

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**SISTEMAS PARA MEDIÇÃO DE CORRENTES DE DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS: DESENVOLVIMENTOS E RESULTADOS
PRELIMINARES**

ANDRÉ MATIAS NUNES TEIXEIRA

ANDRÉ MATIAS NUNES TEIXEIRA

**SISTEMAS PARA MEDIÇÃO DE CORRENTES DE DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS: DESENVOLVIMENTOS E RESULTADOS
PRELIMINARES**

Dissertação apresentada ao 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 Mestre em Engenharia Elétrica.
Área de concentração: Engenharia de Potência
Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica
Orientador: Prof. Silvério Visacro Filho

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE
CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - CPDEE
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG
BELO HORIZONTE
AGOSTO - 2010**

AGRADECIMENTOS

Nenhuma palavra de agradecimento escrita nesse papel vai conseguir realmente expressar o que queria comunicar, mas espero que elas transmitam um pouco de meu orgulho e reconhecimento da contribuição de cada um de vocês nessa etapa.

Agradeço a minha mãe Marisa, meus irmãos Fernanda e Rafael e meu pai Fernando por terem sido um porto seguro durante toda a minha caminhada.

Agradeço a meus amigos, que felizmente são numerosos demais para citá-los um a um, pelo encorajamento e vivência.

Agradeço aos colegas que trabalharam diretamente comigo, Guilherme, Henrique, Larisse e Alisson, primeiramente e Listz, Marcela, Miguel e Roger, depois. Sem a dedicação e o empenho deles, esse trabalho não poderia ser realizado.

Agradeço aos demais membros do LRC pela amizade e a transmissão de conhecimento.

E por fim, agradeço especialmente ao professor Silvério Visacro Filho, por sua significativa contribuição na realização deste texto e por sua dedicação em orientar-me e transferir parte de seu valioso conhecimento. Espero ter conseguido alcançar suas expectativas.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 RELEVÂNCIA DA INVESTIGAÇÃO	1
1.2 OBJETIVO	3
1.3 METODOLOGIA	3
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	4
2. PROCESSOS ENVOLVIDOS NA FORMAÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 CLASSIFICAÇÕES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	5
2.2 A DESCARGA NUVEM-SOLO NEGATIVA DESCENDENTE	7
2.3.1 VISÃO GERAL	7
2.3.2 RUPTURA PRELIMINAR	11
2.3.3 CANAL PRECURSOR DE DESCARGA	14
2.3.4 PROCESSO DE CONEXÃO	18
2.3.5 CORRENTE DE RETORNO	20
2.3.6 PROCESSO DE RECARREGAMENTO DO CANAL	27
2.3.7 COMPONENTE CONTÍNUA DA CORRENTE DE DESCARGA	29
2.3.8 COMPONENTE-M	33
2.3.9 PROCESSOS-J E -K	36
3. APRESENTAÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO DESENVOLVIDOS	40
3.1 INTRODUÇÃO	40
3.2 O SISTEMA DE MEDIÇÃO INSTALADO NA LINHA DE TRANSMISSÃO	40
3.2.1 VISÃO GERAL	40
3.2.2 LOCAL DE INSTALAÇÃO	42
3.2.3 TRECHO DE LINHA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL	43
3.2.4 ABRIGO	45
3.2.5 TRANSDUTORES DE CORRENTE	47
3.2.6 SISTEMAS DE PROTEÇÃO, AQUISIÇÃO E REGISTRO	49
3.2.7 SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO E ACIONAMENTO	54

3.2 O SISTEMA DE MEDIÇÃO INSTALADO NO MORRO DO CACHIMBO	58
3.3.1 A ESTAÇÃO DO MORRO DO CACHIMBO	58
3.3.2 VISÃO GERAL	59
3.3.3 TORRE INSTRUMENTADA	59
3.3.4 TRANSDUTORES DE CORRENTE	62
3.3.5 SISTEMAS DE PROTEÇÃO, AQUISIÇÃO E REGISTRO	63
<u>4. RESULTADOS E ANÁLISES</u>	69
4.1 INTRODUÇÃO	69
4.2 DADOS OBTIDOS PELO SISTEMA INSTALADO NO TRECHO DE LINHA DE TRANSMISSÃO EXPERIMENTAL	69
4.3 SISTEMA INSTALADO NO MORRO DO CACHIMBO	71
4.3.1 RESUMO DAS MEDIÇÕES REALIZADAS RECENTEMENTE	71
4.3.2 ILUSTRAÇÕES DE REGISTROS DAS FASES IMPULSIVAS DA CORRENTE DE DESCARGA	72
4.3.3 REGISTRO DE CORRENTE DE DESCARGA NA FASE ANTERIOR À PRIMEIRA CORRENTE DE RETORNO	76
<u>5. CONCLUSÕES</u>	83
5.1 CONCLUSÕES GERAIS	83
5.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	84
<u>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	85

RESUMO

A corrente de retorno da descarga atmosférica constitui a fonte dos seus efeitos e dos distúrbios eletromagnéticos gerados pelo fenômeno. No passado, este aspecto motivava a investigação desta corrente e de seus parâmetros.

Mais recentemente, verificou-se a possibilidade de se inferir importantes informações sobre a formação da descarga em seu estágio final a partir das assinaturas de correntes medidas na base do canal.

A grande maioria de dados disponíveis sobre as correntes de descargas é proveniente de regiões temperadas da Europa e dos Estados Unidos. Trabalhos anteriores mostraram diferenças significativas entre estatísticas obtidas destes dados e aquelas correspondentes aos dados obtidos em regiões tropicais, incluindo o Brasil.

O trabalho desta dissertação está inserido num projeto de investigação que tem por objetivo contribuir para a caracterização do fenômeno, especialmente no Brasil.

O foco desse trabalho é também diferente dos tradicionais, dedicados apenas à fase impulsiva da corrente de descarga, designada corrente de retorno, por ser esta fase aquela considerada responsável pela maior parte dos danos causados pela descarga. Esse trabalho teve como objetivo principal investigar de forma integral a corrente de descarga, incluindo fases complementares desta corrente sobre as quais o conhecimento é bem mais escasso, tais quais a componente contínua da corrente e a fase que precede o estabelecimento da corrente de retorno.

Para possibilitar essa investigação, dois sistemas de medição foram desenvolvidos, no contexto da presente dissertação. O primeiro foi instalado na Estação de Pesquisa de Raios do Morro do Cachimbo (MCS). O segundo foi instalado num trecho de

linha de transmissão experimental em tamanho real, construído numa colina próxima ao Complexo de Pesquisa MCS.

Durante o tempo de execução do trabalho diversas descargas atmosféricas foram medidas e alguns resultados relevantes e de excelente qualidade foram obtidos. Particularmente, pelo conhecimento que se tem da literatura no tema, logrou-se registrar, pela primeira vez e em detalhes, a fase da corrente de descargas naturais que antecede a corrente de retorno. Esta fase inclui os pulsos de corrente medidos na base da torre gerados em resposta aos passos consecutivos do canal precursor de descargas em formação que se aproxima do solo.

O comportamento dessa fase da corrente é descrito em detalhes nessa dissertação.

ABSTRACT

The return current is the main source of the lightning effects and of electromagnetic disturbance caused by such event. In the past, this was the main reason to justify the investigation of this current and related parameters.

Recently, the possibility to infer information about the formation of the final stage of lightning discharges from the current measured at the channel bottom close to the ground has been explored.

Most of the available information about lightning current is derived from measurements performed in temperate regions of Europe and North America. It has been verified that the parameters of such currents present important differences in relation to those obtained from currents measured in tropical areas, including in Brazil.

This work is part of a research intended to contribute to the characterization of lightning, mainly in Brazil.

The focus of this work is different from the traditional approaches that are dedicated to the evaluation of the impulsive phase of lightning current, the return current, considered the main source of lightning damages. This dissertation developed a more fundamental and general approach related to the investigation of the whole lightning current, comprising those components, such as the continuing current and the phase preceding the return current, that are poorly known.

In order to perform such investigation, two measuring systems were developed, the first one being installed at the Morro do Cachimbo Station (MCS). The other one was installed in a two-span experimental transmission line placed at the top of a hill nearby MCS.

Several flashes were measured since the installation of these systems and relevant, high-quality and original results were obtained. According to the literature, the phase preceding the return current of natural lightning, consisting in a set of well defined current pulses developed in response to the leader approaching the ground, was measured for the first time. This phase was measured in the base of the MCS tower.

The behavior of this phase of lightning current is discussed in details in this work.

1 Introdução

1.1 Relevância da Investigação

A Descarga Atmosférica é um fenômeno complexo que envolve o estabelecimento de um canal ionizado na atmosfera entre um centro de carga numa nuvem de tempestade e outro corpo, eventualmente a superfície terrestre, cujo descarregamento gera uma corrente elétrica de alta intensidade e curta duração. Devido a sua severidade, ela é considerada uma importante agente causadora de distúrbios em sistemas elétricos e de telecomunicações. Dentre seus vários efeitos, alguns de destaque são os desligamentos de redes elétricas, a queima de equipamentos, a interrupção de continuidade de sistemas de produção e a corrupção de dados transmitidos. Além disso, uma grande quantidade de acidentes com pessoas e animais é registrada todo ano, muitos deles fatais. Por esses motivos, esse evento é motivo de vários estudos em engenharia (Visacro 2005).

A corrente de descarga é a principal fonte de seus efeitos. O conhecimento de parâmetros desse evento, associados à corrente (como amplitude e tempo de frente) ou à incidência geográfica (como densidade de descargas por área), é de suma importância para a definição e otimização de práticas de proteção de sistemas, equipamentos e seres vivos, tanto para efeitos diretos quanto para indiretos. A

necessidade de tal caracterização tem motivado a realização de investimentos elevados em pesquisa nesta área.

Com relação à corrente de descarga, a fase que primeiramente chamou atenção na engenharia foi a fase impulsiva da onda, que apresenta altíssima corrente e curta duração. Isso ocorreu porque a maioria dos efeitos danosos do fenômeno está associada a essa parte. Logo, grande parte dos estudos realizados na área foi sobre esse tema e o conhecimento dessa fase está consolidado.

Com o passar do tempo, outras partes começaram a ganhar destaque: a fase entre correntes impulsivas e a fase anterior à primeira corrente impulsiva. A fase entre impulsos pode apresentar um fluxo de corrente denominado componente contínua. Ela é caracterizada por uma corrente de relativa baixa intensidade, mas de duração muito maior que a da parte impulsiva. Logo, também apresenta potencial para causar danos. A fase anterior à primeira corrente ainda não foi bem caracterizada. De acordo com medições recentes, ela apresenta pequenos pulsos de corrente, com características distintas a todas as outras fases (Visacro *et al.* 2010).

A presente dissertação se coloca no contexto de uma pesquisa desenvolvida durante vários anos no LRC¹ sobre medição direta de parâmetros de descargas atmosféricas. Tendo isso em vista e sabendo como esse assunto é vasto, esse trabalho tem como característica a abrangência de vários desenvolvimentos, em detrimento de abordar um ponto específico. Em suma, essa dissertação se coloca como uma contribuição para a pesquisa que busca a caracterização da corrente de descargas atmosféricas.

¹ LRC – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas (fruto de uma parceria UFMG - CEMIG)

1.2 Objetivo

O trabalho desenvolvido durante esse mestrado teve como objetivo desenvolver realizações relativas aos meios de medição capazes de contribuir para a evolução do conhecimento sobre a corrente de descargas atmosféricas, particularmente sobre as fases menos estudadas, a componente contínua e a fase anterior à primeira corrente de retorno.

Vale citar que essa dissertação corresponde a uma parcela dos desenvolvimentos em curso no LRC. A investigação tem uma abrangência maior e conta com a participação de uma equipe de alunos, que tiveram contribuição importante para os desenvolvimentos desse trabalho.

1.3 Metodologia

Para alcançar o objetivo traçado, a dissertação envolveu dois desenvolvimentos principais.

O primeiro foi a construção e implantação de um novo sistema de medição direta de corrente de descargas atmosféricas. Esse sistema foi instalado numa linha de transmissão experimental em escala real. Seu objetivo era a medição completa da onda, com ênfase tanto na parte impulsiva quanto na componente contínua.

