de medição: tipo de onda 4/10 μs .

As Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 mostram a comparação da corrente medida pela bobina de Pearson no laboratório de LEMAT e aquelas reconstituídas utilizando a função de correção desenvolvida.

Na Figura 5.11, tem-se a comparação das ondas de corrente: a corrente medida pela bobina de Pearson (amplitude ~ 20 kA) e a corrente reconstituída utilizando a função de correção (amplitude $\sim 18,9$ kA).

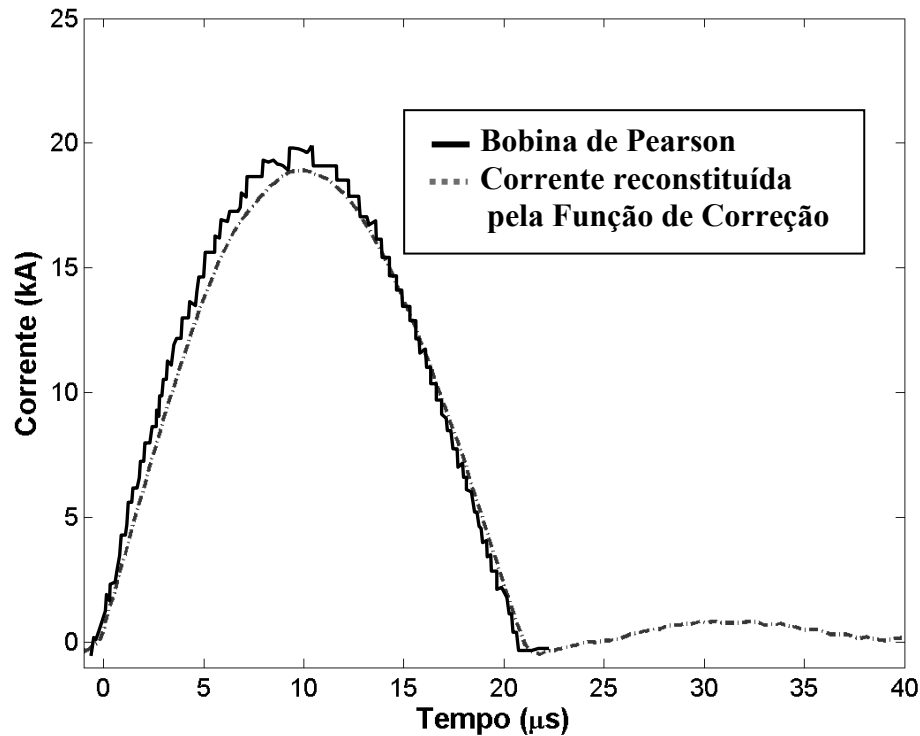


Figura 5.11 – Comparação de onda de correntes: Bobina de Pearson e a corrente reconstituída pela função de correção (queda de tensão: Figura 5.8).

Na Figura 5.12, tem-se a comparação das ondas de corrente medida pela bobina de Pearson (amplitude $\sim 46,1$ kA, tipo de onda 4/10 μ s) e a corrente reconstituída utilizando a função de correção (amplitude $\sim 45,2$ kA).

Na Figura 5.13, tem-se a comparação das ondas de corrente: em linha contínua, a corrente medida pela bobina de Pearson no laboratório LEMAT (tipo de onda 4/10 μ s) de amplitude $\sim 67,8$ kA e em linha pontilhada a corrente reconstituída utilizando a função de correção (amplitude ~ 66 kA). A onda de tensão medida pelo transdutor é a mostrada na Figura 5.10.

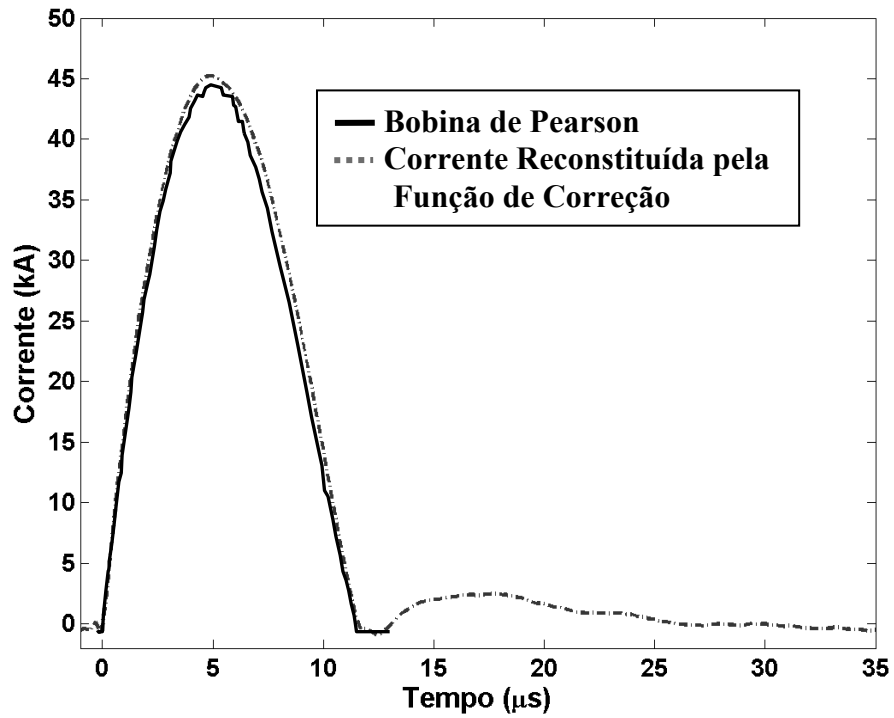


Figura 5.12 – Comparação de ondas de correntes: Bobina de Pearson e corrente reconstituída pela função de correção (queda de tensão: Figura 5.9).

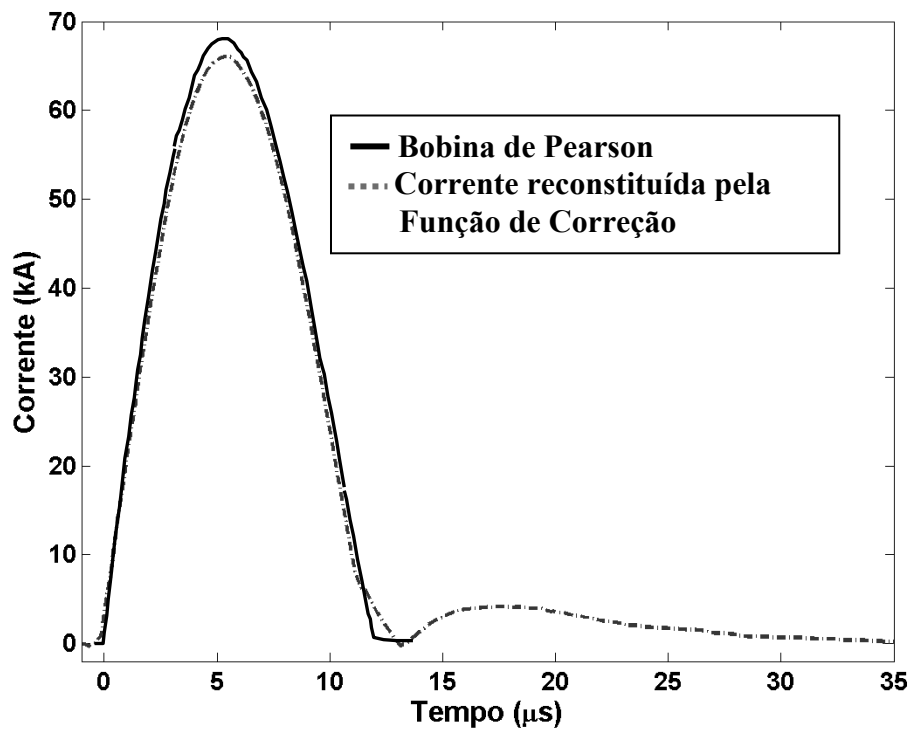


Figura 5.13 – Comparação de ondas de correntes: Bobina de Pearson e corrente reconstituída pela função de correção (queda de tensão: Figura 5.10).

Observando-se os resultados obtidos pelo sistema de medição desenvolvido (mostrada no capítulo 3 desta tese), chegou-se a uma conclusão. Devido ao transdutor ter um valor muito reduzido de resistência, seria muito imprecisa a medição de correntes em baixas frequências e baixas amplitudes, características estas das componentes contínuas de corrente de descargas atmosféricas. Mas, uma vez que um dos objetivos deste trabalho é obter também resultados de medições das componentes contínuas, foi necessário o desenvolvimento de um segundo transdutor específico para este fim, descrito no item seguinte.

5.4 Construção do Transdutor para Medir Correntes de Baixa Amplitude

O transdutor resistivo para medição de corrente de descargas de baixa amplitude apresenta forma cilíndrica (disposição dos fios em forma de zig-zag). O dispositivo construído foi projetado para medir correntes até uma amplitude de aproximadamente 5 kA.

A principal diferença do transdutor mostrado no capítulo 3 (transdutor de corrente para medir em altas frequências e alta amplitude), é que o novo transdutor resistivo foi construído utilizando-se o fio níquel-cromo (Ni80% e Cr20%). Nesta nova construção, foi observado certo cuidado para minimizar a indutância do transdutor *shunt*, possibilitando, assim, a medição direta de correntes, utilizando-se a lei de Ohm [$i_{(t)} = v_{(t)} / R$].

Por exemplo, foi necessário que o espaçamento entre os fios (forma de zig-zag) seja pequeno (para minimizar a indutância mútua); o comprimento do fio condutor foi reduzido para se obter o valor adequado da resistência.

Na Figura 5.14 mostra-se o posicionamento do fio (forma de zig-zag) num cilindro de material isolante na construção do novo transdutor, cujo diâmetro interno do cilindro é de 200 mm e comprimento de 193 mm. O diâmetro do fio níquel-cromo utilizado foi de 0,644 mm. A resistência elétrica a 20 °C é de 3,86 Ω /m, segundo referência teórica (*Kanthal appliance alloys handbook*). As setas indicam o caminho da corrente no condutor.

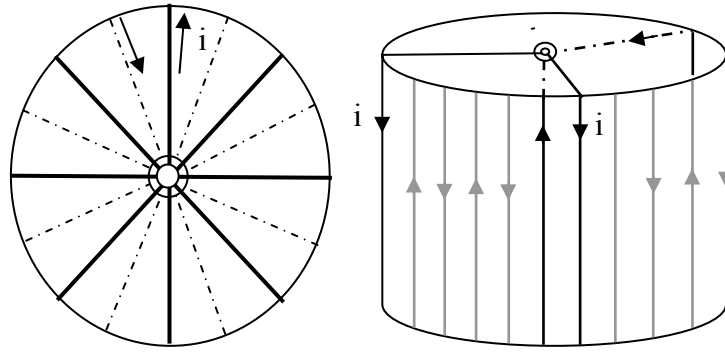


Figura 5.14 - Diagramas de posicionamento dos fios NiCr (zig-zag) que compõem o transdutor resistivo para medir correntes de baixa amplitude: a) Vista de cima. b) Vista lateralmente.

Na Figura 5.15 mostra-se a localização dos fios de NiCr (1); em (2) haste de cobre que servirá para a o fluxo de toda corrente (entrada) e também será aproveitada para a conexão com a torre na MCS.

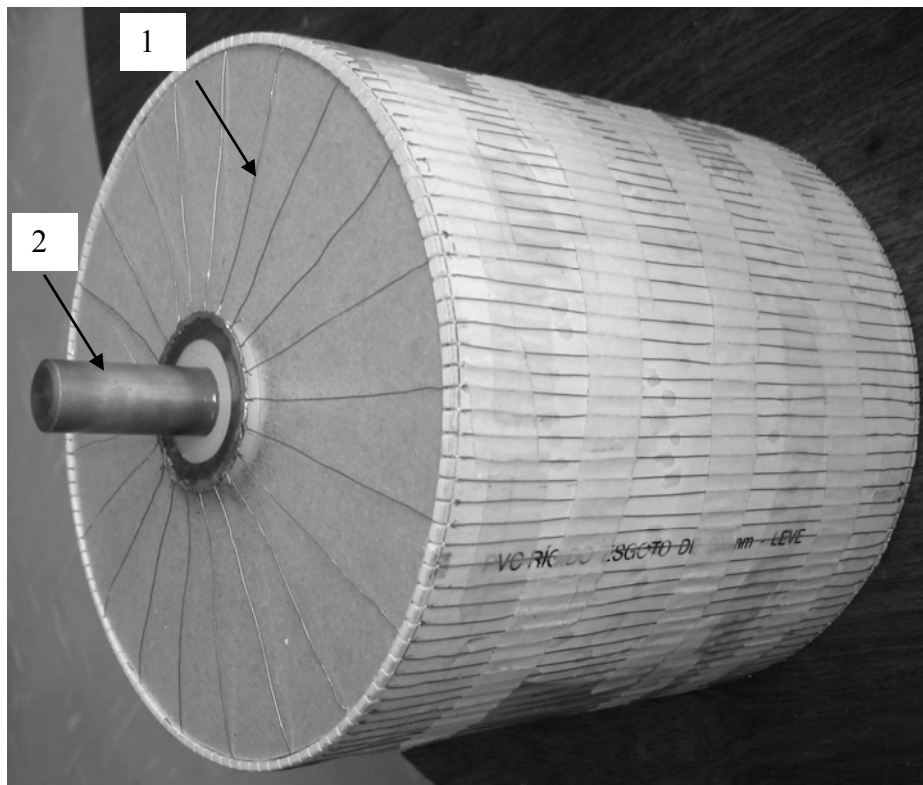


Figura 5.15 – Transdutor resistivo: composição do condutor, vista geral.

Na Figura 5.16 observa-se o posicionamento do fio NiCr (1) e o material isolante (2) teflon. O fio condutor NiCr foi dividido em 16 pedaços, para se obter o valor da resistência desejada (aproximadamente $\sim 300 \text{ m}\Omega$).

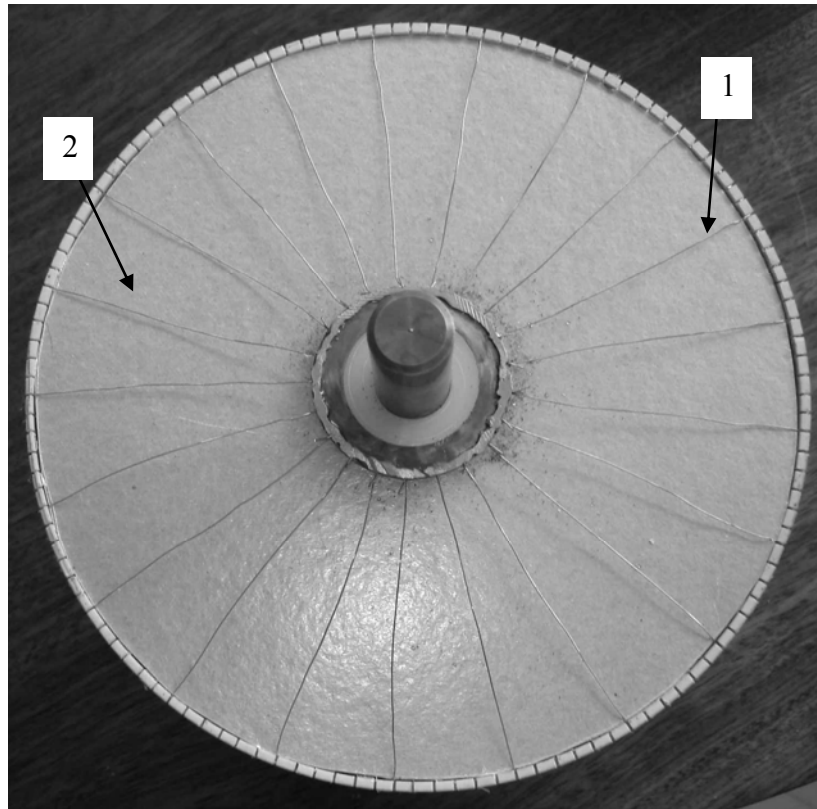


Figura 5.16 - Transdutor resistivo: composição do condutor, vista superior.

Na Figura 5.17, observa-se as partes da construção do segundo transdutor resistivo, utilizado para medir a corrente de descarga de baixa amplitude: (1) o condutor construído utilizando fio de NiCr; (2) a tampa de alumínio; (3) os tirantes de latão, que serviram para fixar a parte externa do transdutor com os outros componentes que fazem parte da construção; (4) parte externa foi construída utilizando o alumínio, onde toda corrente de descarga que atravessa o condutor fluirá para terra por meio desta “parede”.

Na Figura 5.18 mostra-se o transdutor resistivo montado para realização de testes no laboratório.

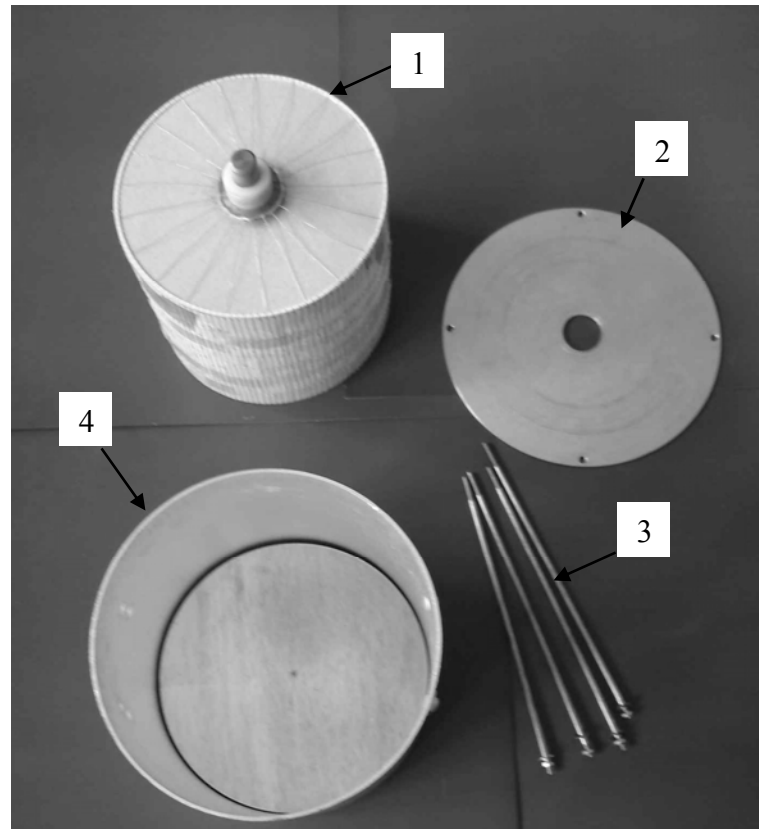


Figura 5.17 - Partes do transdutor resistivo para medir correntes de baixa amplitude.



Figura 5.18 – Transdutor resistivo: montagem completa.

5.5 Testes e Análises do Transdutor Resistivo para Correntes de Baixa Amplitude

Foram realizados testes laboratoriais para verificar o valor da resistência do transdutor. Analogamente aos testes anteriores (capítulo 3) o resultado foi comparado com as medidas realizadas pela bobina de Rogowski.

Na Figura 5.19 mostra-se a comparação do resultado obtido. Pode-se observar que a onda medida pelo novo dispositivo é similar àquela medida pela bobina de Rogowski, tanto na amplitude como no tempo de frente.

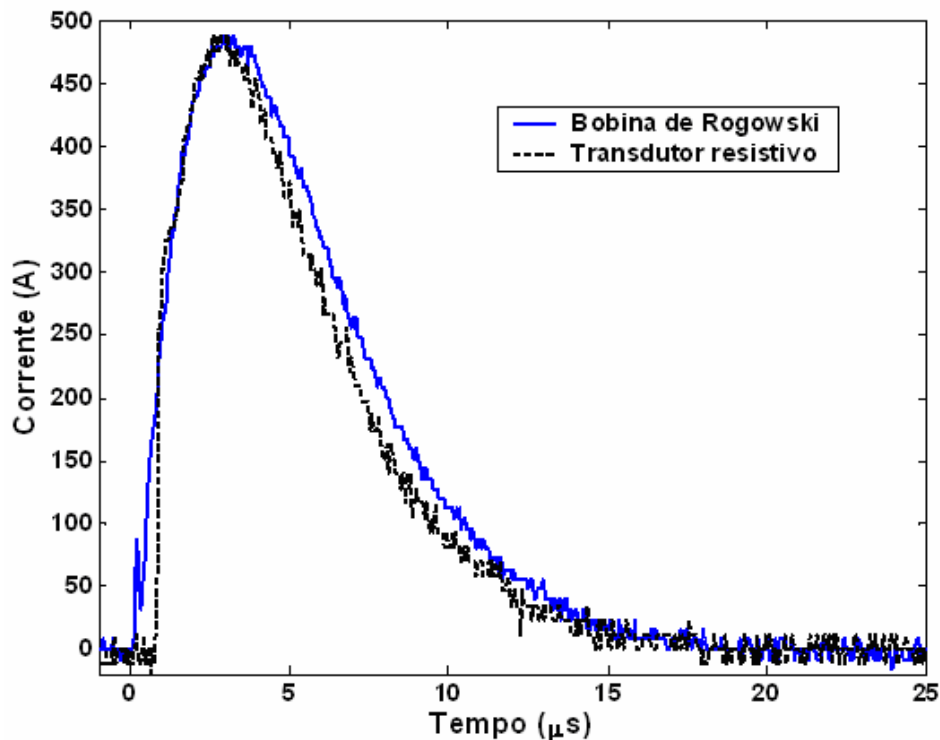


Figura 5.19 – Comparação das ondas de correntes medidas pelo dispositivo construído e a bobina de Rogowski.

Não foram realizados, até o presente momento, testes de medição com este último transdutor, uma vez que o sistema de medição (placa de aquisição, implementação do *software* etc.) ainda não foi finalizado.

O sistema de medição para correntes de baixa amplitude terá o mesmo esquema do mencionado no capítulo 3. A parte interna também será aproveitada para abrigar os equipamentos elétricos do sistema de medição (conversor eletro-óptico, circuito eletrônico; baterias para alimentar o conversor).

5.6 Sistema de Medição de Correntes Impulsivas de Alta e Baixa Amplitude

O sistema de medição (completo) compõe-se de dois subsistemas: um para medição de correntes impulsivas (descrito no capítulo 3) e o segundo para medir correntes de baixa amplitude (item 5.4).

Com a inclusão do dispositivo para medição de correntes de baixa amplitude, o circuito de medição da onda de corrente será alterado da seguinte maneira: existirão dois transdutores de corrente (*shunts*) que exercerão a medição, um mais sensível (dispositivo TR = $\sim 300 \text{ m}\Omega$) e outro menos sensível (dispositivo TR = $0,75 \text{ m}\Omega$), conforme ilustrado na Figura 5.20. Em paralelo com o transdutor mais sensível, existe um “gap”. Em série com esta associação paralela, encontra-se o transdutor menos sensível de $0,75 \text{ m}\Omega$. Os sinais de corrente registrados por estes transdutores serão transmitidos diretamente ao sistema de aquisição de dados, na sala blindada.

Para correntes com intensidades de valor de pico iguais ou inferiores a 5 kA, toda corrente percorre o transdutor mais sensível, que faz a melhor medição do sinal. Para correntes mais intensas (superiores a 5 kA), a tensão resultante no resistor em paralelo com o “gap” promove o rompimento do meio, curto-circuitando este transdutor. A corrente total flui pelo transdutor menos sensível que, neste caso, é capaz de suportar maior intensidade de corrente.

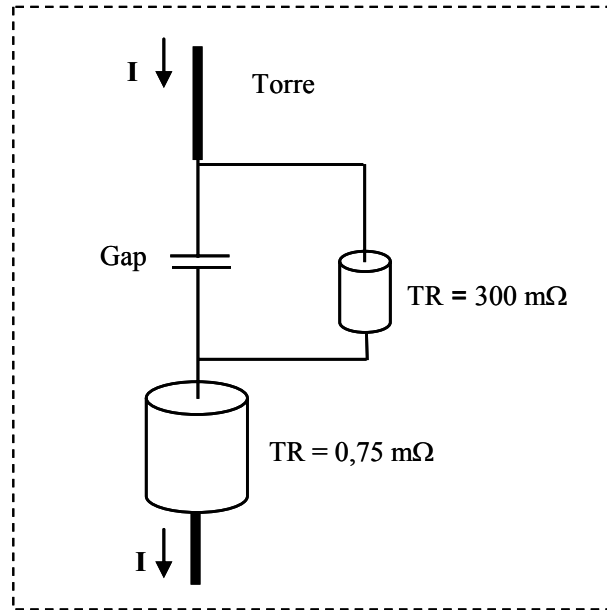


Figura 5.20 - Circuito de medição da onda de corrente: utiliza dois transdutores resistivos.

5.7 Conclusão

Em geral, as correntes medidas (com aplicação do sistema desenvolvido para medição da corrente impulsiva) em laboratório em altas frequências mostraram um bom resultado.

Os testes para correntes com amplitudes baixas apresentaram excelentes resultados. Entretanto, os testes para correntes com amplitudes altas (conforme as Figuras 5.11, 5.12 e 5.13) mostram uma pequena diferença nos resultados, considerados razoáveis para este tipo de medição.

Acredita-se que os erros apresentados para altas amplitudes sejam devido a algum tipo de problema relacionado ao sistema de medição do laboratório do LEMAT.

Com os resultados apresentados neste capítulo, conclui-se que o sistema de medição desenvolvido no capítulo 3 será utilizado para medir correntes de descargas impulsivas com amplitudes superiores a 5 kA.

O segundo dispositivo (apresentado neste capítulo) servirá para medir correntes das descargas de baixa amplitude, inferiores a 5 kA.. Este novo dispositivo tem um valor maior de resistência elétrica (300 m Ω) quando comparado com o dispositivo para medir correntes de alta amplitude em altas frequências (0,75 m Ω).

A nova configuração do sistema de medição de correntes de descargas será composta de dois transdutores resistivos posicionados em série (Figura 5.20) para se medir correntes de ambas as frequências, ou seja, correntes impulsivas e correntes contínuas das descargas atmosféricas.

Até o presente momento, os primeiros testes realizados com o dispositivo para medição de correntes de baixa amplitude são animadores (obtenção da resistência desejada). No entanto, ainda se encontram em desenvolvimento os demais componentes deste sistema (conversores, placa de aquisição etc).

6 Resultado de Medição Real

6.1 *Introdução*

Logo após a incorporação do sistema de medição na estação Morro do Cachimbo (final de dezembro de 2005) ocorreram alguns problemas no funcionamento do sistema que impossibilitaram o armazenamento das formas de onda de tensão. Entretanto, após a realização de alguns ajustes esses problemas foram sanados. Atualmente o funcionamento do sistema é garantido, tanto na aquisição de dados como na medição.

O objetivo deste capítulo é apresentar resultados de medição real realizada na estação Morro do Cachimbo com o sistema desenvolvido, e descrever alguns parâmetros típicos da onda de corrente medida.

A onda medida é analisada de duas maneiras diferentes – a primeira, corrente recuperada utilizando a relação $v(t) = i(t) \cdot R$ e, a segunda, utilizando-se a função de correção.

6.2 *Estação Morro do Cachimbo -MCS*

A estação Morro do Cachimbo situa-se a 15 km ao sul da cidade de Belo Horizonte na serra do Morro do Cachimbo a 1.430 m de altitude (43°58' W, 20°00' S). A estação possui uma torre de 60 m de altura que é responsável pela captação das descargas atmosféricas que incidem na torre.

Segundo estudos realizados pela CEMIG por ocasião da implantação da Estação, no local é esperada a incidência de 5 a 8 descargas por ano [Schroeder et al., 2002].

Na Figura 6.1 mostra-se uma vista geral da estação MCS, incluindo a torre de 60 m. Na base encontram-se os instrumentos de medição responsáveis pelo registro da forma de onda, e aproximadamente a 15 m uma casa blindada, que é o abrigo principal onde se encontram os equipamentos de medição e controle.



Figura 6.1 - Estação Morro do Cachimbo com torre de 60 m de altura.

No local, também, são realizados outros tipos de medições: medição de campo elétrico, registros fotográficos e de vídeo, contador de descargas etc. Outras informações podem ser encontradas em [Visacro et al., 2004].

Na Figura 6.2 mostra-se o transdutor resistivo coaxial que se encontra na base da torre, responsável pela medição da onda. Conforme descrito no capítulo 3, no interior encontram-se os equipamentos eletrônicos responsáveis pela medição da forma de onda.



Figura 6.2 – Transdutor resistivo coaxial na base da torre.

Para garantir o funcionamento do sistema e minimizar a umidade dentro do dispositivo, o mesmo foi vedado com silicone gel ao redor e em todos os pontos de acesso. Desta maneira, o funcionamento no campo foi garantido. Toda vez que o transdutor resistivo for aberto, o processo de vedação deve ser repetido.

Outro ponto importante que deve ser mencionado é a carga das baterias que alimentam o conversor E/O. O mesmo é realizado via conector externo, periodicamente, por carregadores. Esta alimentação deve ser realizada quando não existe nenhuma tempestade próxima da estação. Caso contrário, o carregamento deve ser evitado.