O segundo foi o aprimoramento do sistema de medição direta de corrente de descargas na Estação de Pesquisa do Morro do Cachimbo. Esta estação é operada pelo LRC e já fornecia dados relevantes, não só de corrente, há algum tempo. Por meio deste aprimoramento pretendia-se adicionar à medição da parte impulsiva, já existente, a medição da componente contínua e da fase anterior à primeira corrente de retorno.

1.4 Organização do Texto

Este texto foi organizado em seis capítulos. O *Capítulo Um* tem como objetivo expor a motivação e metodologia desta investigação, além de traçar resumidamente os aspectos abordados em cada capítulo.

O *Capítulo Dois* considera os aspectos relativos ao fenômeno descarga atmosférica, particularmente sua corrente. Esse assunto é de interesse para entendimento dos temas considerados na dissertação. Nesse capítulo são apresentadas, também, as descrições dos parâmetros associados à descarga.

O *Capítulo Três* descreve os dois sistemas de medição desenvolvidos durante esse trabalho. Sua descrição envolve tanto a parte de *software*, quanto de *hardware*, ou seja, os programas, circuitos e instalações físicas desenvolvidos para os sistemas.

No *Capítulo Quatro* são apresentados resultados e análises decorrentes das medições obtidas nos sistemas instalados. Nesse capítulo estão incluídos dados inéditos na literatura sobre estatísticas de parâmetros dos pulsos presentes na fase anterior à primeira corrente impulsiva.

As considerações finais deste trabalho de investigação e a proposta de continuidade para o alcance do objetivo do projeto encontram-se no *Capítulo Cinco*.

As referências bibliográficas encontram-se no *Capítulo Seis*, as quais estão organizadas segundo ordem alfabética do sobrenome do autor principal.

2 Processos Envolvidos na Formação das Descargas Atmosféricas

2.1 Introdução

Esse capítulo descreve o fenômeno descarga atmosférica com uma abordagem geral, mas sucinta, que inclui, inicialmente, sua classificação. Os processos componentes desse evento são abordados em maior profundidade para a descarga nuvem-solo negativa descendente, que é o tipo de descarga mais relevante à engenharia. Uma leitura detalhada sobre esse assunto pode ser encontrada em Visacro (2005).

2.2 Classificações de Descargas Atmosféricas

As descargas atmosféricas naturais estão geralmente associadas com as nuvens de tempestade, embora outros eventos, como tempestades de areia e erupções vulcânicas também possam criá-las. O ambiente elétrico dentro da nuvem é extremamente dinâmico e complexo, mas sabe-se que a disposição final de carga pode ser simplificada para o modelo indicado na figura 2.1.

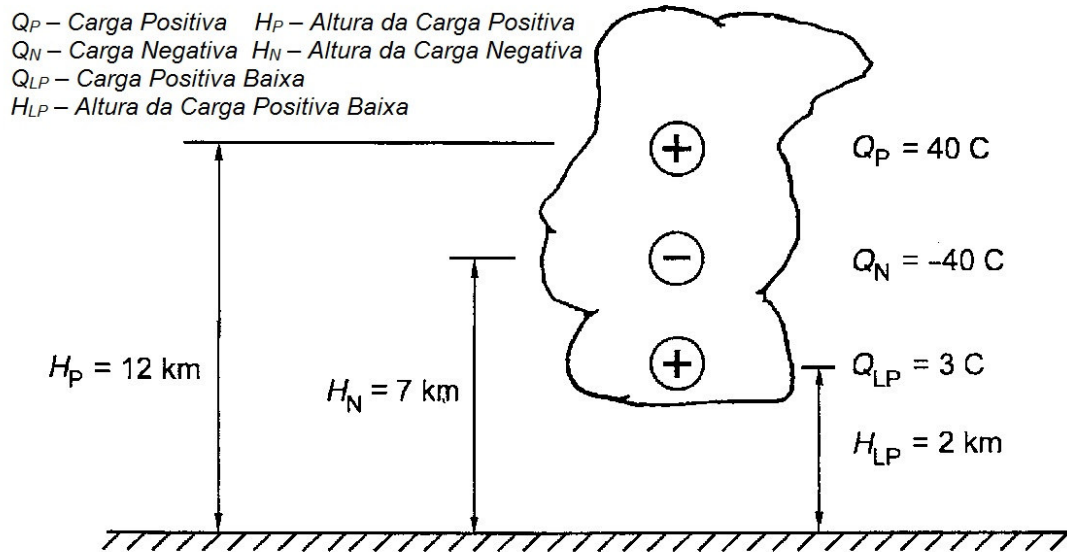


Fig. 2.1 – Modelo de eletrificação de nuvem, representado por um tripolo vertical. Adaptado de Rakov e Uman (2003)

Esse modelo consiste em três bolsões de cargas dispostos verticalmente. As cargas positivas ficam acima, as cargas negativas, no meio e existem cargas positivas adicionais em menor quantidade abaixo. Essas cargas positivas inferiores podem não estar sempre presentes na nuvem. Apesar da representação como cargas isoladas, esses bolsões se estendem por uma grande faixa dentro da nuvem, que pode ultrapassar alguns quilômetros.

Descargas atmosféricas podem ocorrer dentro da própria nuvem (chamadas descargas intra-nuvem), entre nuvens diferentes, entre nuvem e ionosfera e entre nuvem e solo. Mais de 50% das descargas são intra-nuvem, porém devido a sua distância ao solo, seus efeitos não são considerados muito importantes. A descarga de maior interesse prático é a descarga nuvem-solo.

A descarga nuvem-solo pode ser classificada a partir de dois critérios: o primeiro é a polaridade do centro de carga envolvido, e, conseqüentemente, da carga transferida ao solo e o segundo é a direção principal de propagação do canal da descarga.

Quando o centro de carga gerador é negativo, a descarga é chamada de descarga negativa. Quando o centro de carga é positivo, a descarga é do tipo positiva. Os centros de carga mais próximos ao solo possuem as maiores chances de produzir descargas nuvem-solo. Como as cargas inferiores positivas não são muito significativas, os bolsões negativos constituem a fonte mais freqüente desse tipo de fenômeno.

O canal de descarga é um caminho de plasma ionizado por onde as ondas de corrente da descarga se propagam. Quando ele se inicia na nuvem, propagando-se para baixo em direção ao solo, a descarga a ser originada é chamada de descarga descendente. Quando o canal se origina do solo (na verdade, ele usualmente se origina de estruturas metálicas altas), propagando-se para a cima em direção da nuvem, a descarga é classificada como ascendente.

A descarga nuvem-solo negativa descendente corresponde a aproximadamente 90% de todas as descargas nuvem-solo (Visacro 2005). Por ser tão mais relevante que os outros tipos, esse é o tipo de descarga que é discutido no decorrer desse capítulo.

2.3 A Descarga Nuvem-Solo Negativa Descendente

2.3.1 Visão Geral

A descarga nuvem-solo negativa descendente é um fenômeno composto por vários processos, alguns envolvendo canais que saem da nuvem e que podem chegar eventualmente ao solo e outros envolvendo canais que ficam confinados dentro da nuvem. Apesar da noção de descarga estar muito ligada à corrente que chega ao solo, essa seção aborda todas as fases conhecidas desse processo numa ordem basicamente cronológica, iniciando por fases que ocorrem dentro da nuvem. A visão geral desse evento é desenvolvida com referência à figura 2.2.

Nas considerações deste item adota-se basicamente a nomenclatura apresentada em Visacro (2005). Uma extensão da tabela da referência é apresentada nessa seção com o objetivo de facilitar o entendimento do texto.

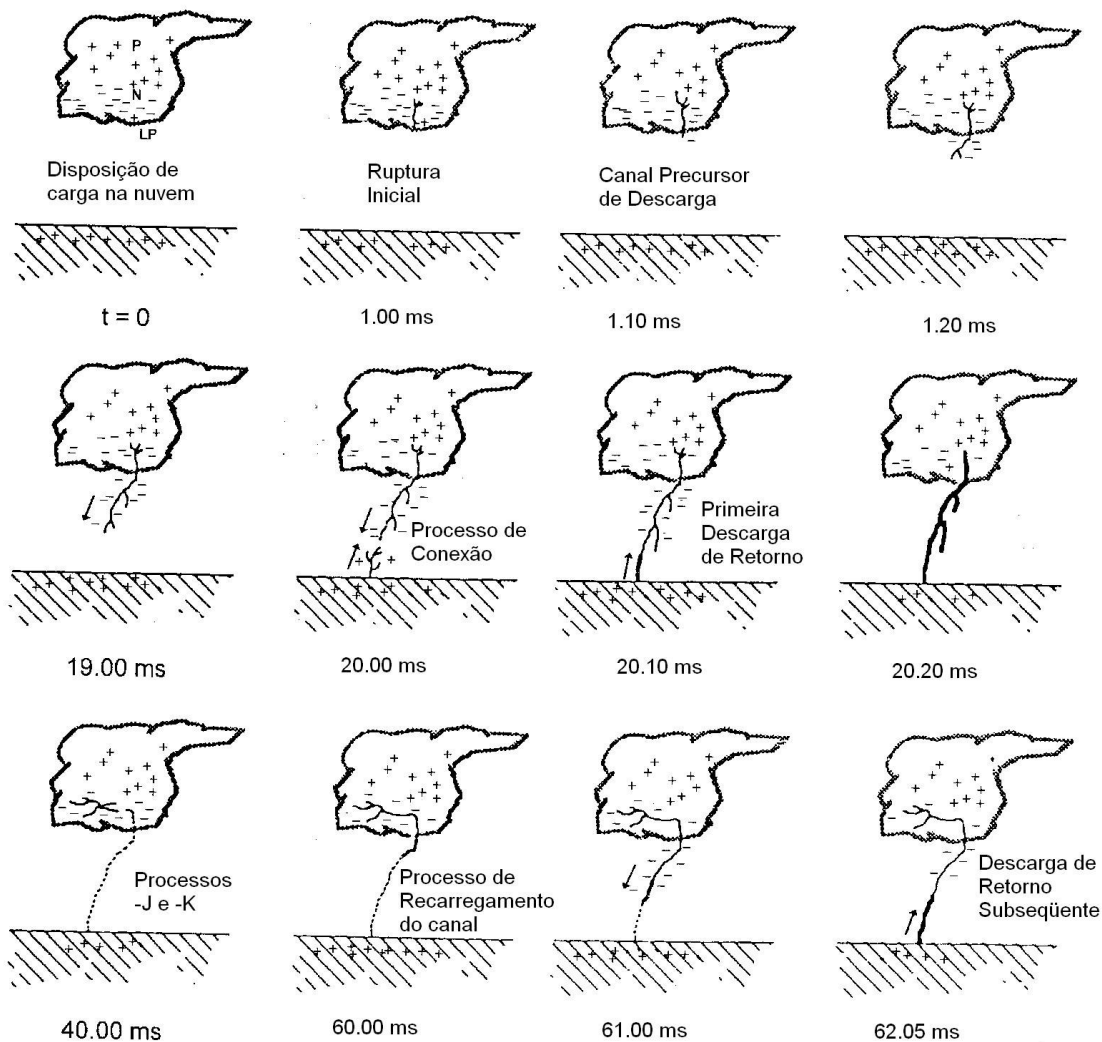


Fig. 2.2 - Visão geral de uma descarga atmosférica. Adaptado de Rakov e Uman (2003)

A fonte da descarga é a nuvem de tempestade, cuja distribuição de carga já foi discutida anteriormente. O fenômeno natural tem seu começo num processo chamado **Ruptura Inicial** ou **Ruptura Preliminar**. Não há um consenso sobre o mecanismo desse processo. Ele pode ser uma ruptura elétrica entre os centros negativo e positivo baixo (como na figura 2.2) ou rupturas no centro negativo em direções aleatórias. Esse processo dura algo entre poucos milissegundos e algumas dezenas de milissegundos e cria condições para o início do **Canal Precursor de Descarga**. Este é um canal de plasma ionizado carregado negativamente que se estende em direção ao solo a uma velocidade média de 2×10^5 m/s

numa série de passos discretos. O canal precursor serve como um caminho condutor entre nuvem e solo e vários Coulombs de carga são depositados ao longo dele. Esse processo dura algumas dezenas de milissegundos.