6.3 *Medições Realizadas*

Desde que o sistema de medição foi incorporado à estação Morro do Cachimbo (Março de 2005), o mesmo registrou uma descarga de polaridade negativa com uma única corrente de retorno [Gómez et al., 2007]. A data do registro foi 01 de março de 2006 às 16:21:03 horas (GMT).

Na Figura 6.3 mostra-se a forma de onda da queda de tensão medida nos terminais do dispositivo (amplitude de 82,6 V). A duração total da descarga registrada teve um tempo de 1700 μs .

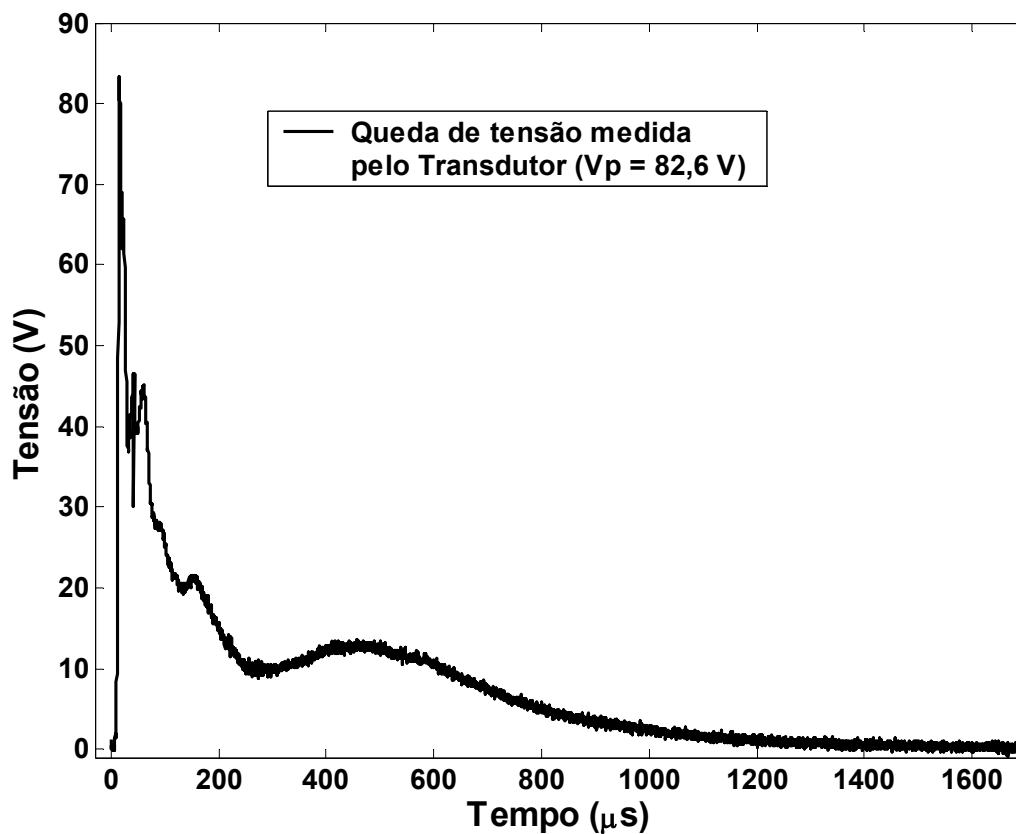


Figura 6.3 - Queda de tensão medida com o sistema.

Na Figura 6.4 é mostrado um *zoom* da forma de onda da tensão, para melhor visualização da onda.

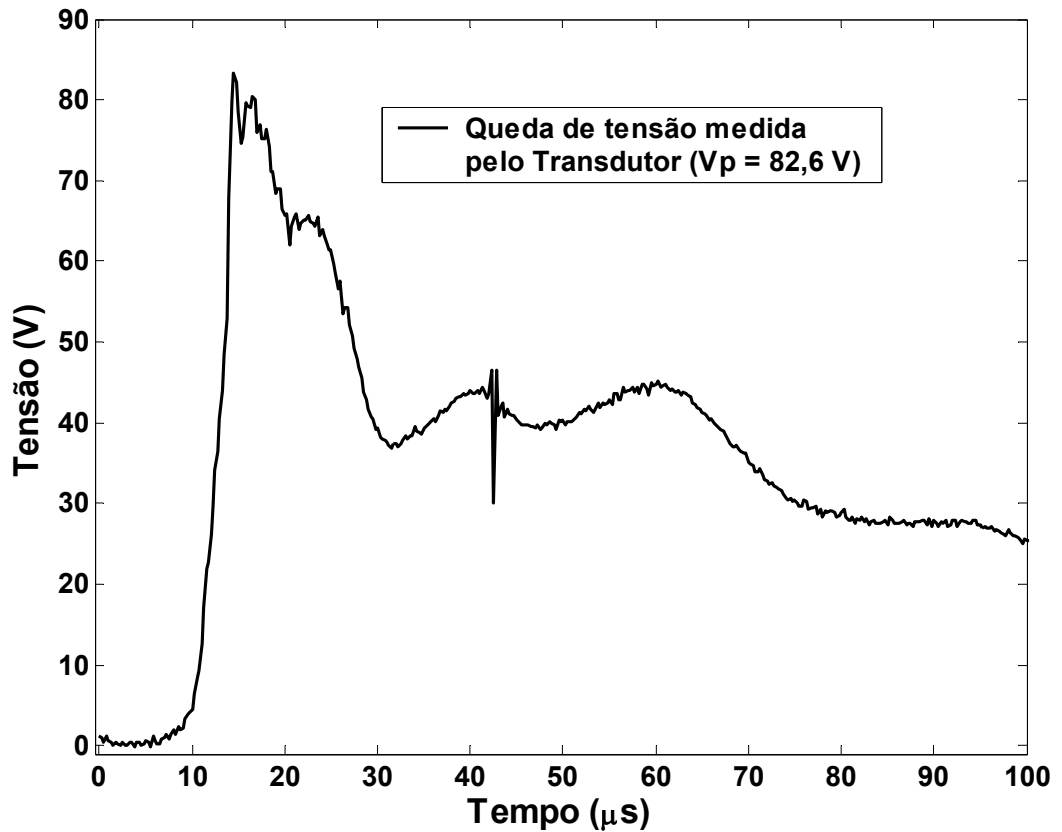


Figura 6.4 – Zoom da forma de onda de tensão medida com o sistema.

6.4 Reconstituição da Forma de Onda

Na Figura 6.5 apresenta-se a forma de onda da corrente reconstituída utilizando a função de correção desenvolvida no capítulo 4 desta tese.

Comparando a onda de corrente reconstituída e a onda de tensão, observa-se que existe uma oscilação na onda da tensão. Acredita-se que esta oscilação seja devido à indutância do transdutor resistivo.

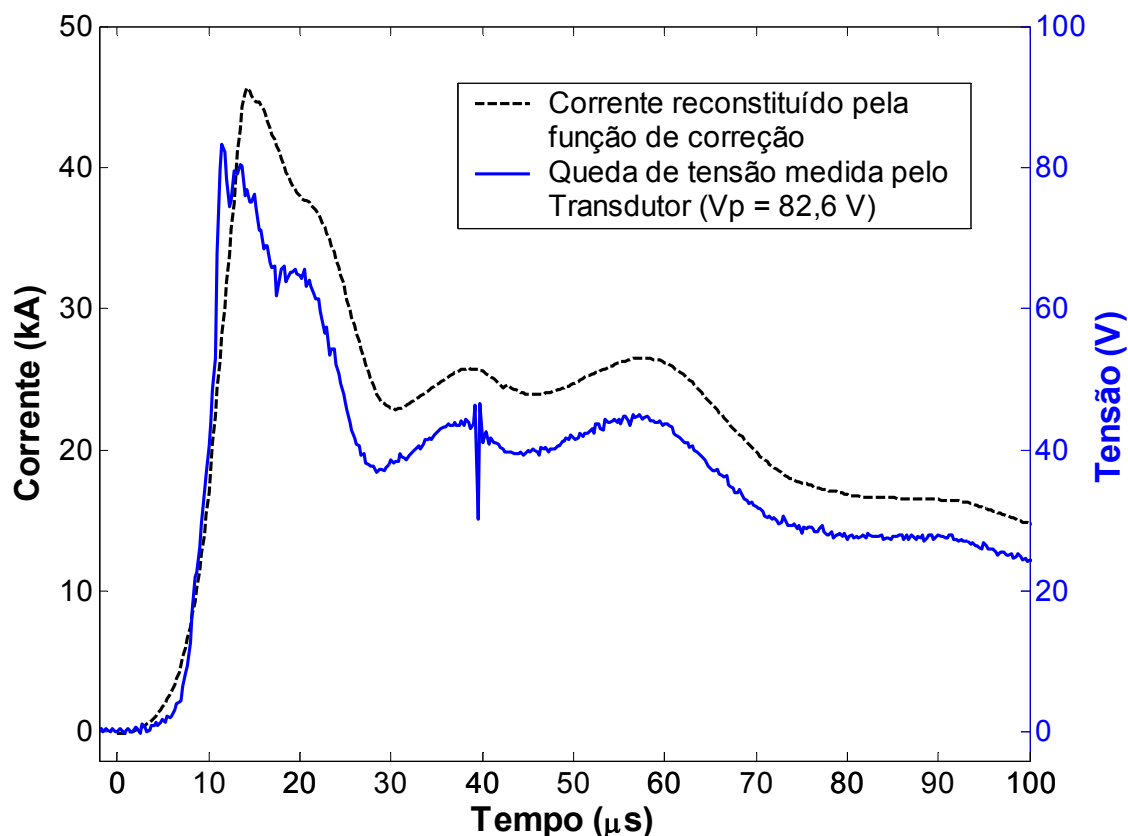


Figura 6.5 – Comparação das ondas de tensão e corrente, tempo 100 μ s.

Conforme mostra a Figura 6.5, a diferença entre a onda de corrente e onda de tensão é significativa. A corrente varia lentamente até atingir aproximadamente 8 kA no tempo de 8 μ s. A partir deste ponto a corrente varia lentamente até alcançar o pico máximo da onda 46,4 kA. Foi possível calcular a máxima taxa de crescimento da onda de corrente $di/dt = 7,8$ kA/ μ s (em 10 μ s). Caso a onda de corrente fosse recuperada diretamente da tensão medida (valor da resistência 0,75 m Ω), utilizando a lei de Ohm ($V(t) = I(t).R$), o tempo de frente da onda de corrente seria de 11,5 μ s em vez do valor 14,5 μ s. Também o valor de pico da onda de corrente calculado seria significativamente mais elevado (110 kA).

A corrente reconstituída diretamente (lei de Ohm) apresentou maior valor de amplitude e menor valor de tempo de frente. A diferença destes valores (tanto do tempo como da amplitude da onda) deve-se ao fato da existência da indutância no transdutor resistivo.

6.5 *Parâmetros Típicos da Forma de Onda de Corrente Medida*

Os parâmetros característicos de descargas atmosféricas, medidos em torres instrumentadas são detalhados em [Berger et al., 1975].

Devido ao fato que somente um registro foi obtido, serão detalhados os parâmetros de tempo (tempo de frente de onda, o tempo de meia onda e o tempo de duração de descarga) típicos da onda de corrente medida, já que para cálculo dos outros parâmetros de descarga deve-se ter um banco de registros.

De acordo com [Berger et al., 1975] os parâmetros relacionados ao primeiro pico (I_{p1}) são: T10, Td10, T30, Td30, S10, S30 e TANG.

T10 é o intervalo de tempo entre as amplitudes de 10 % e 90% da corrente na frente de onda;

Td10 é o tempo de frente equivalente ($Td10 = T10/0,8$);

T30 é o intervalo de tempo entre as amplitudes de 30 % e 90% da corrente na frente de onda;

Td30 é o tempo de frente equivalente ($Td30 = T30/0,6$);

S10 é taxa de crescimento da corrente entre as amplitudes de 10 % e 90% em relação ao pico (I_{p1});

S30 é taxa de crescimento da corrente entre as amplitudes de 30 % e 90% em relação ao pico (I_{p1});

TANG é a máxima taxa de crescimento da corrente na frente de onda;

T50 intervalo de tempo entre o ponto definido pelo valor da corrente 2 kA na frente da onda e o ponto na cauda relativo ao valor de 50% do pico de corrente.

Neste trabalho, ao analisar a onda de corrente, relativo à frente de onda, o valor admitido como referência foi o início da onda, ou seja o ponto (0,0). Diferentemente da referência limite inferior de pico de corrente adotado por [Berger et al., 1975], de 2 kA. Alguns parâmetros típicos são derivados a partir da Figura 6.6 .

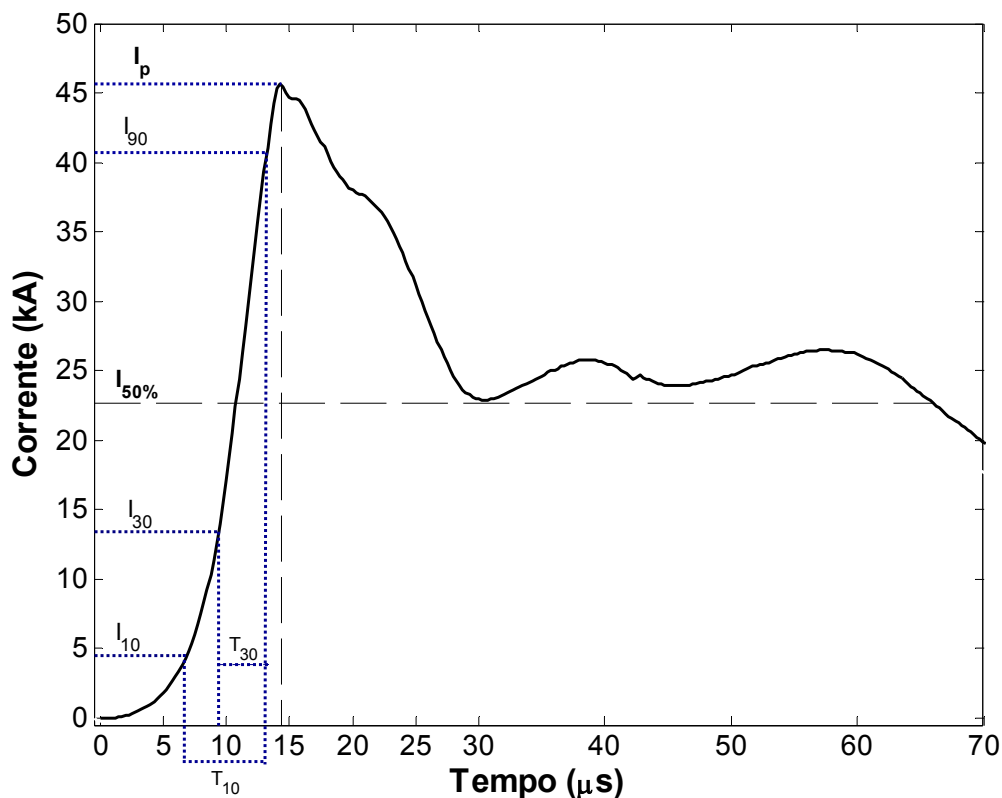


Figura 6.6 – Onda de corrente para efeitos de derivação de parâmetros típicos de tempo.

Alguns valores de correntes da onda de corrente de descargas medida pelo sistema são apresentados na Tabela 6.1.

Parâmetros	I_p	I_{10}	I_{30}	I_{90}	I_{50}
Valores aprox.	46,4 kA	4,64 kA	13,92 kA	41,76 kA	23,2 kA

Tabela 6.1 – Valores aproximados da corrente medida.

Alguns valores de tempos da onda de corrente de descargas medida pelo sistema são apresentados na Tabela 6.2.

Parâmetros	T_f	T_{10}	T_{30}	T_{d10}	T_{d30}	T_{50}
Valores aprox.	14,5 μs	7,3 μs	4,2 μs	9,2 μs	7 μs	66,7 μs

Tabela 6.2 – Valores aproximados do tempo da onda medida.

6.6 *Conclusões*

Os resultados apresentados neste capítulo confirmam o funcionamento do sistema de medição e do transdutor desenvolvido, eficientemente, tanto nas condições do campo como nas medições de correntes impulsivas de descargas atmosféricas.

O registro real de onda apresentada na Figura 6.5 mostra uma distorção na onda de tensão, devido ao efeito indutivo, comparando com a onda de corrente, relativamente lenta.

Os parâmetros apresentados da onda real de corrente apresentaram valores esperados para este tipo de medição.

7 Conclusões e Proposta de Continuidade

7.1 *Introdução*

Este trabalho teve por objetivo o projeto e desenvolvimento de um sistema para medição de correntes das descargas atmosféricas. Foram desenvolvidas diversas atividades durante a realização do trabalho, compreendendo, basicamente, três realizações principais:

- A implementação de um transdutor resistivo para medição da componente impulsiva da corrente de descargas atmosféricas e de um segundo transdutor destinado a medir correntes de descargas de baixa amplitude.
 - Conjunto de desenvolvimentos para a configuração do sistema completo de medição, constituído de circuitos eletrônicos, transdutores, sistemas de transmissão óptica e de aquisição de dados.
 - Adoção de uma abordagem diferenciada para recuperar com elevado grau de exatidão a onda de corrente através dos sinais de tensão medidos nos terminais do transdutor,
-

por meio de uma função de correção. Esta considera a presença do efeito das impedâncias interna e externa do *shunt* e compensa o efeito da variação dos parâmetros resistência e indutância do dispositivo em função da frequência, no domínio específico de componentes de cada corrente medida.

7.2 Principais Conclusões e Aspectos Originais do Trabalho

O sistema para medição das correntes das descargas desenvolvido tem como principais componentes os dois transdutores resistivos, que se destinam à medição das componentes impulsivas de alta e baixa amplitude da corrente de descargas atmosféricas.

O aspecto original de maior relevância neste trabalho corresponde ao domínio da tecnologia de fabricação de dispositivos *shunts* para medição de correntes de descargas de alta intensidade. A abordagem tradicional adotada para medição deste tipo de corrente usando resistores *shunts* é baseada na aplicação de um valor constante para a relação tensão/corrente. Isto requer que o dispositivo apresente valor diminuto de indutância (menos de 50 pH) para se assegurar tempo de subida da onda de tensão extremamente rápido (menos de 45 ns) e uma larga faixa de passagem (frequência de corte superior a 8 MHz).

Valor tão reduzido de indutância pode ser obtido em dispositivos comerciais usando-se espessuras muito finas do material resistivo empregado na construção do *shunt*. Entretanto, esta prática é responsável por limitar a máxima energia de dissipação permitida para o dispositivo (tipicamente $E_{\max} \leq 5$ kJ). Se o valor de E_{\max} é ultrapassado, a variação do valor de resistividade do material devido ao aumento excessivo de temperatura afeta o valor de sua resistência, causando erros na medição.

O sistema de medição desenvolvido adota uma abordagem diferente, que não requer que o dispositivo apresente um valor constante para a relação tensão/corrente em função da frequência. A abordagem requer apenas que esta relação seja conhecida na faixa de frequência de interesse. O aspecto mais atrativo desta abordagem consiste na possibilidade de se obter valores muito elevados para E_{\max} . Assim, desenvolve-se um dispositivo com valor de

indutância superior ao adotado nos dispositivos comerciais, mas cujo efeito pode ser corrigido a partir do conhecimento do comportamento da sua impedância no espectro de frequências.

O *shunt* desenvolvido possui uma resistência de $0,75 \text{ m}\Omega$ a baixa frequência, uma indutância de 110 pH (a 1 MHz) e o valor permitido de energia máxima dissipada é de 144 kJ (E_{max}). Em função da geometria muito bem definida do dispositivo, é possível determinar com exatidão os valores de sua resistência, indutância interna (ao condutor) e indutância externa (relativa ao campo compreendido entre os cilindros condutores). A Figura 4.3 mostra os valores da resistência e das reatâncias do dispositivo no espectro de frequência de interesse para a medição de descargas atmosféricas. Nesta perspectiva, o dispositivo tem uma frequência de corte de $1,2 \text{ MHz}$ e tempo de subida de onda de 300 ns , valores apropriados para o tipo de abordagem adotada para a recuperação da onda de corrente.

Outro aspecto diferenciado é a forma coaxial do dispositivo que permite alocar em seu interior, isento de efeitos magnéticos, o circuito eletrônico correspondente à conformação do sinal detectado e o conversor eletro-óptico. Este aspecto é fundamental para assegurar uma medição livre da interferência do intenso campo eletromagnético junto ao percurso de corrente.

A estratégia adotada para se recuperar a onda de corrente original a partir da onda de tensão medida nos terminais do dispositivo é simples. A onda de tensão medida é registrada digitalmente em tempo real. Através de um processamento "*off-line*", a onda é submetida à FFT (*Fast Fourier Transform*) e cada componente da onda de tensão é determinada (em fase e ângulo). Para cada frequência, a componente de corrente é calculada, dividindo-se a componente de tensão pela impedância complexa do *shunt* naquela frequência específica. A IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) é aplicada sobre todas as componentes de corrente para prover a onda de corrente no domínio do tempo. Considerando-se os limites típicos usuais dos parâmetros de tempo envolvidos nas descargas atmosféricas, o uso de um limite superior de frequência de 20 MHz e um passo de frequência de 1 kHz assegura excelente nível de exatidão na resposta do dispositivo.

Merece um comentário específico uma solução de compromisso adotada no projeto. Embora a questão do valor reduzido da indutância do dispositivo tenha deixado de ser um fator crítico, foi necessário assegurar um valor de indutância não muito elevado, do nível daquele adotado no dispositivo. Este cuidado destina-se a evitar que a frente da onda de tensão medida seja muito mais rápida do que aquela da onda de corrente, o que poderia requerer uma taxa de amostragem excessivamente elevada da placa de aquisição de dados.

Os testes laboratoriais mostraram o excelente desempenho do *shunt* desenvolvido, que já forneceu inclusive o resultado de medição real da corrente de descarga mostrado em capítulo anterior.

A comparação do dispositivo com aqueles disponíveis no mercado denota algumas de suas características superiores. É muito usual o uso de um *shunt* comercial de 1 m Ω para medição da corrente de descargas induzidas por foguetes de valor da ordem de cinco mil dólares. Este dispositivo tem uma banda de passagem de 8 MHz, 45 ns de tempo de frente (valor aproximado de indutância de 50 pH) e um limite de máxima energia dissipada de 5 kJ. *Shunts* comerciais com banda de 48 MHz têm limite de energia dissipada ainda inferior (da ordem de 2 kJ).

O primeiro dispositivo é capaz de medir um pico de corrente de até aproximadamente 500 kA, considerando-se uma onda padronizada de 8/20 μ s. Como as ondas de descargas negativas e positivas têm tipicamente tempo de meia onda bem superior ao referido, o limite do valor de pico tende a ser bem menor, de ordem inferior à metade do valor citado.

O dispositivo desenvolvido tem capacidade de medição de um valor de pico de corrente de até aproximadamente 3500 kA (para uma onda padronizada de 8/20 μ s) e limite de energia máxima dissipada de 144 kJ, valor entre 20 e 50 vezes superior àquele dos outros *shunts* citados. A observação deste limite assegura um adequado comportamento térmico (variação de resistência inferior a 2% no limite de variação de temperatura de 200°C). O dispositivo é ainda provido de isolamento térmico para preservar os circuitos eletrônicos interiores e tem um custo estimado de fabricação inferior a seiscentos dólares americanos.

Embora, a construção do transdutor resistivo de $300\text{ m}\Omega$ para medição das correntes lentas de menor intensidade tenha sido mais simples, a experiência desenvolvida acrescentou conhecimento tecnológico à equipe de trabalho, que permite pelo menos alcançar custos muito inferiores àqueles de dispositivos similares oferecidos no mercado e conferir-lhe algumas características mais apropriadas para a realização de medição com emprego de fibras ópticas.

A nova arquitetura de medição da estação Morro do Cachimbo (dois *shunts* posicionados em série, conforme a Figura 5.20) possibilitará a obtenção de informações de ambas componentes da corrente de descarga (arquitetura mostrada no capítulo 5): a impulsiva de curta duração e a contínua de longa duração, sem prejudicar a operação da instrumentação de medição já existente no local, que vem funcionando satisfatoriamente ao longo dos últimos anos.

7.3 Propostas de Trabalhos Futuros

A experiência desenvolvida possibilita almejar alguns aprimoramentos em termos da tecnologia desenvolvida.

Neste sentido, um desafio científico interessante cujo enfrentamento se propõe como continuidade deste trabalho é a construção de um novo transdutor resistivo, capaz de prover elementos para medição simultânea das componentes impulsivas de alta intensidade e das componentes lentas de baixa intensidade da corrente de descarga. O princípio que nortearia esta ação se basearia num significativo aumento da resistência do dispositivo e conseqüente redução de seu limite de energia máxima dissipada, tirando partido do valor muito elevado deste parâmetro alcançado no dispositivo desenvolvido.

Na seqüência deste trabalho, sugere uma investigação que integre este dispositivo num sistema de medição de muito baixo custo, capaz de disseminar a aplicação em larga escala do sistema no território brasileiro para fins de composição de uma base de dados representativa por região do país.

Por outro lado, uma ação de continuidade complementar ao sistema já desenvolvido é sua aplicação sistemática na estação para composição de uma base de dados mais completa, que inclua as componentes lentas das ondas de corrente. Com as próximas temporadas de chuvas, espera-se obter registros suficientes para formar um conjunto de dados estatisticamente relevante que possibilite, futuramente, a avaliação quantitativa de ambas as componentes da corrente das descargas atmosféricas. Também, os registros individuais de corrente poderão ser utilizados para comparação dos resultados gerados pelos diversos recursos atualmente ali empregados para medição, incluindo as bobinas de Pearson e o dispositivo especial registrador de corrente baseado na detecção do campo magnético gerado pela corrente que percorre a torre [Silvino et al., 2003].

Referências Bibliográficas

ABRAMOWITZ, M., STEGUN, I.A., “*Handbook of Mathematical Functions With Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*”, National Bureau of Standards Applied Mathematics Series – 55, December 1972.

ABNT - NBR 14074, “*Cabos Para-raios com Fibras Ópticas para Linhas Aéreas de Transmissão (OPGW) – Especificação*”.

ALVIM, G.M., NIGRI, I.A., VIANNA, V.M.J., NIEDU, B.D., OLIVEIRA, F.M.C., CORREA, P.P., CHAGAS, P. H. E., SILVA, O. A., “*Cabo OPGW: Desempenho Quanto as Descargas Atmosféricas Critério de Aceitação de Furnas*”, XVI - Seminário Nacional de Proteção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), São Paulo, Brasil, Outubro 2001.

ALVIM, G.M., VIANA, V.M.J., FALQUEIRO, C., VITÓRIO, A.M., NIEDU, B.D., “*OPGW Cables: Lightning Effects on the Field and Simulated in the Laboratory*”, In 3rd WAE International Conference on Grounding and Earthing (GROUND), Rio de Janeiro, Brazil, November 2002a.

ALVIM, M.G., FALQUEIRO, C., NIEDU, B.D., “*Designs Lightning Resistant OPGW Cables for Brazil*”, In 3rd WAE International Conference on Grounding and Earthing (GROUND), Rio de Janeiro, Brazil, November 2002b.

ASAKAWA, A., MIYAKE, K., YOKOYAMA, S., SHINDO, T., YOKOTA, T., SAKAI, T., “*Two Types Lightning Discharges to a High Stack on the Coast of the Sea of Japan in Winter*”, IEEE transaction on Power Delivery, Vol. 12, Nº. 3, July 1997.

BALANIS, C. A., *“Advanced Engineering Electromagnetics”*, John Wiley & Sons, New York 1989.

BALLAROTTI, M. G., SABA, M. M. F., PINTO JR, O., *“High-speed Camera Observations of Negative Ground Flashes on a Millisecond-scale”*, Geophysical Research Letters, Vol. 32, Nº. 23, L23802 10.1029/2005 GL023889, 2005.

BERGER, K., *“Novel Observations on Lightning Discharges: Results of Research on Mount San Salvatore”*, J. Franklin Inst. 283, pp. 478-525, 1967.

BERGER, K., ANDERSON, R. B., KRÖNINGER, H., *“Parameters of Lightning Flashes”*, Electra, Nº. 41, pp. 23-37, July 1975.

BROOK, M., KITAGAWA, N., WORKMAN, E.J., *“Quantitative Study of Stroke and Continuing Currents in Lightning Discharges to Ground”*, Journal of Geophysical Research, Vol. 67, Nº. 2, pp. 649 - 659, February 1962.

CHISHOLM, A.W., LEVINE, P.J., CHOWDHURI, P., *“Lightning Arc Damage to Optical Fiber Ground Wire (OPGW): Parameters and Test Method”*, Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, pp. 88-93, 2001a.

CHISHOLM, A.W., LEVINE, P.J., PON, C., *“Lightning Protection Aspects for Applications of Optical Fibre Ground Wire”*, In VI International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Santos - Brazil, November 2001b.