Com a aproximação do canal precursor do solo, o campo elétrico na superfície, particularmente em estruturas protuberantes do terreno, aumenta, até que seja rompida a rigidez dielétrica do ar. A partir desse ponto um ou mais canais ascendentes começam a ser formados. Esses também são canais de plasma ionizado, mas carregados positivamente, que se movem em direção à nuvem também com passos discretos. A criação desses canais marca o início do **Processo de Conexão**. Esse processo termina quando ocorre o contato entre um canal ascendente e o descendente, usualmente a algumas dezenas de metros acima do solo.

Com o contato entre os canais, começa a **Descarga de Retorno**. Esta consiste em um surto de corrente de alta intensidade e curta duração que neutraliza as cargas depositadas no canal precursor. A velocidade desse surto fica entre um terço e metade da velocidade da luz. Tipicamente, sua corrente cresce até o valor médio entre 30 kA e 45 kA, dependendo da referência (Berger *et al.* 1975 e Visacro *et al.* 2004), em poucos microssegundos e depois decai à metade desse valor em algumas dezenas de microssegundos.

Quando esse corrente cessa, a descarga pode acabar. Nesse caso, ela é chamada de descarga única. No entanto, é muito comum que o canal da primeira descarga que está desaparecendo seja percorrido pela **Corrente de Recarregamento do Canal**, se o tempo passado não for muito longo. Durante esse intervalo entre descargas, podem ocorrer na nuvem os **Processos-J** e **-K**. O processo-K pode ser visto como um transitório rápido que ocorre durante o processo-J, mais lento. O processo-J corresponde a uma redistribuição de cargas dentro da nuvem. Existe controvérsia quanto ao fato desses processos serem relacionados ao início do processo de recarregamento do canal. Muitas vezes, o processo-J é visto como uma extensão do canal de descarga dentro da nuvem e o processo-K como um pequeno surto no canal quando este se aproxima bastante de um centro de carga. Mas é fato que esses processos transportam cargas adicionais para e pelo canal de descarga,

porém nunca chegando ao solo. Algumas vezes, depois da última descarga, ocorre o chamado Processo-F. Esse processo é muito similar, senão igual, ao processo-J.

A corrente de recarregamento direto geralmente segue para baixo com uma velocidade típica de 10^7 m/s e deposita uma carga próxima de 1 C no canal. Algumas vezes, o processo de recarregamento pode apresentar passos discretos, como o canal precursor, perto do solo. Nesse caso o processo é chamado **Processo de Recarregamento por Passos do Canal**.

Com a aproximação do surto de corrente do solo, ocorre um processo de conexão parecido com o que ocorreu anteriormente à primeira descarga, porém, mais próximo ao solo. Quando essa conexão acontece, a segunda descarga (ou qualquer outra subsequente) começa. Tipicamente, a corrente subsequente chega ao pico entre 12 kA e 16 kA, dependendo da referência (Berger *et al.* 1975 e Visacro *et al.* 2004), em menos de 1 μ s e decai à metade desse valor em poucas dezenas de microssegundos.

Muitas vezes, a corrente impulsiva da descarga subsequente é seguida por uma corrente de dezenas a centenas de Ampères que dura dezenas a centenas de milissegundos. Esta é conhecida como **Componente Contínua**. Esse processo também pode seguir a primeira descarga, mas é mais raro. Quando essa corrente dura mais de 40 ms, ela é chamada de Componente Contínua de Longa Duração. A fonte da componente Contínua é a carga da nuvem próxima ao percurso do canal e não a carga depositada no canal, o que a diferencia das correntes de retorno. Surtos de corrente que ocorrem durante a Componente Contínua são chamados de **Componentes-M**. Esses pulsos duram algumas centenas de microssegundos e têm pico de corrente da ordem de centenas de Ampères, eventualmente chegando à faixa de alguns milhares de Ampères.

Os intervalos entre descargas têm a ordem de várias dezenas de milissegundos, mas podem chegar a várias centenas de milissegundos se ocorrer a Componente Contínua. A duração total da descarga está na faixa de várias centenas de milissegundos, podendo ultrapassar a faixa de 1 s.

Após a tabela 2.1 que sumariza a nomenclatura adotada, cada um dos processos citados nessa seção é estudado separadamente, com uma abordagem mais detalhada.

Tab. 2.1 – Nomenclatura utilizada no trabalho. Adaptado de Visacro (2005).

Nomenclatura em Português	Nomenclatura em Inglês
Raio ou Descarga Atmosférica	<i>Lightning</i>
Descarga Atmosférica Plena	<i>Flash</i>
Ruptura Inicial	<i>Initial Breakdown</i>
Ruptura Preliminar	<i>Preliminary Breakdown</i>
Canal Precursor de Descarga	<i>Stepped Leader</i>
Canal Descendente	<i>Downward Leader</i>
Canal Ascendente	<i>Upward Leader</i>
Canal de Descarga	<i>Lightning Channel</i>
Corrente de Retorno	<i>Return Current</i>
Descarga de Retorno	<i>Return Stroke ou Stroke</i>
Processo de Recarregamento do Canal de Descarga	<i>Dart Leader</i>
Processo de Conexão	<i>Attachment Process</i>
Componente Contínua	<i>Continuing Current</i>

2.3.2 Ruptura Preliminar

A ruptura inicial é o processo intra-nuvem que inicia ou leva ao início da formação do canal descendente precursor da descarga. Há ainda muitas incertezas quanto ao entendimento desse evento, já que ele ocorre dentro da nuvem e há intensa atividade eletromagnética na região, não necessariamente relacionada com a descarga a ser formada. Porém, três fatores levam a crer na sua existência como um evento isolado:

- Verificação de luminosidade na nuvem centenas de milissegundos antes do aparecimento do canal precursor;
- Ocorrência de mudanças significativas no campo elétrico durante esse mesmo período de tempo;
- O fato da duração total de formação do canal precursor não ultrapassar algumas dezenas de milissegundos.

Os dois primeiros fatores falam de eventos que geralmente ocorrem antes de uma descarga atmosférica plena e o terceiro indica que esses eventos não estão associados ao canal precursor. Logo, a ruptura inicial é considerada um processo isolado.

A primeira abordagem tentando uma explicação da ruptura preliminar foi feita por Clarence e Malan (1957). O processo consistiria em uma ruptura vertical entre um centro de carga negativo e outro positivo baixo, que duraria entre 2 e 10 ms. Esse processo seria seguido diretamente pela formação do canal precursor ou por um estágio intermediário, com pouca atividade elétrica, que poderia durar até 400 ms.

Como não há um consenso sobre o verdadeiro processo da ruptura inicial, diferentes estudos forneceram diferentes abordagens. Krehbiel *et al.* (1979), a partir de leituras de campo elétrico a diferentes distâncias, interpretou a ruptura inicial como uma série de rupturas predominantemente horizontais que ocorrem no centro de carga que origina a descarga. Mazur (2002) a partir de mapeamento da radiação da nuvem alegou que a ruptura preliminar produz canais bidirecionais e bipolares, mas com carga total nula.

Já Proctor *et al.* (1988), a partir de um sistema com medição de campos elétricos, alegou que a ruptura inicial não era um processo independente, mas sim apenas o início da formação do canal precursor de descarga. Porém, estudos como o de Rustan *et al.* (1980) e o de Rodes e Krehbiel (1989) acharam diferenças significativas nos campos elétricos desses dois processos.

De acordo com Rakov e Uman (2003) os estudos mais recentes sugerem que a ruptura preliminar pode ser vista como uma seqüência de canais se estendendo em direções aleatórias a partir do centro de carga. Um desses eventos evolui para o canal precursor de descarga.

A ruptura inicial tem duas assinaturas de campo elétrico, que são detectadas por medidores de campo com constantes de tempo diferentes. A mudança lenta de campo (sistemas com valores de constante de tempo maiores) pode ser vista na figura 2.3.

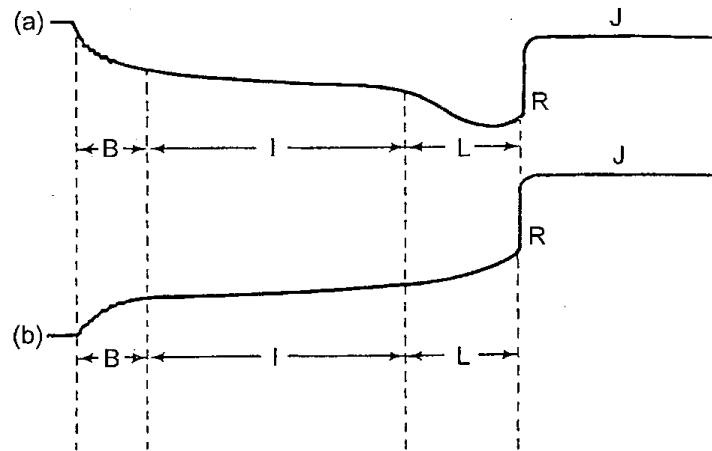


Fig. 2.3 – Exemplo da forma de onda de campo elétrico que inclui a ruptura inicial, o estágio intermediário, o canal precursor e a corrente de retorno. A figura (a) foi medida a 2 km do ponto de incidência e a figura (b) a 5 km.

Adaptado de Rakov e Uman (2003)

Nessa figura, a ruptura preliminar é identificada pela letra B. A letra L representa a formação do canal precursor, a letra R representa a descarga de retorno, a letra I, o estágio intermediário e a letra J, uma fase sem atividade durante o intervalo entre correntes de retorno. Nela, apresentam-se os perfis de campo elétrico medidos em duas distâncias diferentes do ponto de incidência. Pode-se notar que a 2 km, a polaridade da mudança de campo antes da corrente de retorno apresenta polaridade oposta à mudança de campo associada à própria corrente de retorno. Já a 5 km, as mudanças no campo apresentam a mesma polaridade. A mudança de campo elétrico associada à ruptura inicial segue, nos dois casos, a polaridade da mudança do canal precursor. Muitas vezes, quando não há o processo intermediário, os campos associados à ruptura inicial e ao canal precursor se confundem.

Para o campo elétrico rápido (sistemas com constantes de tempo menores), a assinatura da ruptura é a presença de um trem de pulsos. Essa forma de onda, cuja duração é da ordem de 1 ms, é considerada a marcação entre a ruptura e a formação do canal precursor.

De acordo com Nag e Rakov (2009), os pulsos são bipolares, com polaridade inicial igual à da corrente de retorno. A primeira subida geralmente apresenta dois ou três picos,

enquanto as demais fases são suaves. A amplitude pode chegar a ser comparável ao pulso da descarga de retorno, mas na maioria das vezes é muito menor, chegando também a ser desprezível. A duração individual do pulso tem média em torno de $4,8 \mu\text{s}$, mas pode ser bem maior, até $40 \mu\text{s}$ (esses valores curtos justificam a necessidade de constantes de tempo pequenas para a detecção por sistemas de medição). O intervalo entre pulsos é da ordem de $65 \mu\text{s}$. A figura 2.4 exemplifica esses pulsos:

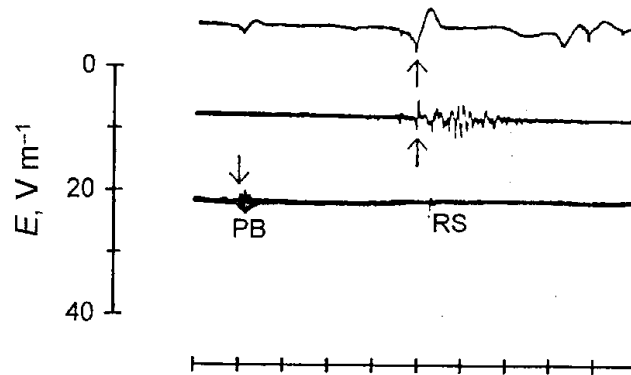


Fig. 2.4 - Exemplo da forma de onda do trem de pulsos no campo elétrico da ruptura inicial. Nessa figura, PB identifica a ruptura preliminar e RS identifica a descarga de retorno. Adaptado de Rakov e Uman (2003)

Essa figura apresenta detalhes em diferentes escalas de tempo de registros de campo elétrico da ruptura preliminar. As linhas de cima apresentam $40 \mu\text{s}$ por divisão, as do meio, $400 \mu\text{s}$ por divisão e as de baixo, 2 ms por divisão. A figura mais aberta mostra bem a forma bipolar e com vários picos da onda.

Por ser um processo no interior da nuvem, não se tem registro de correntes elétricas características desse fenômeno.

2.3.3 Canal Precursor de Descarga

O canal precursor de descarga é o canal descendente que se desenvolve na atmosfera abaixo da nuvem de tempestade, criando um caminho de plasma ionizado entre a nuvem e o solo. Seu crescimento se dá de maneira discreta, com rupturas elétricas que se

estendem de 10 a 200 m por passos. Quando toca o solo ou um canal ascendente, esse canal é percorrido pela corrente da primeira descarga atmosférica e eventualmente pelas correntes de descargas subseqüentes.

Nos estudos iniciais sobre o canal precursor (principalmente em Schonland 1938), este foi classificado em dois tipos: o tipo- α e o tipo- β . O canal tipo- α é um canal bem-comportado. Sua velocidade de descida é de 10^5 m/s, seus passos curtos, pouco brilhantes e com pouca ramificação. A grande maioria dos canais precursores é desse tipo. O canal tipo- β apresenta dois estágios de evolução. O primeiro estágio, mais próximo da nuvem, tem uma velocidade maior de descida, 10^6 m/s, passos longos, muito brilhantes e com intensa ramificação. Ao se distanciar da nuvem, o segundo estágio se inicia com características bem semelhantes ao canal tipo- α .

Schonland *et al.* (1938) subdividiram o canal tipo- β em mais dois tipos: o tipo- β_1 e o tipo- β_2 . O canal tipo- β_1 apresenta as mesmas características do antigo tipo- β . Já o canal tipo- β_2 apresenta o diferencial de ser atravessado, durante seu segundo estágio, por surtos de corrente semelhantes à corrente de recarregamento direto do canal.

Uma possibilidade levantada mais recentemente (Rakov e Uman 2003) é de que os canais tipo- α e tipo- β sejam exatamente o mesmo tipo de canal, porém com o primeiro estágio, mais intenso, do tipo- α ocorrendo dentro da nuvem.

Definidos os tipos de canais, são apresentadas a seguir as características do canal tipo- α , que é o mais comum.

Vários estudos, apresentados em Rakov e Uman (2003), realizaram medições da velocidade de descida perto de 10^5 m/s, quando longe do solo. Com a aproximação do chão, essa velocidade sobe para 10^6 m/s, um aumento de dez vezes. A duração total típica da formação depende da altura da nuvem, mas geralmente gira em torno de algumas dezenas de milissegundos (a média sendo próxima de 35 ms).

A carga total acumulada no canal é próxima ao valor neutralizado pela primeira corrente de retorno. Berger *et al.* (1975), em seu trabalho em Lugano, Suíça, estimou 4,5 C como mediana. Já Brook *et al.* (1962), no Novo México, EUA, estimou 6 C. Esses valores são realmente próximos da mediana da carga transferida ao solo pela primeira descarga, que é 5,2 C (Berger *et al.* 1975). Porém, estimativas feitas na África do Sul por Proctor *et al.* (1988) indicam uma mediana de 11 C, quase o dobro dos valores anteriores. Isso se deve ao fato de canais muito longos, chegando a 13 km, estarem presente nesse estudo.

Com relação à corrente, Thomson *et al.* (1985) estimou a partir do campo elétrico que a corrente do canal precursor variava entre 100 e 5000 A, com média de 1,3 kA. Já Krehbiel (1981), também a partir de campo, estimou uma corrente variando de 200 a 3800 A, com média também de 1,3 kA.

Assim como a ruptura inicial, a formação do canal precursor tem duas assinaturas de campo elétrico, detectadas por sistemas de medição com constantes de tempo diferentes. A mudança lenta no campo pode ser vista na figura 2.5.

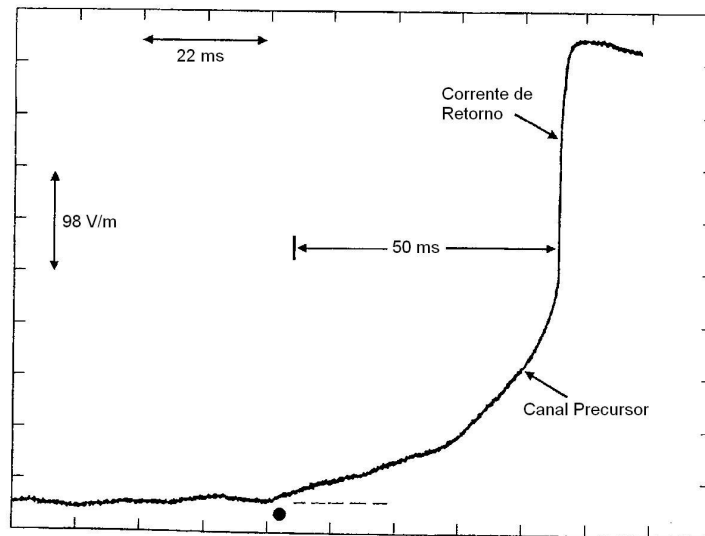


Fig. 2.5 – Exemplo da forma de onda do campo elétrico de uma descarga ocorrida na Flórida em 1979 e medida a aproximadamente 12 km do ponto de incidência. O ponto marca o começo da mudança associada ao canal precursor e o intervalo de tempo de 50 ms, a duração. Adaptado de Rakov e Uman (2003)

A onda apresenta uma variação lenta e contínua, que dura por toda a formação do canal, logo precedendo a rápida variação atribuída à passagem da corrente de retorno pelo canal. Com a aproximação do canal ao solo, a inclinação da onda de campo elétrico se acentua.

A variação de campo elétrico devido à passagem da corrente de retorno apresenta sempre a mesma polaridade, já que ela está relacionada com a anulação de cargas negativas na nuvem. Mas o mesmo não ocorre com o campo associado ao canal precursor. A relativas longas distâncias (maiores que 5 km), as polaridades de variação dos campos produzidos pelo canal precursor e pela corrente de retorno são as mesmas, tendendo ao mesmo valor para distâncias muito grandes (desconsiderando efeitos de propagação de onda). Isso se deve ao fato que, de longe o canal precursor pode ser visto como uma transferência de carga da nuvem para uma altura intermediária e a corrente de retorno uma transferência de carga dessa altura intermediária para o solo, o que, a longas distâncias, produziria o mesmo efeito. Já a curtas distâncias (menores que 5 km), as polaridades de variação dos campos produzidos pelo canal precursor e pela corrente de retorno são opostas. Isso ocorre porque a pequenas distâncias, o que ocorre na nuvem tem pouca influência, já que o canal está muito mais perto.

Vários estudos, apresentados em Rakov e Uman (2003), foram feitos sobre os passos do canal precursor. Nesses estudos, a distância percorrida por cada passo variou entre 3 e 200 m. Já o intervalo entre cada passo variou entre 29 e 100 μ s. Em vários desses estudos, foi percebido que os passos mais próximos ao solo eram maiores e com intervalos menores. A assinatura de campo elétrico rápido do canal precursor é atribuída a esses passos. Assim como a ruptura inicial, ela consiste em pulsos. A figura 2.6 mostra esse comportamento.

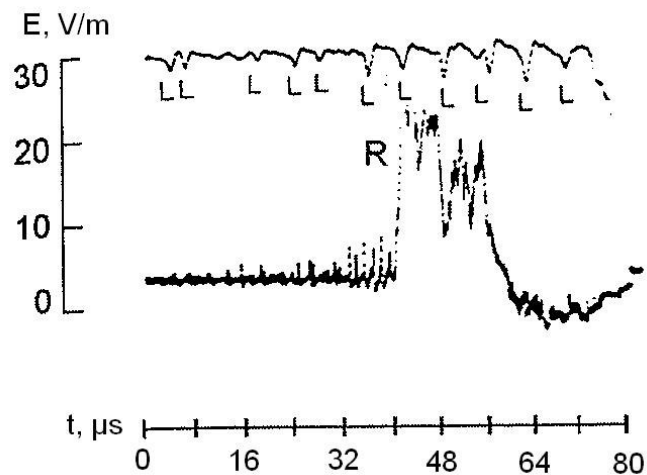


Fig. 2.6 - Exemplo da forma de onda do trem de pulsos no campo elétrico do canal precursor. Nessa figura, L identifica os passos do canal precursor e R identifica a descarga de retorno. Adaptado de Rakov e Uman (2003)

As características dos pulsos associados aos passos do canal precursor são muito diferentes das características dos pulsos da ruptura inicial. A primeira diferença está na forma de onda. Os pulsos associados ao canal precursor são unipolares e com variações suaves, no lugar de bipolares e com variações abruptas como na ruptura inicial. A duração individual média dos pulsos do canal varia de 1 a 2 μs , com um tempo de frente da ordem de 0,1 μs , aparentemente mais rápidos que na ruptura inicial. O intervalo entre pulsos também é menor, entre 15 e 25 μs (Krider *et al.* 1977).

2.3.4 Processo de Conexão

A conexão do canal precursor ao solo ou objeto aterrado é um processo pouco estudado e que tem pouca documentação. Geralmente, considera-se que esse processo começa quando o canal precursor induz a criação de um canal ascendente a partir do solo ou, o que é mais comum, a partir da ponta de um objeto protuberante do relevo. É possível que dois ou mais canais ascendentes sejam criados.

O canal ascendente é o primeiro fenômeno que envolve correntes no solo. Já que seu crescimento também se dá por passos, cada um deles é associado com um surto de

corrente. Esses surtos já foram medidos na Estação do Morro do Cachimbo (Visacro *et al.* 2010) e podem chegar a alguns quiloampères. Suas características constituem um dos resultados discutidos em detalhes no capítulo quatro.

O encontro do canal precursor como um canal ascendente se dá através de um Salto Final. Esse salto pode ser visto com um fechamento de chave de circuito. Quando ocorre, são lançadas duas ondas de corrente do ponto de junção para os dois canais ionizados. Uma onda é ascendente, indo em direção a nuvem. Outra onda é descendente, indo em direção ao solo. A onda descendente rapidamente chega ao solo e resulta numa onda refletida ascendente. Essa onda refletida provavelmente se encontra com a onda ascendente original num ponto acima da junção, já que ela se move num canal condicionado por corrente, enquanto a onda original se move no canal precursor. Com a atenuação das ondas, elas se tornam uma só, se movendo em direção a nuvem. Não há consenso em se considerar essas ondas como parte do processo de conexão ou já parte da corrente de retorno.

A conexão ocorre tanto em primeiras descargas (ou únicas) quanto em subseqüentes. No primeiro caso, ocorre no ar não condicionado, enquanto no último, ocorre ainda no canal anterior, que está quase dissipado. Para primeiras descargas o canal ascendente apresenta algumas dezenas de metros, se parte do solo ou algumas centenas de metros, se iniciado em estruturas altas. Já para descargas subseqüentes, geralmente o canal apresenta menos de 10 m (Rakov e Uman 2003, Wang *et al.* 1999).

Os melhores registros de canais ascendentes são apresentados em fotos e filmagens óticas. Yokoyama *et al.* (1990) apresentam registros de filmes com seis canais em descargas naturais no Japão e Wang *et al.* (1999) reportaram um, mas para descargas induzidas por foguetes. Nesses trabalhos, o tamanho dos canais mostrados por Yokoyama *et al.* variou entre 25 e 150 m, esperado para primeiras descargas, enquanto no trabalho de Wang *et al.*, o canal apresentava apenas entre 7 m, adequado para descargas subseqüentes.

Já para fotografias estáticas, os registros de canais ascendentes são mais comuns. Quatro maneiras de identificar canais ascendentes são aceitas. A primeira é quando ocorre uma divisão no canal. A segunda, quando existem ramificações para cima na parte de baixo do canal e ramificações para baixo na parte de cima do canal. A terceira, quando há um canal ascendente não conectado. E a última, quando há uma mudança brusca na forma inferior do canal.

2.3.5 Corrente de Retorno

Dentre os processos envolvidos na formação de descargas atmosféricas, a corrente de retorno é o mais estudado. Isso se deve ao fato da corrente constituir a principal fonte dos danos causados pelas descargas e ao fato de que a variável envolvida no processo, a corrente na base do canal, é um parâmetro passível de medição.