DIENDORFER, G., MAIR, M., SCHULZ, W., *“Detailed Brightness Versus Lightning Current Amplitude Correlation of Flashes to the Gaisberg Tower”*, 26th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cracow - Poland, 2002.

DIENDORFER, G., MAIR, M., SCHULZ, W., HADRIAN, W., *“Lightning Current Measurements in Austria Experimental Set-up and First Results”*, 25th International Conference on Lightning protection (ICLP), Greece, September 2000.

ERIKSSON, A. J., “*Lightning and Tall Structures*”, Transactions South African Institute of Electrical Engineering, Vol. 69, pp. 238 – 252, August 1978.

FISHER, R.J., SCHNETZER, G.H., THOTTAPPILLIL, R., RAKOV, V.A., UMAN, M.A., GOLDBERG, J.D., “*Parameters of Triggered-Lightning Flashes in Florida and Alabama*”, Journal of Geophysical Research, Vol. 98 (D12), pp. 22887 – 22902, 1993.

FUCHS, F., LANDERS, E.U., SCHMID, R., WIESINGER, J., “*Lightning Current and Magnetic Field Parameters Caused by Lightning Strikes to Tall Structures Relating to Interference Electronic System*”, Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on Vol. 40, Issue 4, pp. 444 – 451. Nov 1998.

FUCHS, F., “*Lightning Current and LEMP Parameters of Upward Discharges Measured at the Peissenberg Tower*”, In 24th International Conference on Lightning protection (ICLP), Birmingham, September 1998a.

FERNANDEZ, M.I., RAMBO, K.J., STAPLETON, M.V., RAKOV, V.A., UMAN, M.A., “*Review of Triggered Lightning Experiments Performed on a Power Distribution Systems at Camp Blanding, Florida, During 1996 and 1997*”, In 24th International Conference on Lightning protection, Birmingham, United Kingdom, September 1998.

GÓMEZ, A.N., VISACRO, S., SILVINO, J.L., RESENDE, P., FILHO, A.L.S., ROCHA, J.W., “*A Special Transducer for Lightning Current Measurement*”, In 4th International Conference on Grounding and Earthing (GROUND), Belo Horizonte, Brazil, November 2004.

GÓMEZ, A.N., VISACRO, S., SILVINO, R., “*A Transducer for Lightning Current Measurement*”, In 14th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Beijing - China, 2005.

GÓMEZ, A.N., VISACRO, S., SILVINO, R., “*A Contribution to the Measurement of Lightning Currents by Means of Resistive Transducers*”, In VIII International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), São Paulo - Brazil, November 2005a.

GÓMEZ, A.N., VISACRO, S., SILVINO, J.L., HOSTT, R., ROCHA, L.C., “*Analysis of Lightning Current Measurement by Means of Resistive Transducers*”, In 28th International Conference on Lightning protection (ICLP), Japan, September 2006.

GOMEZ, A., SILVINO, J.L., VISACRO, S., "A Contribution to the Direct Measurement of Lightning Currents by Means of Resistive Transducers", Paper-Nº. 1 JLR-2007-2, accepted for publication in the Journal of Lightning Research, 2007.

GOSHIMA, H., MOTOYAMA, H., ASAKAWA, A., WADA, A., SHINDO, T., YOKOYAMA, “*Characteristics of Electromagnetic Fields due to Winter Lightning Stroke Current to a High Stack*”, Trans. Inst. Electr. Eng. Japan, Vol.120-B, Nº. 1, pp. 44-48, 2000.

GOTO, Y., NARITA, K., “*Electrical Characteristics of Winter Lightning*”, J. Atmos. Terr. Phys. Vol. 57, pp. 449 - 459, 1995.

HEIDLER, F., HOPF, C., “*Measurement Results of the Electric Fields in Cloud-to-Ground Lightning in Nearby Munich, Germany*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 40, Nº. 4, pp. 436 - 443, November 1998.

HEIDLER, F., ZISCHANK, W., WIESINGER, J., “*Statistics of Lightning Current Parameters and Related Nearby Magnetic Fields Measured at the Peissenberg tower*”, In 25th International Conference on Lightning Protection (ISH), Rhodes, Greece, 2000.

HEIDLER, F., WIESINGER, J., ZISCHANK, W., “*Lightning Currents Measured at a Telecommunication Tower from 1992 to 1998*”, In 14th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, February 2001.

HUSSEIN, A.M., JANISCHEWSKYJ, W., MILEWSKI, M., CHANG, J.S., “*Wavefront Characteristics of the Lightning Current Measured at the Toronto CN Tower*”, Electromagnetic Compatibility, IEEE International Symposium, 2001.

HILDEBRAND, F.B., “*Methods of Applied Mathematics*”, 2nd Edition, Prentice-Hall 1976.

IEEE STANDARD 1138, “*IEEE Standard Construction of Composite Fiber Optic Overhead Ground Wire (OPGW) for Use on Electric Utility Power Lines*”, 1994.

JORDAN, D. M., IDONE, V. P., ORVILLE, R. E., RAKOV, V. A., UMAN, M. A., “*Luminosity Characteristics of Lightning M Components*”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, pp. 25: 695 - 700, 1995.

KITAGAWA, N., BROOK, M., WORKMAN, E. J., “*Continuing Currents in Cloud-to-Ground Lightning Discharges*”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 67, N°. 2, pp. 637 - 647, February 1962.

KREHBIEL, P. R., BROOK, M., McCRORY, R., “*An Analysis of the Charge Structure of Lightning Discharges to Ground*”, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, N°. C5, pp. 2432 - 2456, May 1979.

LIVINGSTON, J. M., KRIDER, E.P., “*Electric Fields Produced by Florida Thunderstorms*”, *J. Geophysical Res.*, Vol. 83, pp. 1571-1583, 1978.

LOEWENTHAL, C. F., “*Avaliação dos Efeitos de Descargas Atmosféricas em Cabos OPGW–Normalização do Método de Ensaio*”, XVI - Seminário Nacional de Proteção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), São Paulo, Brasil, Outubro 2001.

MAKSIEJEWSKI, J. L., “*Losses in Tubular Cylindrical Conductors Due to Current Surges, Taking Skin Effect Into Account*”, *IEE Proceedings-A*, Vol. 140, N°. 6, November 1993.

MAZUR V., RUHNKE, L., OLIVEIRA, R., FELIPE, M., VISACRO, S., “*The Response of Towers and Other Structures to Nearby Lightning*”, 5th In International Conference on Grounding and Earthing (GROUND), Maceió, Brazil, November 2006.

MAZUR, V., “*Triggered Lightning strikes to aircraft and natural intracloud discharges*”, *J. Geophys Res.* Vol. 94, N°. 3311 – 3325, 1989.

MIKI, M., SHINDO T., RAKOV, V.A., UMAN, M.A., RAMBO, K.J., SCHNETZER, G.H., DIENDORFER, G., MAIR, M., HEIDLER, F., ZISCHANK, W., THOTTAPPILLIL, R., WANG, D., “*Characterization of the Initial Stage of Upward-Initiated Lightning*”, 26th International Conference on Lightning protection (ICLP), Poland, September 2002.

NUCCI, C.A., RACHIDI, F., IANOZ, M.V., MAZZETTI, C., “*Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines*”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 35. N^o. 1, pp. 75 – 86, February 1993.

RAKOV, V. A., UMAN, M. A., “*Long Continuing Currents in Negative Lightning Ground Flash*”, Journal of Geophysical Research, Vol. 95, N^o. D5, pp. 5455 - 5470, April 1990.

RAKOV, V. A., UMAN, M. A., THOTTAPPILLIL, R., “*Review of Lightning Properties from Electric Field and TV Observations*”, Journal of Geophysical Research, Vol. 99, N^o. D5, pp. 10745 -10750, May 1994.

RAKOV, V.A., UMAN, M.A., RAMBO, K.J., FERNANDEZ, M.I., FISHER, R.J., SCHNETZER, G.H., THOTTAPPILLIL, R., EYBERT-BERARD, A., BERLANDIS, J.P., LALANDE. P., BONAMY, A., LAROCHE, P., BONDIOU-CLERGERIE, A., “*New Insights into Lightning Processes Gained from Triggered-Lightning Experiments in Florida and Alabama*”, Journal of Geophysical Research, Vol. 103, N^o. D12, pp. 14,117 -14,130, June 1998.

RAKOV, V. A., “*Rocket-Triggered Lightning Experiments at Camp Blanding, Florida*”, International Conference on Lightning and Static Electricity Toulouse, France, June 1999.

RAKOV, V. A., “*Positive and Bipolar Lightning Discharges: A Review*”, 25th International Conference on Lightning protection (ICLP), Greece, September 2000.

RAKOV, V.A., CRAWFORD, D.E., RAMBO, K.J., SCHNETZER, G.H., UMAN, M.A., “*M-component Mode of Charge Transfer to Ground in Lightning Discharges*”, Journal of Geophysical Research, Vol. 106, N^o. D19, pp. 22,817-22,831, October 2001.

RAKOV, V.A., “*Lightning Parameters Important for Lightning Protection*”, VI International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), São Paulo - Brazil, November 2003.

RAKOV, V. A., UMAN, M. A., “*Lightning: Physics and Effects*”, Cambridge University. Ed., 2003.

RAY, W.F., HEWSON, C.R., “*High Performance Rogowski Current Transducers*”, Power Electronic Measurements Ltd., Nottingham, UK, 2000.

SABA, M. M. F., BALLAROTTI, M. G., PINTO JR, O., “*Negative Cloud-to-Ground Lightning Properties from High-Speed Video Observations*”, Journal of Geophysical Research, 111, D03101, Doi:10.1029/2005JD006415, 2006.

SABA, M. M. F., PINTO Jr., O., SOLÓRZANO, N. N., EYBERT-BERARD, A., “*Lightning Current Observation of an Altitude-Triggered flash*”, Atmospheric Research, Vol. 76, Nº. 1-4, pp. 402 - 411, 2005.

SILVINO, J.L., MESQUITA, C.R., VISACRO, S., “*Non-direct Lightning Current Measurement for Lightning Location Systems Calibration*”, Electronics Letters, Vol. 39, Nº. 6, pp. 504-505 March 2003.

SCHROEDER, M.A.O., SOARES, A.Jr., VISACRO, S.F., “*Evaluation of Directly Measured Lightning Parameters*”, V International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), São Paulo - Brazil, May. 1999.

SCHROEDER, M.A., AMILTON, S.J., VISACRO, S., “*The Brazilian Experience on Measurement of Lightning Parameters by Means of Instrumented Tower*”, In 2nd International Conference on Grounding and Earthing (GROUND), Rio de Janeiro, Brazil, Janeiro 2002.

SCHONLAND, B.F.J., “*The Lightning Discharges*”, Handbuch Der Physik, 22, pp. 576-628, Springer Verlag, Berlin, 1956.

- SHINDO, T., UMAN, M. A., “*Continuing Current in Negative Cloud-to-Ground Lightning*”, Journal of Geophysical Research, Vol. 94, N°. D4, pp. 5189-5198, April 1989.
- THOMSON, E. M., “*Characteristics of Port Moresby Ground Flashes*”, Journal of Geophysical Research, Vol. 82, pp.1027-1036, 1980.
- THOTTAPPILLIL, R., GOLDBERG, J. D., RAKOV, V. A., UMAN, M. A., FISHER, R. J., SCHNETZER, G. H., “*Properties of M Components from Currents Measured at Triggered Lightning Channel Base*”, Journal of Geophysical Research, Vol. 100, D12, pp. 25,711-25,720, December 1995.
- THOTTAPPILLIL, R., “*Electromagnetic Environment Models for Cloud-to-Ground Lightning*”, In Proc. International Conference on Lightning Protection (ICLP), Rhodes - Greece, 2000.
- TORRES, H., TRUJILLO, O., AMÓRTEGUI, F., HERRERA, F., PINZÓN, G., QUINTANA, C., GONZÁLEZ, D., RONDON, D., SALGADO, M., ÁVILA D., “*Experimental Station to Measure Directly Lightning Parameters in Tropical Zone*”, In International Symposium on High Voiltage Engineering (ISH), London, 1999a.
- TORRES, H., TRUJILLO, O., AMORTEGUI, F., PINZON, G., QUINTANA, C., GONZALES, D., RONDON, D., SALGADO, M., AVILA, D., “*Design, Construction and Calibration of three Devices to Measure Directly Lightning Parameters*”, IEE, N°. 2, pp. 430 – 433, London, UK, 1999b.
- TORRES, H., PÉREZ, E., HERRERA, J., SALGADO, M., QUINTANA, C., RONDON, D., ÁVILA, D., GONZÁLEZ, D., “*Analysis of a Non-identifying Lightning Stroke Polarity Measured in a Natural Lightning Experimental Station in Colombia*”, In International Conference on Ground and Earthing, 2, Belo Horizonte, 2000.
- UMAN, M. A., “*The Lightning Discharge*”, San Diego: Academic Press, 1987.
-

UMAN, M. A., “*Natural Lightning*”, IEE Transactions on Industry Applications, Vol.30, N°.3, June, 1994.

UMAN, M. A., “*Lightning*”, New York, McGraw-Hill, 1984.

UMAN, M. A., “*Natural and Artificially-Initiated Lightning and Lightning Test standards*”, In Proceedings of the IEEE, 1988.

UMAN, M. A., KRIDER, E. P., “*Natural and Artificially Initiated Lightning*”, Science, Vol. 246, pp. 457- 464, 1989.

VISACRO, S., SOARES, A. JR., SCHROEDER, M.A., CHERCHIGLIA, L.C.L., SOUSA, V., “*Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station*”, Journal of Geophysical Research, Vol. 109, N°. D01105, pp. 1–11, January 2004.

VISACRO, S., “*A Representative Curve for Lightning Current Waveshape of First Negative Stroke*”, Geophys. Res. Lett., 31, L07112, doi:10.1029/2004GL019642, 2004a.

VISACRO, S., “*Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia*”, Editora ArtLiber, São Paulo, 2005.

VISACRO, S., SILVEIRA, F. H., “*Lightning Current Waves Measured at Short Instrumented Towers: The Influence of Sensor Position*”, Geophysical Res. Lett., 32, L18804, doi:10.1029/2005GL023255, 2005a.

WANG, D., RAKOV, V.A., UMAN, M.A., FERNANDEZ, M.I., RAMBO, K.J., SCHNETZER, G.H., AND FISHER, R.J., “*Characterization of the Initial Stage of Negative Rocket-Triggered Lightning*”, J. Geophys. Res., Vol. 104, pp. 4213-22, 1999.

WANG, D., “*Characterization of the Initial Stage of Upward-Initiated Lightning*”, 26th International Conference on Lightning protection (ICLP), Poland, September 2002.