O trabalho mais completo de caracterização dessa corrente é o realizado por Berger *et al.* (1975). Os dados desse trabalho foram gravados por osciloscópios ligados a resistores *shunts* instalados no topo de duas torres de 70 m situadas no Monte San Salvatore, em Lugano, na Suíça. O topo do monte fica a 915 m acima do nível do mar e a 640 m do Lago Lugano, que ficava em sua base. Devido a essa posição de destaque no terreno, a altura efetiva dessas torres era muito maior que a altura real, 350 m de acordo com Eriksson (1978). A maioria das descargas ali medidas era ascendente.

Os resultados aqui mostrados se referem apenas a descargas descendentes. Eles podem ser bem representados pelas curvas da figura 2.7.

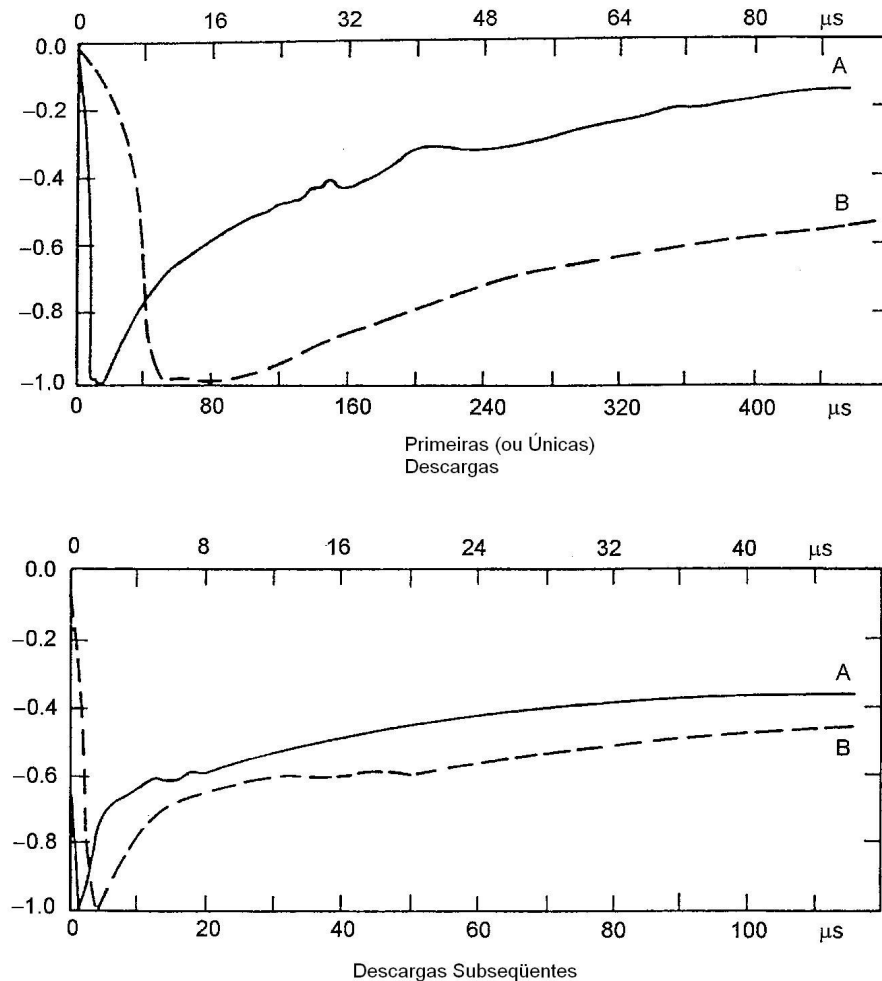


Fig. 2.7 - Formas de onda medianas para descargas negativas primeiras (ou únicas) e subseqüentes com duas escalas. As escalas abaixo correspondem às curvas A (sólidas). As escalas acima correspondem às curvas B (tracejadas). Adaptado de Berger *et al.* (1975).

Essa figura mostra as formas de onda medianas para as correntes de descargas primeiras e subseqüentes. As curvas apresentadas foram normalizadas. A duração total de uma descarga é de algumas centenas de microssegundos. A parte crescente da onda tem uma forma côncava característica, sendo a parte inicial mais lenta devido ao canal ascendente. Como essa onda mostra uma forma normalizada, não é mostrado o segundo pico de corrente comum em primeiras descargas e atribuído a ramificações por alguns autores (Weidman e Krider 1978). Visacro (2003) propôs uma forma de onda mais representativa de corrente individual de descargas negativas descendentes, que inclui picos subseqüentes, e de Conti e Visacro (2007) apresentam a formulação matemática para tal onda, utilizando Curvas de Heidler.

As formas de onda normalizadas não fornecem valores para utilização direta em projetos. Estatísticas desenvolvidas a partir dos dados de Berger que quantificam os parâmetros mais interessantes para a engenharia de proteção são apresentadas na tabela 2.2.

Tab. 2.2 - Parâmetros de descargas negativas descendentes. Adaptado de Berger *et al.* (1975).

Parâmetros	Unidades	Quantidade de Amostras	Porcentagem excedente ao valor da tabela		
			95%	50%	5%
<i>Pico de Corrente</i>	kA				
Descargas Primeiras		101	14	30	80
Descargas Subseqüentes		135	4,6	12	30
<i>Carga Total</i>	C				
Descargas Primeiras		93	1,1	5,2	24
Descargas Subseqüentes		122	0,2	1,4	11
Descarga Plena		94	1,3	7,5	40
<i>Carga Impulsiva</i>	C				
Descargas Primeiras		90	1,1	4,5	20
Descargas Subseqüentes		117	0,2	0,95	4
<i>Tempo de Frente</i>	μ s				
Descargas Primeiras		89	1,8	5,5	18
Descargas Subseqüentes		118	0,22	1,1	4,5
<i>Máximo di/dt</i>	kA/ μ s				
Descargas Primeiras		92	5,5	12	32
Descargas Subseqüentes		122	12	40	120
<i>Tempo de Meia-Onda</i>	μ s				
Descargas Primeiras		90	30	75	200
Descargas Subseqüentes		115	6,5	32	140
<i>Energia Específica $\int i(t)^2 dt$</i>	A ² s				
Descargas Primeiras		91	$6,0 \times 10^3$	$5,5 \times 10^4$	$5,5 \times 10^5$
Descargas Subseqüentes		88	$5,5 \times 10^2$	$6,0 \times 10^3$	$5,2 \times 10^4$
<i>Intervalo entre descargas</i>	ms	133	7	33	150
<i>Duração da Descarga Plena</i>	ms				
Todas		94	0,15	13	1100
Excluindo Descargas Únicas		39	31	180	900

Essa tabela mostra uma distribuição acumulativa estatística dos principais parâmetros de descargas atmosféricas. Essa distribuição apresenta três valores, o primeiro, o valor excedido em 95% dos casos, o segundo, valor excedido em 50% dos casos (chamado mediana) e o último, o valor excedido em apenas 5% dos casos. Sobre os parâmetros mostrados na tabela, algumas definições devem ser feitas. A Energia Específica representa a energia que seria dissipada por um resistor de 1 Ω se

a corrente de descarga fluísse por ele. Esse parâmetro é a base para uma aproximação do cálculo de aquecimento de materiais percorridos por essa corrente. Já o intervalo entre descargas deve ser encarado como um intervalo sem corrente, já que não é incluído o tempo de passagem da componente contínua.

Pode-se notar a partir dessa tabela que a mediana do pico de corrente das primeiras descargas é cerca de três vezes maior que o das descargas subseqüentes. Além disso, a carga é quase quatro vezes maior para primeiras correntes. Por outro lado, as correntes de descargas subseqüentes têm em média inclinação na frente de onda (máximo di/dt) entre três e quatro vezes maiores que as primeiras. Deve-se notar, também, que a maior taxa de crescimento da corrente dada nessa tabela é, provavelmente, subestimada, já que a taxa de amostragem dos osciloscópios era limitada e que o valor mínimo das correntes era de 2 kA, nível escolhido como limite para o disparo das medições. Anderson e Ericksson (1980) mostraram que a mediana do máximo di/dt se mantém para correntes subseqüentes, mas praticamente dobra de valor para primeiras.

Medições diretas de eventos naturais em torres também foram realizadas nos Estados Unidos, na Itália, na Rússia, na África do Sul, no Canadá, na Alemanha, no Japão, novamente na Suíça, na Áustria e no Brasil. A maioria desses estudos foi realizada em torres muito altas e, logo, as descargas foram, em sua maioria, ascendentes. Por esse motivo, apenas algumas dessas medições são discutidas nessa seção.

As medições feitas na África do Sul (Eriksson 1978) usavam transdutores de corrente (bobinas de Rogowski) na base de uma torre de 60 m de altura. Isso é um diferencial do trabalho, já que a grande maioria dos estudos é feita com sistemas de medição no topo da torre. Nesse trabalho, o valor da mediana do pico de corrente foi 41 kA para primeiras descargas, aproximadamente 35% maior que o correspondente medido na Suíça. Melander (1984) sugeriu que esta diferença decorreria de uma superestimação do valor de pico da corrente em medições na

base da torre devido às reflexões da onda. Entretanto, Visacro e Silveira (2005) mostraram que essa superestimação só ocorre para torres muito altas, com mais de 100 m de altura, o que não era o caso da África do Sul, ou para descargas com tempo de frente muito reduzido, valores menores que 0,1 μ s, os quais não são representativos de eventos reais. Neste quadro, ganha força a hipótese da variação regional da amplitude da corrente de descarga.

As medições no Brasil (Visacro *et al.* 2004) são realizadas na Estação do Morro do Cachimbo, que fica em Belo Horizonte, Minas Gerais. Nessa estação, integrada ao LRC, as medições são realizadas por duas bobinas de Pearson e um resistor *shunt* na base de uma torre de 60 m de altura. Os estudos estatísticos de correntes apontaram um valor de pico de corrente mediano de 45 kA para primeiras descargas (valor 50% maior que a mediana de Berger) e 16 kA para subseqüentes (valor 33% maior que a mediana de Berger). Como essa torre também é baixa, a explicação de Melander para a superestimação não funciona. Logo, esse é mais um fator que colabora com a hipótese da variação de intensidade das descargas em áreas mais quentes.

Vários estudos (Boyle e Orville 1976, Idone e Orville 1982 e Mach e Rust 1989) foram feitos sobre a velocidade de propagação da corrente de retorno. Para descargas naturais, os valores médios de velocidade são estimadas entre $0,7 \times 10^8$ e 2×10^8 m/s.

Uma parcela do conhecimento desenvolvido sobre a corrente de retorno foi inferida a partir dos campos eletromagnéticos irradiados por esta corrente e detectado por pontos a diferentes distâncias do local de incidência.

Curvas típicas para campo elétrico vertical e campo magnético horizontal devido à passagem de corrente a distâncias de 1 a 200 km foram publicadas por Lin *et al.* (1979) baseadas em várias medições feitas na Flórida, EUA e são apresentadas na figura 2.8.

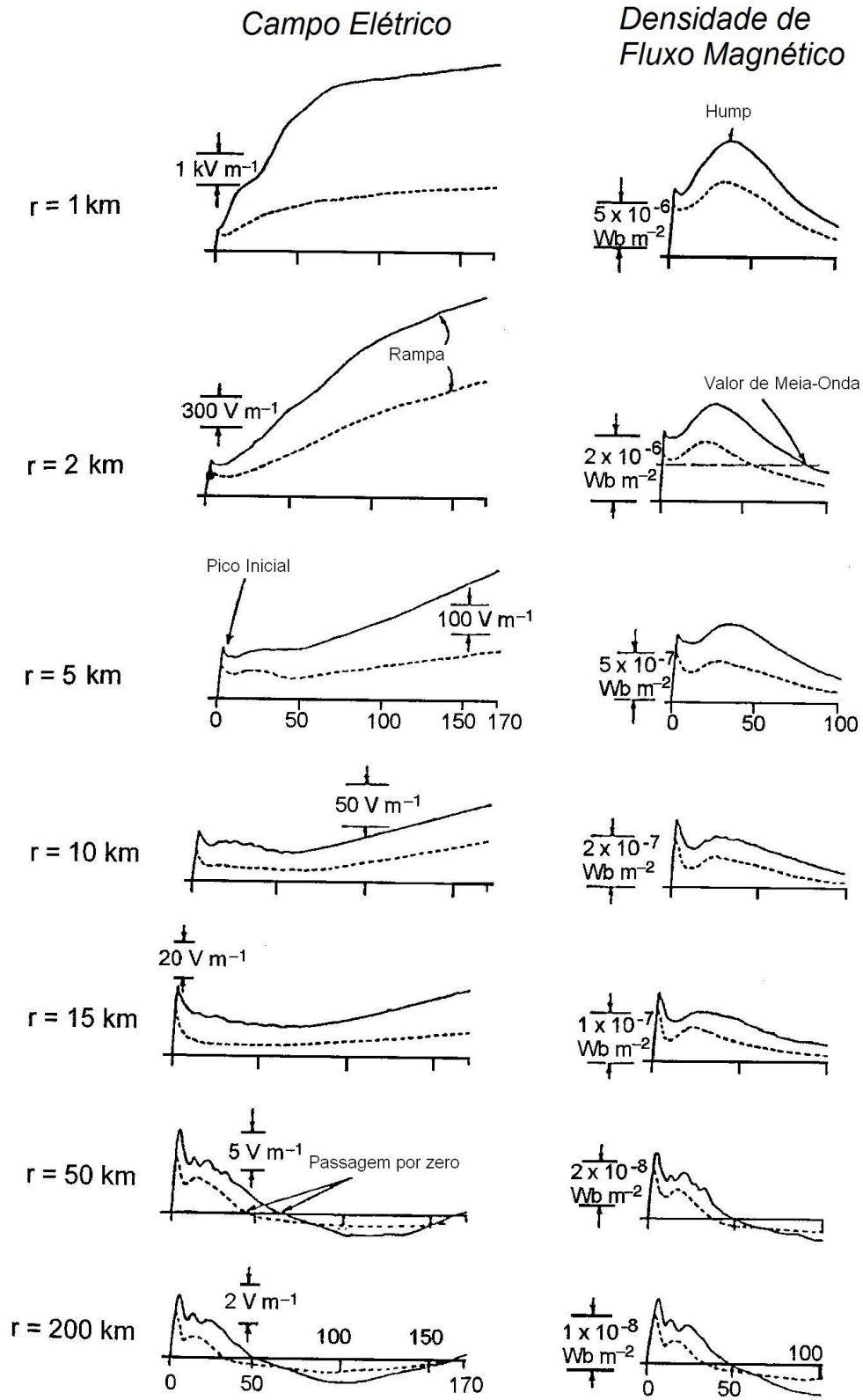


Fig. 2.8 – Formas de onda típicas para campo elétrico vertical e campo magnético azimutal associadas à passagem da corrente de retorno para diversas distâncias. Adaptado de Lin *et al.* (1979).

Os campos elétricos a poucos quilômetros do canal são dominados pela sua componente divergente (designada por alguns autores como eletrostática), única componente não nula após a passagem da corrente. Já os campos magnéticos são dominados pela componente de indução, a componente que produz as saliências em forma de corcova (termo empregado com tradução de *humps*) mostradas na figura. As componentes distantes de campo elétrico e magnético têm basicamente a mesma forma de onda e, usualmente, são bipolares. Nessa fase, a componente dominante de campo é a de irradiação. O pico inicial presente em todas as figuras de campo (apesar da difícil identificação para campos elétricos próximos) é devido à componente de indução.

Numa escala expandida de tempo, pode-se observar outro efeito da corrente de retorno no campo elétrico estático na atmosfera. Quando uma nuvem carregada se posiciona sobre um local, ela induz cargas no solo. Essa configuração cria um campo elétrico vertical aproximadamente uniforme. A cada descarga atmosférica responsável por anular uma parte da carga, ocorre uma mudança no valor de campo. Essa é uma variação brusca ilustrada na figura 2.9 para a observação de um caso medido a aproximadamente 9 km de distância do ponto de incidência.

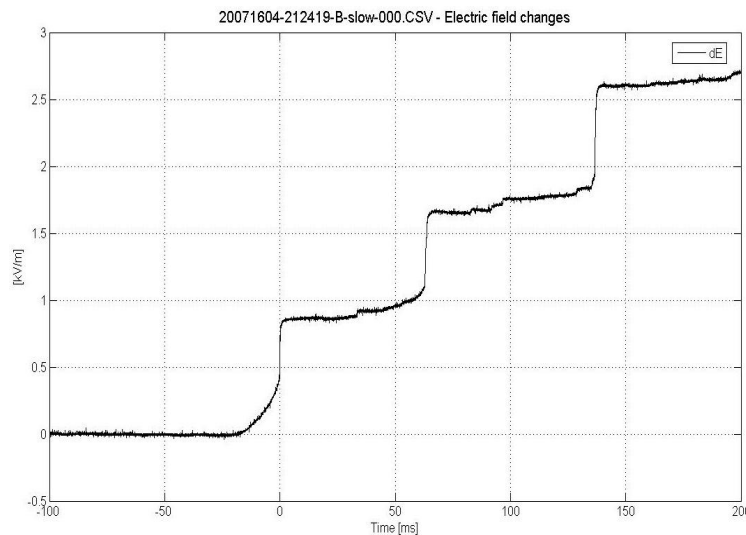


Fig. 2.9 – Forma de onda típica para campo elétrico associado à variação de carga da nuvem. Campo medido na Estação do Morro do Cachimbo, no dia 16/04/2007 distante aproximadamente 9 km do ponto de incidência.

Adaptado de Corrêa *et al.* (2007)

Essa mudança está geralmente associada a mudanças lentas no campo elétrico. A figura 2.9 apresenta três correntes de retorno, a primeira precedida pelo campo associado à aproximação do canal precursor ao solo.

2.3.6 Processo de Recarregamento do Canal

O processo de recarregamento do canal é o processo que inicia descargas subseqüentes. Na maioria das vezes, esse processo de recarregamento é do tipo direto. As cargas parecem se mover continuamente da nuvem até o solo. Outras vezes, a formação da descarga subseqüente requer a reconstituição da parcela inferior do canal para sua conexão ao solo e isto é feito por passos. Esses passos produzem pulsos de campo elétrico logo antes da corrente de retorno muito parecidos com os pulsos de campo associados ao canal precursor. E em poucas vezes, o processo de recarregamento é do tipo caótico, envolvendo pulsos irregulares de campo elétrico. Como o processo de recarregamento direto é o mais comum, ele é o primeiro abordado nessa seção.

A velocidade de propagação do processo de recarregamento direto fica, em média, entre 1×10^7 e 2×10^7 m/s (Idone e Orville 1982). Diferentemente do canal precursor, que aumenta de velocidade ao se aproximar do solo, o recarregamento pode aumentar ou diminuir de velocidade. Um estudo interessante feito por Jordan *et al.* (1992) relacionou a velocidade do processo de recarregamento com o pico de corrente da descarga sucessora e com o tamanho do intervalo antecessor. Existe uma boa correlação positiva entre a velocidade do processo e o pico da próxima corrente (quanto mais rápido o recarregamento, maior será a descarga seguinte). Já a outra correlação é negativa (quanto maior o intervalo, menor a velocidade de recarregamento), porém fraca. E não aparece para descargas induzidas ou ascendentes.

A duração total do processo depende do tamanho do canal, mas usualmente fica entre 0,5 e 2 ms (Rakov e Uman 1990a).

Idone e Orville (1985) estimaram a corrente de um processo de recarregamento direto por técnicas óticas e encontraram um valor médio variando entre 1,6 e 1,8 kA. As correntes variaram na faixa de 100 a 6000 A. Em Brook *et al.* (1962) reporta-se que a carga no canal sendo recarregado fica, na maioria das vezes, entre 0,5 e 1 C (valores próximos da mediana de Berger para carga de descarga subsequente).

O campo elétrico associado ao processo de recarregamento tem a forma típica indicada na figura 2.10.

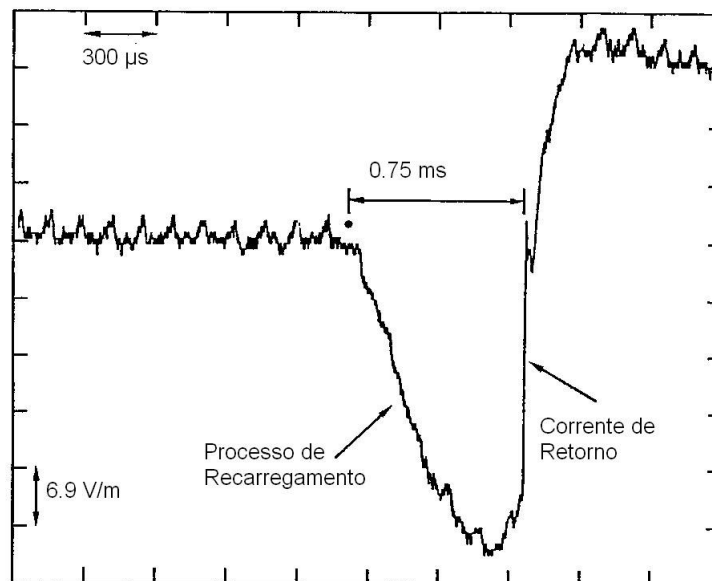


Fig. 2.10 - Exemplo da forma de onda do campo elétrico de uma descarga ocorrida na Flórida e medida a aproximadamente 7.6 km do ponto de incidência. O ponto marca o começo da mudança associada ao processo de recarregamento e o intervalo de tempo de 0.75 ms, a duração. Adaptado de Rakov e Uman (2003)

Pode-se notar que o campo apresenta uma forma de gancho. Diferentemente do canal precursor, cuja polaridade da variação no campo muda com a distância, o campo associado ao processo de recarregamento apresenta uma variação de campo com polaridade oposta à variação de campo associado à corrente de retorno em aproximadamente 90% dos casos, independente da distância (Rakov e Uman 1990a). Além disso, o campo associado ao processo de recarregamento é muito influenciado pela geometria do canal de descarga.

O processo de recarregamento por passos do canal de descarga é mais comum para segundas correntes de retorno. Estatisticamente, a chance do recarregamento por passos ocorrer para segundas descargas é cinco vezes maior que para todas subseqüentes de maior ordem (Rakov e Uman 1990b). Além disso, Davies (1999) apresentou estudo que diziam que segundas correntes iniciadas por recarregamento por passos eram precedidas por um intervalo típico de 61 μ s, valor próximo da mediana para todas subseqüentes (desconsiderando componente contínua), enquanto descargas de ordem maior iniciadas por recarregamento por passos eram precedidas por um intervalo típico de 140 μ s.

Segundo Schonland (1956) os passos do processo de recarregamento se aproximam do solo com velocidade entre 0,5 e 1,7 $\times 10^6$ m/s, valor próximo à velocidade do canal precursor próximo ao solo. O tamanho desses passos é próximo de 10 m e o intervalo entre eles é de aproximadamente 10 μ s, valores menores que os associados ao canal precursor. O processo de recarregamento por passos pode ter sua velocidade tanto aumentada quanto diminuída com a aproximação do solo. E os pulsos de campo associados com esses passos são essencialmente iguais aos pulsos de campo associados aos passos do canal precursor, discutidos anteriormente.

O processo de recarregamento caótico do canal foi inicialmente reportado por Weidman (1982) para explicar pulsos irregulares no campo elétrico anteriores à variação associada às descargas subseqüentes. Esse processo é raro e usualmente está associado a descargas subseqüentes de grande intensidade. Não há registros de corrente para esse fenômeno.

2.3.7 Componente Contínua da Corrente de Descarga

A componente contínua é definida como uma corrente de baixa intensidade (dezenas a centenas de Ampères) que segue imediatamente após uma corrente de retorno no mesmo canal para o solo e tipicamente, dura algo entre dezenas e centenas de milissegundos. Surtos de corrente durante esse processo, que duram poucos milissegundos, são chamados de componente-M e são comentados na seção posterior.

Devido à alta transferência de carga, a componente contínua é considerada responsável pelos danosos efeitos térmicos associados a descargas, como queima na superfície metálica de aeronaves, queima de cabos pára-raios em linha de transmissão (notoriamente em cabos OPGW), destruição em obras civis e incêndios em florestas.