WIESINGER, J., ZISCHANK, W., “*Test Procedure for the Simulation of Lightning Current effects on Overhead Ground Wire of High Voltage Transmission Line with Integral Optical Fibers*”, In Proc. International Conference on Lightning Protection (ICLP), Florence -Italia, 1996.

YOKOYA, M., KATSURAGI, Y., GODA, Y., NAGATA, Y., ASANO, Y., “*Development of Lightning-Resistant Overheat Ground Wire*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, Nº. 3, pp. 1517-1523, July 1994.

ZUNDL, Th., FUCHS, F., HEIDLER, F., HOPF, Ch., STEINBIGLER, H., WIESINGER, J., “*Statistics of Current and Field Measured at the Peissenberg Tower*”, 1996.

Apêndice A - Danos em Cabos OPGW Causados por Corrente Contínua das Descargas Atmosféricas

1 Introdução

No passado, os danos nos cabos OPGW eram atribuídos aos elevados valores de amplitude da componente impulsiva da onda de corrente das descargas atmosféricas [Wiesinger,1996]. Atualmente, admite-se que tais danos estejam associados à existência da componente contínua (CC) da corrente, estudada no capítulo 2 desta tese.

Até o presente momento, no Brasil, não existem registros obtidos em campo da componente contínua. Existem registros realizados em laboratórios e também alguns testes realizados com cabos OPGW aplicando-se a componente contínua. A maior parte do conhecimento a respeito da componente contínua é através de estudos e medições realizados na Europa, nos Estados Unidos e no Japão.

Para entender melhor a causa dos danos por descargas atmosféricas aos cabos OPGW, no capítulo 2 foram estudados alguns parâmetros relevantes da descarga atmosférica, como o valor de pico da corrente contínua, a carga de transferência e o tempo de duração desta onda de corrente. Também foram descritos as circunstâncias nas quais existe maior possibilidade da ocorrência da corrente contínua numa descarga atmosférica.

O objetivo deste capítulo é mostrar os danos nos cabos OPGW causados pela componente contínua da corrente das descargas. Para tal, apresentam-se alguns registros de danos causados pelas CC nos cabos OPGW a nível mundial. Também, neste capítulo são descritas, resumidamente, a definição de um cabo OPGW, composição da estrutura e aplicação do mesmo.

2 O Cabo OPGW (Optical Ground Wire)

Utilizando nas linhas de transmissão de energia, os cabos OPGW são cabos mistos compostos de uma parte óptica (interna) e uma parte metálica (externa), Figura A.1. Na parte interna do cabo encontram-se alojadas as fibras ópticas, devidamente protegidas, cuja missão é transmitir sinais ou dados de telecomunicações. A parte externa, em torno dos elementos que contêm as fibras ópticas, é projetada e construída para atuar como um cabo pára-raios convencional.

Os cabos com fibras ópticas, em geral, são construídos em várias etapas, reunindo diversos elementos, em conformidade com as principais especificações das normas ABNT [NBR 14074], IEEE [IEEE 1138].

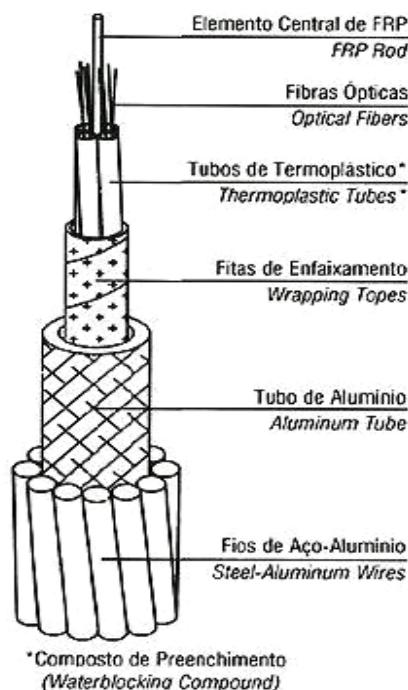


Figura A.1 – Exemplo de um cabo OPGW com fibra óptica.

Os cabos OPGW são instalados na parte superior das torres, acima dos condutores (Figura A.2). Como o cabo possibilita a imunidade da fibra aos campos eletromagnéticos, torna-se possível integrá-la ao núcleo da rede de energia. A capacidade de transmissão de voz, dados e imagem a altas taxas facilitam a viabilização não somente dos meios convencionais de telecomunicações como também de serviços de telemetria, supervisão e controle ao longo do sistema.

A importância e a responsabilidade técnica e econômica dos atuais cabos OPGW são, portanto, muito maior que os dos cabos pára-raios convencionais. Com isso, as empresas de energia elétrica que possuem ou planejam ter LT com cabos OPGW, vêm desenvolvendo diversas pesquisas e ensaios com os mesmos, objetivando garantir o seu desempenho e a confiabilidade.

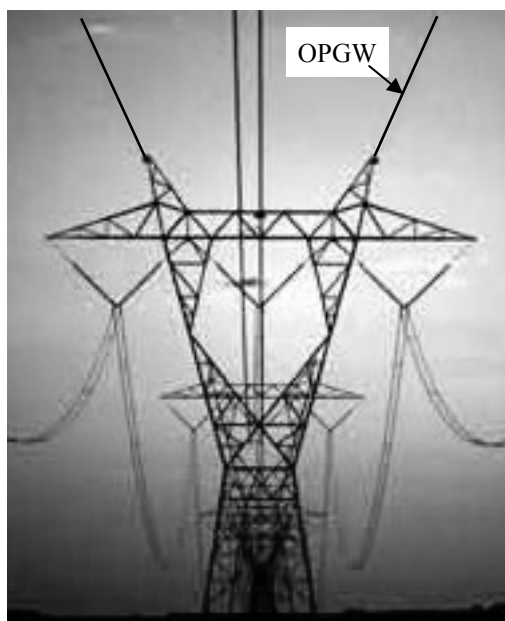


Figura A.2 – Localização dos cabos OPGW nas linhas de transmissão.

3 Tipos de Danos Causados pela Corrente Contínua

A ocorrência de uma descarga atmosférica direta num cabo OPGW pode eventualmente causar danos no mesmo. A natureza destes estragos varia consideravelmente, indo desde a queima da capa externa do cabo até a ruptura dos tentos externos, comprometendo deste modo sua sustentação mecânica. Em casos mais críticos, pode-se atingir a fibra óptica e, assim, comprometer a transmissão de dados.

Os danos causados pelas descargas atmosféricas nos cabos pára-raios OPGW são atribuídos ao calor gerado pelo fluxo da corrente de descarga, considerando-se desde a parcela impulsiva até a componente contínua. O maior aquecimento dos cabos é promovido pela componente contínua, devido à sua maior duração (da ordem de dezenas a centenas de milissegundos).

4 *Registros de Danos Causados pela CC*

Têm sido registradas, no mundo inteiro, inúmeras ocorrências de danos nos cabos OPGW devido à incidência direta de descargas atmosféricas. Entre os danos causados pela CC, o mais frequentemente encontrado é a queima da camada externa (Figura A.3a , b, c).

Em alguns casos, os danos podem ser mais severos como o rompimento de alguns tentos, podendo chegar ao rompimento total do cabo (ver Figura A.3d). Em [Loewenthal,2001], tem-se o registro deste tipo de dano.

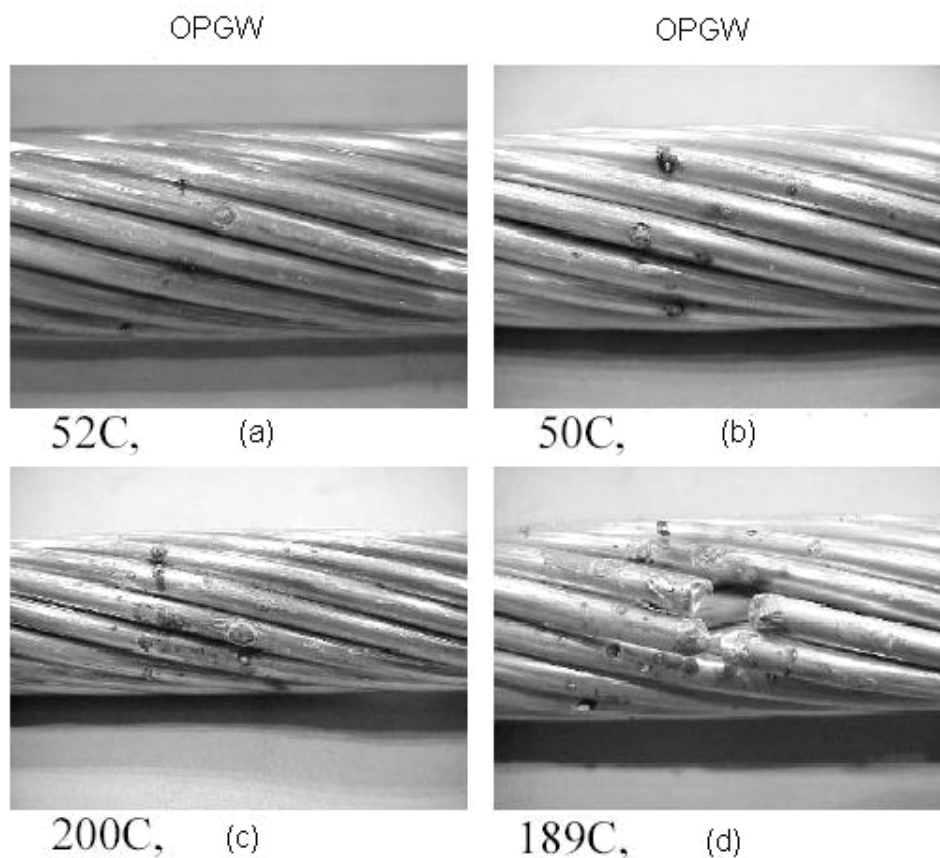


Figura A.3 – Exemplos experimentais de danos causados pelas descargas atmosféricas nos cabos OPGW com diferentes níveis de cargas. Adaptado da Ref. [Chisholm et al.,2001a].

Uma inspeção realizada na região da *Bavarian* (Alemanha) em linhas de transmissão de alta tensão revelou um número considerável de rompimentos de tentos dos cabos a cada ano [Wiesinger and Zischank,1996]. Foram encontrados rompimentos de 1 a 7 tentos.

No Japão, foram investigados, durante 10 anos e em diversos locais, os danos reais nos cabos OPGW. Obteve-se uma taxa de danos de 0,08 casos/ano para cada 100 km de linha, o que significa que a ruptura de tentos possa ocorrer em 2 lugares/ano (a investigação foi feita em um comprimento total de aproximadamente 2500 km de LT) [Yokoya et al.,1994].

No Canadá, foram realizados estudos, onde, de um total de 34.000 componentes danificados separadamente por descargas atmosféricas no período de 1994 a 1999, somente 574 mostram condutores quebrados. Isto dá uma taxa média de danos de aproximadamente 0,1 rupturas por cada 100 km por ano em uma área com densidade média de descargas de 1,0 descarga por km² por ano [Chisholm et al., 2001a].

Para se obter tal taxa, foi estudada uma rede de distribuição de 119000 km (monofásica e trifásica), onde o sistema de baixa tensão tem um registro total de 1260 condutores danificados, detectados no período de seis anos [Chisholm et al., 2001b].

5 Danos Causados por Descargas Atmosféricas no Brasil

No Brasil, os poucos registros existentes se referem aos estudos realizados por Furnas Centrais Elétricas.

A empresa, objetivando, garantir a confiabilidade dos cabos OPGW compatível à dos cabos pára-raios convencionais já instalados em suas linhas de transmissão, fez diversos estudos e testes em ambos os cabos (pára-raios convencionais e OPGW), observando os danos causados por descargas e correlacionando-os aos danos ocorridos nos testes realizados em laboratório.

Cerca de 93 % dos cabos OPGW utilizados no Brasil são importados de países que têm condições climáticas completamente diferentes do país. Assim, foram necessárias algumas adaptações aos projetos destes cabos para sua aplicação nas linhas de transmissão de Furnas.

Os registros causados por descargas atmosféricas nos cabos OPGW estão descritos em [Alvim et al.,2002a], e reproduzidas neste texto (Tabelas A.1 a A.3), onde estão indicados para cada LT seu comprimento, a data de entrada em operação e a designação do tipo do

cabo. Para cada vão, estão indicadas a datas em que a ocorrência foi observada (DO) e o número (N) de tentos rompidos na coroa externa do cabo.

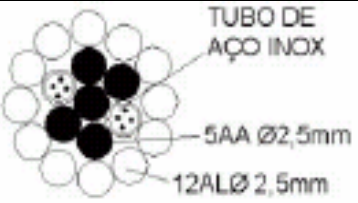
 <p>TUBO DE AÇO INOX 5AA Ø2,5mm 12ALØ 2,5mm</p> <p>Data: Mar/99 Tipo D9 [Alvim,2002a]</p>						
TL	Vão	DO	N	Vão	DO	N
(1)	131-132	Mai/00	2	343-344	Mar/02	(*)
(1)	225-226	Mai/02	3	426-427	Mar/02	(*)
(1)	131-132	Mar/02	(*)	434-435	Mar/02	(*)
(1)	161-162	Mar/02	(*)	445-446	Mar/02	(*)
(1)	166-167	Mar/02	(*)	534-535	Mar/02	(*)
(1)	188-189	Mar/02	(*)	541-542	Mar/02	(*)
(1)	189-190	Mar/02	(*)	545-546	Mar/02	(*)
(1)	190-191	Mar/02	(*)	594-595	Mar/02	(*)
(1)	340-341	Mar/02	(*)	-	-	(*)
(1)	22-23	Oct/98	(#)	208-209	Mar/02	(*)
(2)	11-12	Jul/99	2	239-240	Mar/02	(*)
(2)	372-373	Jul/99	1	240-241	Mar/02	(*)
(2)	392-393	Jul/99	11	246-247	Mar/02	(*)
(2)	448-449	Jul/99	5	287-288	Mar/02	(*)
(2)	448-449	Jul/99	2	294-295	Mar/02	(*)
(2)	17-18	Mar/02	(*)	373-374	Mar/02	(*)
(2)	18-19	Mar/02	(*)	379-380	Mar/02	(*)
(2)	23-24	Mar/02	(*)	424-425	Mar/02	(*)
(2)	114-115	Mar/02	(*)	474-475	Mar/02	(*)
(2)	162-163	Mar/02	(*)	489-490	Mar/02	(*)
(2)	166-167	Mar/02	(*)	502-503	Mar/02	(*)

Tabela A.1 - Registro de danos por descargas atmosféricas nos cabos OPGW, onde temos: (*) Número de fios ainda não identificados; (#) Rompimento total do cabo; (1) TL 500 kV Serra da Mesa – Gurupi (258 km); (2) TL 500 kV Gurupi – Miracema (255 km).

Fazendo-se uma análise destes registros, para as linhas de transmissão de 750kV, encontrou-se uma média de 5,9 tentos rompidos na coroa externa do cabo. Estes danos foram observados com a linha já em operação.

Para uma LT de 500kV, oito tentos ainda não foram identificados. Nesta mesma linha, observou-se um tento com rompimento total, quando ainda estava nas roldanas de

lançamento. Estes danos foram observados durante a construção e o funcionamento da LT. Também foram detectados dois cabos com a perfuração da unidade óptica.

Outras estatísticas de danos ocorridos nas linhas de transmissões no Brasil podem ser observadas nas referências [Alvim et al., 2001] e [Alvim et al., 2002b].

<p>TUBO DE AÇO INOX 13AL Ø2,6mm 5AA Ø2,9mm</p> <p>Data: Mar/99 Tipo D8 [Alvim, 2002a]</p>						
TL	Vão	DO	N	Vão	DO	N
(1)	151-152	Fev/00	6	343-344	fev/02	1
(1)	212-213	Fev/00	8	426-427	Mar/02	4
(1)	280-281	Fev/00	5	434-435	Mar/02	4
(1)	389-390	Fev/00	9	445-446	Mar/02	4
(1)	390-391	Fev/00	9	534-535	Mar/02	1
(1)	402-403	Fev/00	4	541-542	Mar/02	4
(1)	471-472	Fev/00	5	545-546	Mar/02	1
(1)	585-586	Fev/00	3	684-685	Mar/02	1
(1)	587-588	Fev/00	11	685-686	Mar/02	1

Tabela A.2 - TL 750 kV Foz do Iguaçu – Ivaiporã III (331 km).

<p>ELEMENTO RANHURADO 12 FIOS AA Ø 2,62mm</p> <p>Data: Jan/99 Tipo C2 [Alvim, 2002a]</p>						
TL	Vão	DO	N	Vão	DO	N
(1)	74-75	Agos/98	3	-	-	-

Tabela A.3 - TL 500 kV Angra – São José (144 km).

A principal causa de danos nos cabos OPGW de linhas de transmissão é devido à componente contínua da corrente de descarga. Estes são causados por superaquecimento devido ao tempo de duração desta componente e transferência de elevada carga elétrica.

Os danos consistem, principalmente, em queima da camada externa dos cabos OPGW, perda de material e rompimento de tentos. Em alguns casos, há possibilidades de danos também na região interna do cabo, onde estão alojadas as fibras ópticas.

Existem poucos registros de danos devido a descargas atmosféricas na literatura técnica, embora tenha se notado crescente interesse no estudo da componente contínua e seus efeitos.

Apêndice B – Manual do Conversor Elétrico Óptico

Neste apêndice apresenta-se parte da reprodução do manual do conversor elétrico-óptico. Fabricado por *Terahertz Technologies Inc.*

LTX-510 Electrical / Optical Converter Operating Instructions

Introduction

The LTX-510 Electrical to Optical Converter is a convenient device that is intended to transmit analog or digital signals to a remote location via a multi-mode fiber optic cable. It is primarily designed to be used in those situations in which the signal of interest has a high common mode voltage with respect to the measurement equipment. Such situations arise in plasma physics experiments, power transmission equipment, and high power laser equipment. Trigger information from electrically noisy sources such as high current discharge laser systems may be transmitted without conducting Electro-Magnetic Interference, (EMI) to the measurement equipment.

The LTX-510 is normally intended to be used with the TIA-500S Optical /Electrical converter, however, other fiber optic O/E converters that respond at 850 nm with the appropriate responsivity and bandwidth characteristics may be employed. The LTX-510 has two voltage input ranges, 0 - 1 V and 0 - 5 V. The input impedance may be set to 50 ohms for high speed signals sent over a transmission line or to 1 Meg ohm for use at lower frequencies. The -3 dB bandwidth of the LTX-510 ranges from DC to > 60 MHz. The unit is equipped with a BNC female connector for voltage input and an ST fiber optic connector at its output. It is intended to be used with 62.5/125 μm or 100/140 μm fiber optic cable.

Specifications	
Input voltage range	0 to +1 V or 0 to +5 V, selectable
Input impedance	50 ohms or 1 Megohm in parallel with 20 pF
Output Power	10 μ W, -20 dBm Typical
Input Without Damage	+/-7V
Bandwidth (-3 dB)	DC to 60 MHz
Accuracy	+/- 5% from DC to 35 MHz, +/- 20 % from DC to 50 MHz
Output wavelength	850 nm, 100 nm FWHM
Input Connector	BNC female
Fiber Output Connector	ST
Usable Fiber Types	Multi-mode, 62.5/125 μ M, 100/140 μ M
Power Required with the supplied wall-mount power supply	12 +/- 0.5 VDC @ 100mA or 120VAC
Dimensions	4.5" W, 2.5"L, 1.0"H, (114 , 63 , 25 mm)
Operating Temperature	10 - 40 C

Unpacking and Inspection

Prior to shipment this instrument was inspected and found to be free of mechanical and electrical defects. Upon acceptance by the carrier he assumes responsibility for its safe arrival. After unpacking, examine the unit for any evidence of shipping damage. Should you receive this instrument in a damaged condition, apparent or concealed, it must be noted on the freight bill or express receipt and signed by the carrier's agent. Failure to do so could result in the carrier refusing to honor the claim. Upon filing a claim TTI should be notified.

Power Considerations

The LTX-510 operates from a regulated 12 VDC supply. This voltage may be supplied with the 20 VAC wallmount power supply that is provided with the unit or, depending on the experiment, 12 volts may be used directly. The common mode voltage of the input signal should *never exceed* +/- 120 volts from earth ground when utilizing the wall mount supply. An exception to this requirement is if the 120 VAC is supplied by an isolation transformer with sufficient voltage isolation ratings to withstand the application of the worst case common mode voltage that is expected.

Theory of Operation

The LTX-510 generates a current that is proportional to the input signal voltage. This current is passed through an LED which in turn provides fiber coupled 850 nm radiation that is proportional to the applied current. An optical receiver such as the TIA-500 converts this radiation back to an analog signal.

There are difficulties however in determining the absolute value of the input voltage however. Variable fiber loss, connector repeatability, variations in detector responsivity, etc, prevent the user from knowing the precise amplitude of the received signal. Thus a means of calibration is necessary to fix the absolute transfer function once the installation is in place. For this reason, a built in bias is supplied upon which the signal to be measured rides. When the input signal is precisely equal to the DC bias level, the input voltage is equal to full scale.

For example, if the TIA-500 is set to a transimpedance of 1.4 K and the post amplifier is sent to a gain of 10, the DC light output from the LTX-510 set to its 1 V input setting will produce an output of approximately 100 mV. If the signal to be measured is a 1 volt p-p sine wave, ranging in amplitude from 0 to 1 V at its extremes, the signal emanating from the TIA-500 will be a 100 mV p-p sine wave riding on a 100 mV DC level. If the signal drops to 50 mV then the user may infer that the input signal is half of full scale.

Thus the signal amplitude received divided by the DC bias level times the range setting equals the absolute signal level. Refer to figure 1 on next page.

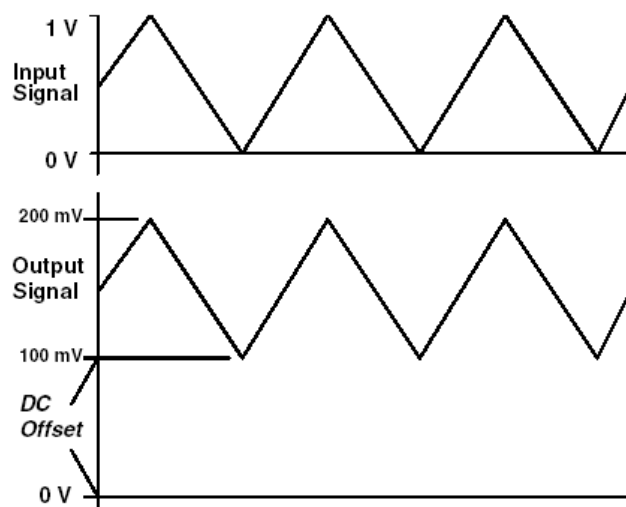


Figure 1

Operating Considerations

The LTX-510 may be used to transmit signals from a source that is at a high potential with respect to measuring devices such as an oscilloscope. The input signal must be in the range of 0 - 1 V or 0 - 5 V depending on the range selected. Digital signals may be transmitted as well. For TTL/HCMOS, select the five volt range.

For high speed signals transmitted via any significant amount (electrical length comparable to rise/fall times) of coaxial cable, a 50 ohm termination may be switched in to preclude distortion and reflections from a mismatched transmission line.

The power supply for the unit must be at roughly the same potential of the signal common mode voltage. For example, using the unit at a 10 000 V potential while it is utilizing the wall mount power supply at conventional line potential will result in a ***hazardous situation and certain damage to the equipment***. The unit may be powered from a 12 volt power supply that is at the common mode potential to avoid this situation. Alternatively an isolation transformer with sufficient isolation voltage rating may be used to power the wall mount supply.

When using the TIA-500S for a receiver, the transimpedance switch determines the bandwidth. For signals below 35 MHz, set the switch to the 14 K position. This will result in the best signal to noise ratio. For higher frequencies, select the 1.4 K position. Set the x1, x10 Gain switch as required. The absolute value of the input signal is:

$$V_{in} = \frac{V_{out} \times \text{LTX-510 Range Selected}}{\text{Measured DC offset with no input signal}}$$

Apêndice C – Manual do Conversor Óptico Elétrico

Neste apêndice apresenta-se parte da reprodução do manual do conversor óptico-elétrico. Fabricado por *Terahertz Technologies Inc.*

TIA-500 Optical/Electrical Converter Operating Instructions

Introduction

The TIA-500 Optical to Electrical Converter is a convenient battery-operated detector/amplifier combination that mounts directly on the input of an oscilloscope, digitizer, or other readout device. With a band width of DC to 125 MHz, it accurately provides an electrical replica of the optical signal presented to it. It is fully capable of driving a 50 ohm cable terminated in its characteristic load.

Two basic models of the unit exist; the TIA-500 S, containing a silicon detector for use in the spectral region between 400 and 1000 nm, and the TIA-500 I which contains an Indium-Gallium-Arsenide detector and is responsive in the 900 to 1700 nm spectral region. Both units are equipped with an ST □ fiber optic connector. Custom versions are also available with unconnectorized detectors for free-space beams.

The TIA-500 has selectable transimpedances of 1.4 K. and 14 K. plus a post amplifier with selectable gains of 1 or 10. Thus the overall responsivity ranges from approximately 1 000 V/W to 100 000 V/W at the peak of the detector response curve. Interstage coupling may be switched from DC to AC to avoid saturation of the second stage in those cases where the signal of interest is combined with a relatively large DC optical component.

Each unit is powered by a self-contained 9 V lithium battery. Battery operation eliminates ground loops and the undesirable effects of conducted radiation that may be present on local power lines.

Specifications	
Detector Types	Silicon (400-1000 nm), InGaAs (900-1700nm)
Transimpedance	1.4K, 14K selectable
Post Amplifier Gain	1.0, 10.0 selectable
Maximum Linear Input Power	1.2 mW
Max Input Without Damage	20 mW
Bandwidth (-3 dB)	DC to 125 MHz at 1.4 K Transimpedance DC to 35 MHz at 14 K Transimpedance
Output Impedance	50 Ohms
Output Connector	Male BNC
Fiber Optic Input Connector	ST, (FC or unconnectorized on special request)
Input Numerical Aperture	0.29
Interstage Coupling	DC or AC (15 Hz low frequency cut off)
Output Offset Voltage	< +/- 0.75 V at max gain
Maximum Output Voltage	2 V pk-pk, no load, 1 V pk-pk, 50 ohm load
Noise Level	3 pW/Hz ^{ns}
Power Required	9 V Lithium Battery powers the unit for approximately 30 hrs (no load)
Dimensions	1.2" W, 2.5"L, 1.5"H, (30.5 mm, 63 mm, 38 mm)
Operating Temperature	0 - 40 C

Unpacking and Inspection

Prior to shipment this instrument was inspected and found to be free of mechanical and electrical defects. Upon acceptance by the carrier he assumes responsibility for its safe arrival. After unpacking, examine the unit for any evidence of shipping damage. Should you receive this instrument in a damaged condition, apparent or concealed, it must be noted on the freight bill or express receipt and signed by the carrier's agent. Failure to do so could result in the carrier refusing to honor the claim. Upon filing a claim TTI should be notified.

Battery Replacement

Each unit comes equipped with a 9 V Lithium battery that provides power to the unit for approximately 30 hours of operation. It is recommended that the battery be replaced whenever the output signal becomes clipped at 1.1 volts or less. When replacing the battery, a Lithium unit should be used. Conventional 9 V alkaline batteries may be used if so desired but the useful life will only be about 25 % (8 hours) of that of the much higher capacity Lithium types. TTI can supply these batteries if desired. Replacement of the battery may be accomplished by removing the four 2-56 Philips flat head screws that retain the bottom cover

of the TIA-500. **DO NOT** attempt to remove the top cover. Take care to replace all screws tightly. This will provide optimum shielding of the unit from ambient radio frequency noise or interference.

Operating Considerations

Operating Considerations The TIA-500 is comprised of a fiber coupled detector and two amplifier stages. The first amplifier is a transimpedance stage which converts the detector output current to a voltage by passing it through a resistor of 1 400 or 14000 ohms. Additional amplification is optionally provided by the second stage which also serves to provide 50 ohm drive capability. Either AC or DC coupling between the stages may be selected.

The overall bandwidth of the unit is determined by the first stage transimpedance. It is in excess of 125 MHz when the T R switch is in the 1.4 K position and is 35 MHz in the 14 K position. The overall responsivity of the unit in terms of Volts/Watt is the current responsivity of the detector multiplied by the transimpedance and further multiplied by the second stage gain. For example, the sensitivity of the unit at a wavelength of 1300 nm would be $0.7 \text{ A/W} \times 1400 \text{ V/A} \times 10 = 10\,000 \text{ V/W}$. It is evident that the same responsivity may be obtained by using a transimpedance of 14 K and a second stage gain of one. However, the first setting will provide a bandwidth of 125 MHz while the second will provide a bandwidth of 35 Mhz. Since the overall peak-to-peak output noise increases with bandwidth, it is desirable to use the higher transimpedance setting assuming that the signal of interest does not exceed 35 MHz.