É importante destacar que existem diferenças entre a componente contínua e a corrente de baixa intensidade e longa duração que antecede descargas ascendentes e induzidas por foguetes. Essa corrente é referida, em inglês, como *Continuous* (no lugar de *Continuing*) *Current*. Esta não está presente em descargas descendentes “naturais” e não é discutida nessa seção.

A maioria das publicações sobre componente contínua em descargas descendentes se refere à chamada componente contínua de longa duração. Esse termo foi definido por Kitagawa *et al.* (1962) e se aplica a correntes que duram, no mínimo, 40 ms. Logo, os dados apresentados nessa seção são sobre a componente de longa duração, a não ser quando especificado de outra maneira.

Também o estudo da componente contínua recorre à medição de campo elétrico. Kitagawa *et al.* (1962) e Brook *et al.* (1962) identificaram o campo elétrico característico associado à componente contínua, como indicado na figura 2.11.

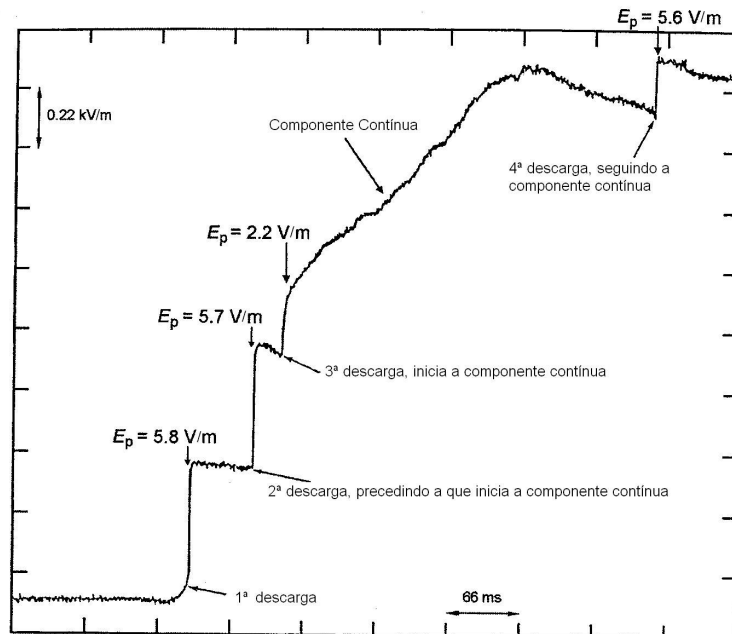


Fig. 2.11 – Exemplo da forma de onda do campo elétrico de uma descarga plena ocorrida na Flórida em 1979 e medida a aproximadamente 6,5 km do ponto de incidência. A componente contínua começa após a terceira descarga. Adaptado de Rakov e Uman (2003)

Nesta figura verifica-se o comportamento do campo associado ao fluxo da componente contínua após a terceira corrente de retorno. A característica é uma lenta, longa e significativa variação no campo elétrico, com a mesma polaridade da corrente de retorno precedente.

A maioria esmagadora de componentes contínuas é iniciada por descargas subsequentes no lugar de descargas únicas ou primeiras. Parece existir um padrão para a ocorrência dessa corrente:

- Primeiramente, ocorre uma descarga de grande intensidade.
- Essa descarga é seguida por um intervalo entre correntes de retorno pequeno.
- Após esse intervalo, ocorre uma descarga de baixa intensidade.
- Essa descarga de baixa intensidade inicia uma componente contínua.

Fischer *et al.* (1993) descobriu que componentes contínuas com mais de 10 ms de duração exibem uma variedade de formas que podem ser classificadas em quatro categorias, ilustradas na figura 2.12.

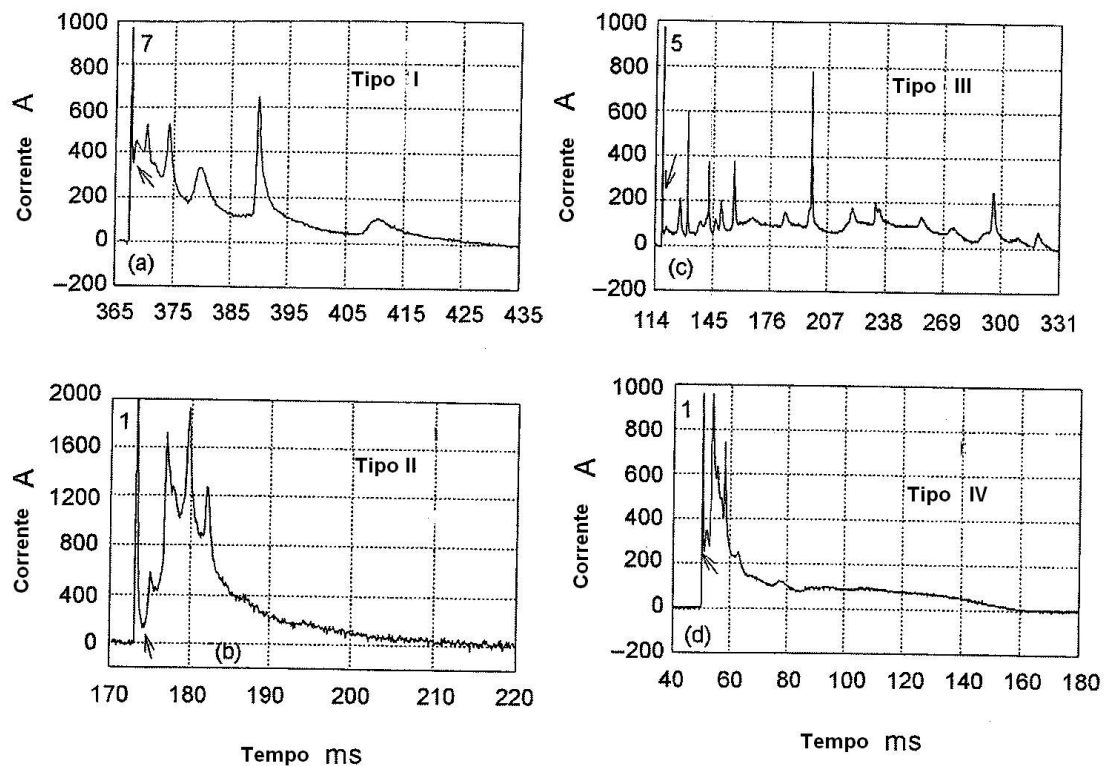


Fig. 2.12 - Exemplo dos quatro tipos de forma de onda de corrente da componente contínua. A seta indica o começo do processo e o número na parte superior indica a ordem da descarga. Adaptado de Rakov e Uman (2003)

O tipo I teria um decaimento exponencial com pulsos de corrente sobrepostos. O tipo II apresenta um *hump* com pulsos de corrente sobrepostos e decaimento suave. O tipo III apresenta um crescimento e decréscimo de corrente lentos, também com pulsos de corrente sobrepostos. O tipo IV apresenta um *hump* com pulsos de correntes sobrepostos seguido por um platô sem pulsos. Formas de onda do tipo I e II são as mais comuns.

Fischer *et al.* (1993) também percebeu que componentes contínuas com mais de 10 ms começam com um pulso de corrente característico de componente-M. Em Rakov *et al.* (1990) também comenta-se sobre esse padrão em figuras de campo elétrico.

A grande diferença entre uma corrente de retorno e a componente contínua é, aparentemente, a fonte da carga transferida ao solo por esses processos. Enquanto a corrente de retorno anula as cargas do canal de descarga, a componente contínua estaria associada com a captação de cargas no entorno do canal nas nuvens.

2.3.8 Componente-M

A componente-M é uma perturbação (ou surto) na relativa bem-comportada componente contínua e na luminosidade de seu canal. O “M” vem de D. J. Malan, o primeiro a estudar esse fenômeno. Provavelmente esse processo também ocorre durante a *Continuous Current* e se diferencia do processo de recarregamento do canal porque precisa de um canal conduzindo para ocorrer, não apenas resquícius de um canal.

A componente-M foi inicialmente identificada (Malan e Collins 1937) por aumentos momentâneos da luminosidade do canal pouco iluminado da componente contínua. Mas medições de corrente ocorreram apenas na década de 90. Thottappillil *et al.* (1995) mostraram alguns exemplos de corrente para descargas induzidas, como indicadas na figuras 2.13 e 2.14.

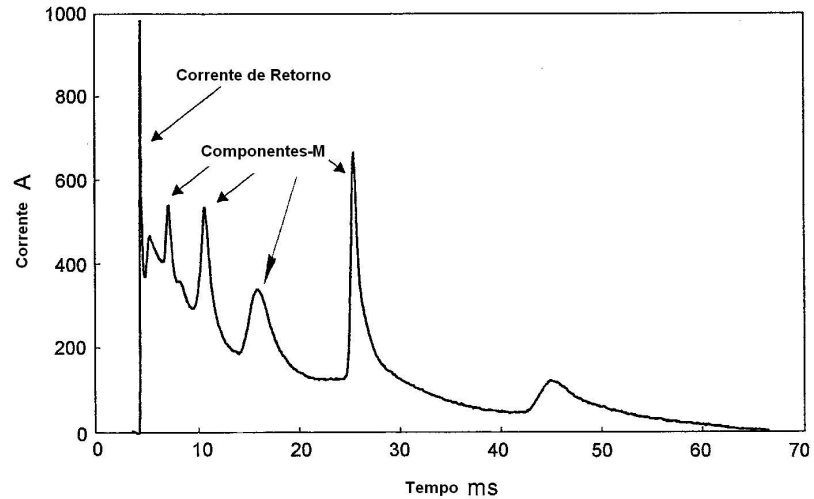


Fig. 2.13 - Descarga atmosférica (grampeada em 1000 A) seguida por várias componentes-M. Adaptado de Rakov e Uman (2003)

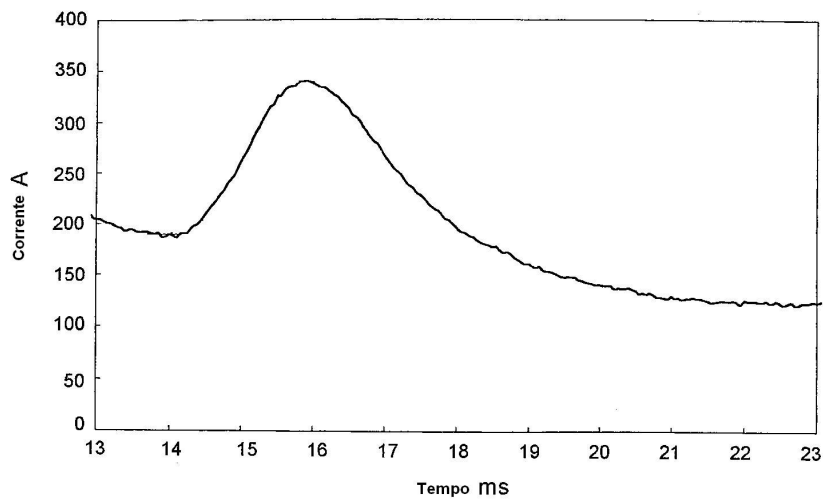


Fig. 2.14 - Zoom em uma das componentes-M da descarga anterior. Adaptado de Rakov e Uman (2003)

Os pulsos de corrente da componente-M são caracterizados por amplitude média entre 100 e 200 A (mas podem chegar a quiloampères), tempo de subida (10-90%) médio entre 300 e 500 μ s e carga média entre 0,1 e 0,2 C. A tabela 2.3 a seguir, baseada no estudo de Thottappillil *et al.* (1995), sumariza essas e outras características importantes.

Tab. 2.3 - Parâmetros de Componentes-M. Adaptado de Thottappillil et al. (1995)

Parâmetros	Quantidade de Amostras	Porcentagem excedente ao valor da tabela		
		95%	50%	5%
Amplitude, A	124	20	121	757
Tempo de Frente, μs	124	102	415	1785
Duração, ms	114	0,6	2	7,6
Tempo de Meia-Onda, μs	113	192	800	3580
Carga Total, mC	104	33	131	377
Nível da Componente Contínua, A	140	34	183	991
Intervalo entre Componentes-M, ms	107	0,8	4.9	23

Componentes-M só foram observadas em canais com corrente de fundo (da componente contínua) superior a 20 A. O primeiro pulso ocorre na esmagadora maioria das vezes antes de 4 ms após o término da corrente de retorno. As características elétricas (pico de corrente e carga transferida) dos pulsos não apresentam dependência do nível de corrente da componente contínua ou da forma de onda do pulso.