The selection of AC interstage coupling is useful when the user needs to examine a small signal in the presence of a large DC optical component, (e.g. baseband fiber optic video). This will preclude the last stage from saturating on the DC component. Otherwise, DC coupling should be employed.

When using the TIA-500 mounted on an oscilloscope, the scope should have its input set to a 1 Meg ohm input impedance. If driving a coaxial cable, the cable should have a 50 ohm characteristic impedance and be terminated with a 50 ohm load. Note that the signal amplitude will be reduced by a factor of two.

The following table summarizes the operation of the unit under various operating conditions.

Setting Signal	T _R	AC/DC Coupling	2nd Stage
Small signal on large DC components	1.4 K	AC	X 1, X 10 As Needed
High frequency signal, > 35 MHz	1.4 K	DC	X 1, X 10 As Needed
Low level signal, < 35 MHz	14 K	DC	X 1, X 10 As Needed
Low level, high frequency signal	1.4 K	DC	X 10

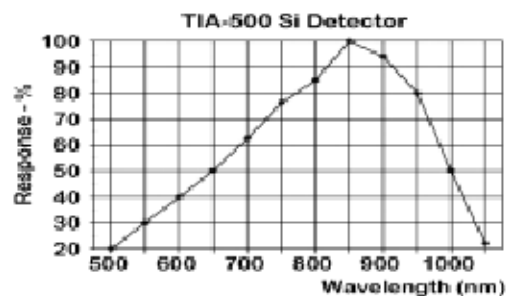
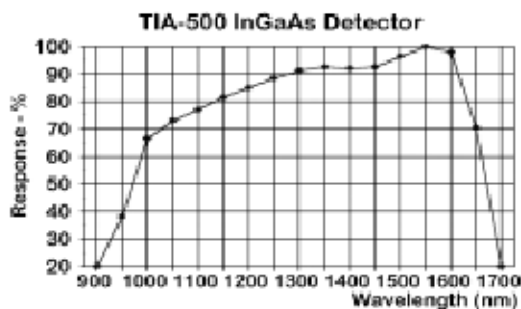
Spectral Response

The approximate relative response curves of the detectors employed is as shown below. Note that these are representative curves and do not necessarily correspond to the exact response of the particular detector in use.

The approximate power at the detector surface is given by:

$$\text{Input power in watts (InGaAs)} = \frac{\text{Peak output voltage (no load)}}{0.8 \text{ A/W} \times T_R \times \% \text{ Relative response from graph}/100}$$

$$\text{Input power in watts (Si)} = \frac{\text{Peak output voltage (no load)}}{0.55 \text{ A/W} \times T_R \times \% \text{ Relative response from graph}/100}$$



Apêndice D – Manual da Placa de Aquisição de Dados

Neste apêndice apresenta-se parte da reprodução do manual da placa de aquisição de dados (PCI-DAS4020/12) utilizado no sistema de medição. Fabricado por *ComputerBoards, Inc.*

PCI-DAS4020/12 Analog & Digital I/O Board

Specifications - Typical for 25 °C unless otherwise specified.

Analog input

A/D converter type	AD9225, 25 MSPS pipelined A/D
Resolution	12-bits
Programmable ranges	±5 V, ±1 V
Number of channels	4 single-ended, independent ADC.s per channel
Connection	4 independent BNC
Bandwidth	17 MHz typical
Coupling	DC
<i>Input leakage current</i>	2 uA typ, 10 uA max
Input impedance	1.5 Mohm typ, or 50 ohm, selectable (coaxial cable termination)
Absolute maximum input voltage	±15V

Table 1. Analog input specifications.

Timing and throughput

Simultaneous sampling	Software selectable option - 1, 2, or 4 channels
A/D Convert clock source	Internal: <ul style="list-style-type: none"> On-card crystal oscillator Frequency: 40 MHz Frequency accuracy: 50% duty cycle, 50 ppm External: <ul style="list-style-type: none"> Trig/Ext Clk BNC, or A/D External Clock on the 40-pin connector 24-bit internal pre-scale counter (min pre-scale = 2) Clock Rate: 40 MHz max, 2 kHz min Duty Cycle: 50% ± 5%
A/D Gate source	Digital: Trig/Ext Clk BNC or A/D Pacer Gate on 40-pin connector Analog: Any of the four input channels
A/D Gate modes	Digital: Programmable active high/low, level/edge Analog: Above/below reference, positive/negative Hysteresis, inside/outside window Resolution: 12-bit Slew rate: 10V/sec. minimum
A/D Start Trigger (TRIG1)	Software: Using a DAQ start command. Digital: Trig/Ext Clk BNC, A/D Start Trigger In (on the 40-pin connector) Analog: Any of the four input channels

A/D Stop Trigger (TRIG2)	Digital: Trig/Ext Clk BNC, A/D Stop Trigger In (on the 40-pin connector) Analog: Any of the four input channels
A/D Triggering modes	Digital: Programmable rising or falling edge Analog: Trigger above/below reference Resolution: 12-bit
Pre-trigger mode	Unlimited number of pre-trigger samples, 16 Meg post-trigger samples. Compatible with both digital and analog trigger/gate options. Data acquisition initiated via TRIG1. Post-trigger phase initiated via TRIG2.
Data transfer	Via dual 32 K x 24 sample FIFO, SRAM based, with Bus-Master DMA and scatter-gather, interrupt, or software polled.
A/D Conversion time	40 ns
Sample rate	20 MHz max, 1 kHz min
Throughput	Single channel: 20 MHz continuous Two channels (0 and 1 or 2 and 3): 20 MHz continuous Four channels: 10 MHz continuous In background mode, the maximum throughput may be impacted by bus or interrupt activity.

Table 2. Timing and throughput specifications.

Accuracy

Absolute accuracy	±5.5 LSB worst case error (either range)
Typical accuracy	±3.0 LSB error (either range)
Accuracy components:	
Gain error	±2.0 LSB max, ±1.0 LSB typ
Offset error	±1.5 LSB max, ±1.0 LSB typ
Integral linearity error	±2.5 LSB max, ±1.0 LSB typ
Differential linearity error	±1.0 LSB max , ±0.4 LSB typ (No missing codes guaranteed)

Table 3. Analog input accuracy specifications.

Board error is a combination of gain, offset, integral linearity, and differential linearity error. The overall absolute worst-case error of the board may be calculated by summing these component errors. Worst case error is realized only in the unlikely event that each of the component errors are both at their maximum level, and causing error in the same direction. Though this is very uncommon, it is still possible, and the calculated worst case error of the PCI-DAS4020/12 board is ±7.0 LSB.

Each PCI-DAS4020/12 board is tested at the factory to make sure that its actual worst case error is less than ±5.0 LSB. Allowing for a 10% guard-band, the absolute worst-case error of a board is ±5.5 LSB. Typical accuracy can be calculated from the various component typical errors in a similar fashion. This typical maximum error calculation for the PCI-DAS4020/12 board yields ±3.4 LSB. However, this again assumes that each of the errors is forcing an error in the same direction. Empirical evidence supports a conservative typical error budget of ±3.0 LSB.

Calibration	Auto-calibration. Calibration factors for each range stored on board in non-volatile RAM
-------------	--

Table 4. Calibration specifications.

Temperature

Gain drift	±5 V range: ±0.10 LSB/°C max ±1 V range: ±0.13 LSB/°C max
Offset drift	±0.11 LSB/°C max, all ranges
Overall board temperature drift	±5 V range: ±0.21 LSB/°C max ±1 V range: ±0.24 LSB/°C max

Table 5. Temperature specifications.

Overall, worst-case temperature drift is calculated by adding the drifts corresponding to the gain and offset drifts. This worst case number is unlikely to occur, as it requires both gain and offset drifts to be at their maximum levels, and to be affecting the measurement in the same direction. However, the overall board D/A drift specifications have been calculated in this fashion.

Dynamics and noise

SNR (Signal-to-noise ratio)	66.6 dB
SINAD (signal-to-noise and distortion ratio)	66.5 dB
SFDR (spurious free dynamic range)	80 dB
THD (total harmonic distortion)	80 dB
Noise distribution:	
(Rate = 10 KHz-20 MHz, Average % \pm 2 bins, Average % \pm 1 bin, Average # bins)	Bipolar (5V): 100% / 98% / 5 bins
Bipolar (1V): 100% / 98% / 5 bins	

Table 6. Dynamics and noise specifications.

Trig/Ext Clk BNC

Software selectable for A/D Start Trigger (TRIG1), A/D Stop Trigger (TRIG2) or A/D Pacer Gate (AGATE); also used as an A/D clock input 2X clock source (DAQ_CLK).

Input impedance	50 ohm, 1 Mohm selectable (coaxial cable termination)
Input threshold	Programmable 2.5 V threshold or 0 V threshold
Input slew rate	1 V/ μ sec min
Input range	\pm 5 V
Bandwidth	40 MHz
Coupling	DC

Table 7. Trig/Ext Clk BNC specifications.

Analog output

D/A converter type	AD7237
Resolution	12-bits
Number of channels	2
Output range	\pm 10 V, \pm 5 V software selectable
D/A pacing	Software paced
Throughput	System dependent. Using the Universal Library programmed output function (cbAout) in a loop in Visual Basic, a typical update rate of 500 Hz (\pm 50 Hz) can be expected. The rate was measured on a 330 MHz Pentium II based PC.
Data transfer	Programmed I/O
Monotonicity	Guaranteed monotonic over temperature
Analog output drift	\pm 0.11 LSB/ $^{\circ}$ C max, all ranges
Settling time (20 V step to \pm 1/2 LSB)	5 μ s max
Slew rate	5 V/ μ s
Current drive	\pm 5 mA
Output short-circuit duration	25 mA indefinite
Output coupling	DC
Output impedance	0.5 Ohm max
Miscellaneous	<ul style="list-style-type: none"> • Single buffered output latch • Update DACs individually <p>On power-up and reset, the inputs to both D/A output buffers are grounded and the board's D/A outputs will be set to 0 volts \pm 6 mV. Upon writing to the D/A</p>

	converters, the output buffers will reflect the D/A outputs and achieve rated accuracy. However, upon writing a 0 to the D/A.s, a small output change may be noted (up to 10 LSB).
--	--

Table 8. Analog output specifications.

Accuracy

Absolute accuracy	±13 LSB max
Offset error	±6 LSB max
Gain error	±5 LSB max
Differential non-linearity	±1 LSB max
Integral non-linearity	±1 LSB max

Table 9. Analog output accuracy specifications.

Total analog output error is a combination of gain, offset, integral linearity, and differential linearity error. The overall absolute worst-case error of the board may be calculated by summing these component errors. Worst case error is realized only in the unlikely event that each of the component errors are both at their maximum level, and causing error in the same direction. Though this is very uncommon, it is still possible.

Digital input / output

Digital type (40-pin connector)	8255A
Configuration	2 banks of 8, 2 banks of 4, programmable by bank as input or output
Number of channels	24 I/O
Output high	3.0 volts min @ 2.5 mA
Output low	0.4 volts max @ 2.5 mA
Input high	2.0 volts min, Vcc + 0.5 volts absolute max
Input low	0.8 volts max, GND - 0.5 volts absolute min
Power-up / reset state	Input mode (high impedance)

Table 10. DIO specifications.

Interrupts

Interrupts	INTA# - mapped to IRQn via PCI BIOS at boot-time
Interrupt enable	Software programmable
ADC Interrupt sources	DAQ_ACTIVE: Interrupt is generated when a DAQ sequence is active. DAQ_STOP: Interrupt is generated when A/D Stop Trigger In is detected. DAQ_DONE: Interrupt is generated when a DAQ sequence completes. DAQ_FIFO_1/2_FULL: Interrupt is generated when ADC FIFO is ½ full. DAQ_SINGLE: Interrupt is generated after each conversion completes.
External	Interrupt is generated via edge-sensitive transition on the Interrupt In pin on the 40-pin connector. Rising/falling edge polarity selection. The Interrupt In pin is pulled up to 5 V through a 10 K resistor.
External Interrupt Enable	Active low Interrupt Enable signal on the 40-pin connector. The Interrupt Enable pin is pulled up to 5 V through a 10 K resistor.

Table 11. Interrupt specifications.

Environmental

Operating temperature range	0 to 70 °C
Storage temperature range	-40 to 100 °C
Humidity	0 to 90% non-condensing

Table 12. Environmental specifications.

Power consumption

+5 V Operating (A/D to FIFO)	1.5 A typical, 2.0 A max
------------------------------	--------------------------

Table 13. Power consumption specifications.

Connector and pin out

Connector type	BNC connector: five standard female connectors Auxiliary connector (P3): 40-pin header connector
Compatible cables (for the 40-pin auxiliary connector)	C40FF-x C40-37F-x BP40-37-x
Compatible accessory products with the C40FF-x cable	CIO-MINI40
Compatible accessory products with the C40-37F-x cable or with the BP40-37-x and the C37FF-x or C37FFS-x cable	CIO-MINI37 SCB-37 CIO-ERB24 CIO-ERB08 SSR-RACK24 SSR-RACK08

Table 14. Connector specifications.

Auxiliary connector P3 pinout

Pin	Signal Name	Pin	Signal Name
1	INTERRUPT IN *	2	+5V
3	INTERRUPT ENABLE *	4	GND
5	FIRSTPORTB Bit 7	6	FIRSTPORTC Bit 7 (A/D Pacer Gate)
7	FIRSTPORTB Bit 6	8	FIRSTPORTC Bit 6 (A/D Stop Trigger In)
9	FIRSTPORTB Bit 5	10	FIRSTPORTC Bit 5 (Start Trigger In/Ext Clock)
11	FIRSTPORTB Bit 4	12	FIRSTPORTC Bit 4
13	FIRSTPORTB Bit 3	14	FIRSTPORTC Bit 3
15	FIRSTPORTB Bit 2	16	FIRSTPORTC Bit 2
17	FIRSTPORTB Bit 1	18	FIRSTPORTC Bit 1
19	FIRSTPORTB Bit 0	20	FIRSTPORTC Bit 0
21	GND	22	FIRSTPORTA Bit 7
23	n/c	24	FIRSTPORTA Bit 6
25	GND	26	FIRSTPORTA Bit 5
27	n/c	28	FIRSTPORTA Bit 4
29	GND	30	FIRSTPORTA Bit 3
31	n/c	32	FIRSTPORTA Bit 2
33	GND	34	FIRSTPORTA Bit 1
35	+5V	36	FIRSTPORTA Bit 0
37	GND	38	D/A GND
39	D/A OUT 0	40	D/A OUT 1

* Pins 1 and 3 have 10 K pull-up resistors installed.

Table 15. Auxiliary connector (P3) pin out