O perfil típico de campo elétrico associado à componente-M pode ser visto na figura 2.15, que apresenta o campo associado a quatro componentes-M.

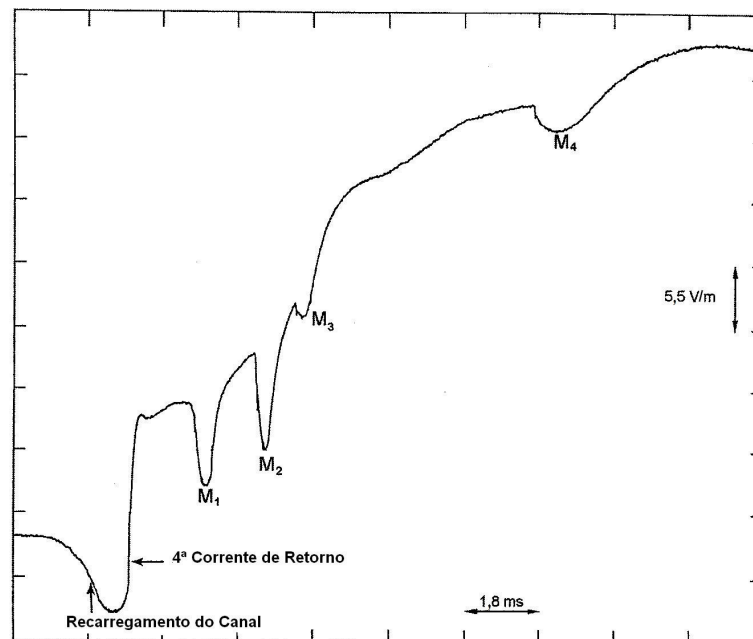


Fig. 2.15 - Exemplo da forma de onda do campo elétrico de uma descarga ocorrida na Flórida e medida a aproximadamente 5 km do ponto de incidência. As formas de onda das componentes-M ocorrem durante a componente contínua e seguem a 4ª corrente de retorno. Adaptado de Rakov e Uman (2003)

Ele apresenta uma característica forma de gancho. O tempo de duração médio desses ganchos é de 0,9 ms e o intervalo médio entre eles é de 2,1 ms. A maioria desses pulsos ocorre durante componentes contínuas com duração menor que 40 ms.

2.3.9 Processos-J e -K

O processo-J (“J” de junção) ocorre dentro da nuvem durante o intervalo entre descargas. Ele é identificado por uma mudança regular de campo elétrico que dura algumas dezenas de milissegundos. Essa mudança pode apresentar polaridade igual ou oposta à mudança associada à corrente de retorno. No primeiro caso, essa mudança é geralmente menor que a associada à componente contínua e não é associada a nenhum canal luminoso ligando a nuvem ao solo.

Processos-K são mudanças rápidas no campo elétrico que ocorrem sobrepostas à mudança associada ao processo-J. O “K” pode vir tanto de N. Kitanawa e M. Kobayashi, os primeiros a estudar o fenômeno, quanto de *kleine*, que significa pequeno em alemão. Uma curva com a assinatura de campo dos dois processos pode ser vista na figura 2.16.

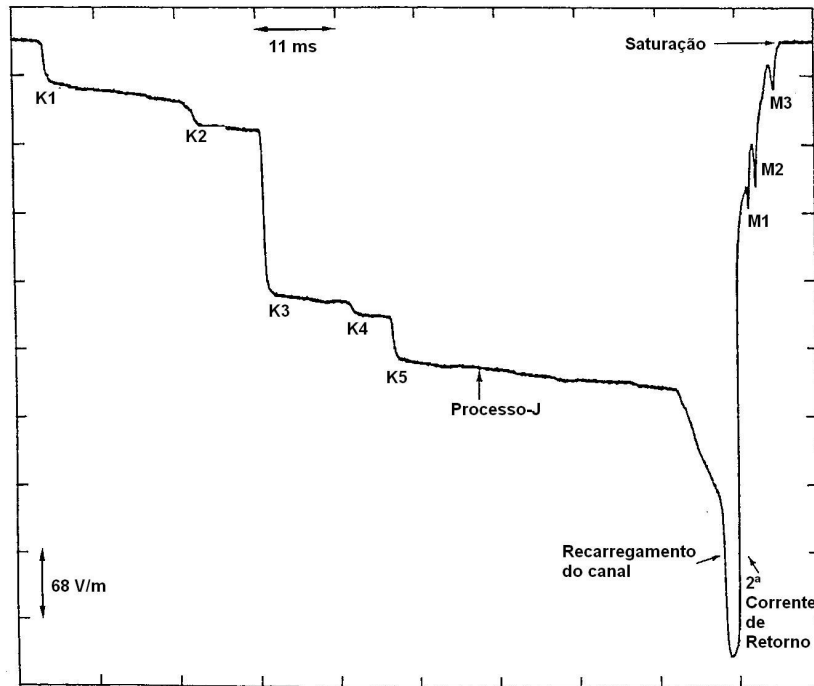


Fig. 2.16 – Exemplo da forma de onda do campo elétrico de uma descarga ocorrida na Flórida em 1979 e medida a aproximadamente 2.5 km do ponto de incidência. Há cinco formas de onda acentuadas associadas a processos-K sobrepostas a um processo-J. Além disso, há um processo de carregamento e uma corrente de retorno que é seguida por componente contínua e três componentes-M. Adaptado de Rakov e Uman (2003)

A polaridade da mudança de campo associada ao processo-J é geralmente negativa (polaridade oposta à corrente de retorno) para pequenas distâncias e pode ser tanto positiva quanto negativa para distâncias maiores que 5 km. Além disso, essa polaridade pode mudar dentro de uma mesma descarga plena. Isso ocorre para descargas a distâncias intermediárias.

A partir de campos elétricos medidos a várias distâncias, Krehbiel *et al.* (1979) deduziram que o processo-J move carga negativa em direção ao topo do canal da descarga anterior segundo percursos aproximadamente horizontais, mas não de uma maneira que pode ser chamada de junção, já que essa carga não está necessariamente envolvida com a próxima descarga. Além disso, a mudança de campo associada à corrente de retorno parece estar sobreposta à mudança de campo associada com o processo-J como se fosse independente, o que implicaria que o acoplamento desses processos não seja forte.

Aparentemente o processo-J envolve a criação de novas ramificações do canal dentro da nuvem, aumentando sua extensão e levando novas cargas a ele.

Existe uma controvérsia considerável na literatura com relação à definição do processo-K. Nessa seção, são apresentadas três definições diferentes.

A primeira definição foi utilizada por Thottappillil *et al.* (1990) e Rakov *et al.* (1996). Ela identifica o processo-K com mudanças de campo elétrico do tipo degrau (ou rampa) que ocorrem durante o intervalo entre descargas ou depois da última e apresentam um tempo de subida (10-90%) de 3 ms ou menos. Essa definição é, provavelmente, direcionada para grandes eventos.

A segunda definição foi utilizada por Kitagawa e Brook (1960). Ela identifica o processo-K com mudanças de campo elétrico do tipo pulso que ocorrem durante o intervalo entre descargas e depois da última e são medidas por um sistema de ganho alto e baixa constante de tempo. Esses pulsos são os mesmos degraus da primeira definição, mas distorcidos pelo sistema de medição. Além disso, como o sistema de medição apresentava ganho alto, essa definição é direcionada para eventos menores.

A última definição foi utilizada por Rhodes e Krehbiel (1989), Mazur *et al.* (1995) e Shao *et al.* (1995). Ela define o processo-K como processos que ocorrem entre descargas e depois da última que não podem ser associados a nenhum outro processo conhecido. Porém, quando esse processo move cargas em direção ao solo, ele é, na verdade, uma tentativa de recarregamento do canal (aqui utilizado como tradução do termo em inglês *attempted leader*). Provavelmente, com essa definição, os processos identificados pela primeira definição seriam classificados como tentativa de recarregamento.

De acordo com Rakov e Uman (2003) inicialmente, o processo-K era visto como um recuo quando o canal de descarga prolongado pelo processo-J encontrava um centro de carga com polaridade oposta. Porém, imagens em VHF mostram que, aparentemente, dentro da

nuvem o processo-K se comporta como o processo de recarregamento, mas sem transferir carga ao solo. Logo, a maioria dos processos-K pode mesmo ser vista como uma tentativa de recarregamento do canal.

3 Apresentação dos Sistemas de Medição Desenvolvidos

3.1 *Introdução*

Os sistemas de medição de corrente desenvolvidos durante esse trabalho, o sistema de registro de correntes de descargas incidentes em um trecho de linha de transmissão experimental e o sistema para registro de correntes incidentes na torre do Morro do Cachimbo, são descritos nesse capítulo. Apresenta-se inicialmente uma visão geral dos sistemas antecedendo seu detalhamento.

3.2 *O Sistema de Medição instalado na Linha de Transmissão*

3.2.1 *Visão Geral*

Para avaliar-se o processo de incidência de descargas atmosféricas em cabos de linha de transmissão e a distribuição de correntes e esforços (maiores informações sobre o assunto são encontradas em Soares 2001, de Conti 2006, Dias 2006, Silveira 2006, Soares *et al.* 2005, Silveira e Visacro 2009 e Silveira *et al.* 2005), definiu-se a instalação de um trecho de linha de transmissão experimental em escala real, contando com três torres de madeira, um cabo pára-raios OPGW e um cabo fase desenergizado.

A torre central serve de suporte para o condutor superior (cabo pára-raios) e como ponto de conexão ao aterramento do condutor inferior (cabo fase) através de uma descida. Este é

o único ponto de aterramento deste condutor, que é aberto nas extremidades.

O condutor superior também apresenta apenas um ponto de ligação com o solo, em uma das torres nas extremidades. Nessa torre estão instalados os dispositivos para medição e registro de eventos.

As correntes de eventuais descargas ao fluírem pelo condutor de descida da torre instrumentada sensibilizam transdutores para medição integral das ondas de corrente. Essas ondas são registradas por dispositivos colocados em abrigo construído junto ao local de medição.

Os sensores de corrente constituem-se em duas bobinas de Pearson, escolhidas com sensibilidade e faixa de excursão de sinal diferentes.

O registro dos dados é feito por uma placa de aquisição ligada a um computador. A placa da *National Instruments* permite frequência de amostragem de até 20 MS/s. A interface dessa placa com o computador foi programada no LRC durante o desenvolvimento desse projeto, a partir do software *LabVIEW*, também produzido pela *National Instruments*.

A alimentação desse computador é feita por três baterias ligadas a um inversor de potência. Para a economia de energia foi desenvolvida uma placa de circuito que tem o objetivo de ativar o sistema de medição apenas quando o campo elétrico estático do ambiente ultrapassa 2 kV/m. Esse campo é medido por um sensor constituído por uma agulha de coroa.

Para minimizar a interferência eletromagnética causada pelos campos gerados pela corrente de descarga, os componentes sensíveis do sistema, incluindo o computador, placa de aquisição e circuitos, foram acomodados dentro de abrigos blindados construídos durante esse trabalho.

Cada um desses elementos citados é considerado nas seções a seguir.

3.2.2 Local de instalação

A definição do local de instalação do trecho da linha de transmissão considerou aspectos tais como o amplo espaço livre necessário para uma construção de grande porte e a não existência de outras estruturas que pudessem influenciar na incidência de descargas. Foram também fundamentais os seguintes aspectos: elevado índice local de incidência de descargas atmosféricas, relevo em destaque e facilidade de acesso.

O local escolhido foi uma área nos arredores da Estação de Pesquisa em Descargas Atmosféricas do Morro do Cachimbo. Essa é uma região com alta incidência de descargas, o que foi comprovado por estudos utilizando o sistema de localização e detecção de descargas (LLS) de Minas Gerais (mais informações sobre o LLS são encontradas em Mesquita 2006, Mesquita 2001, Dias *et al.* 2006 e Mesquita *et. al* 2006). Dias (2006) mostra que, enquanto a densidades de descargas na região metropolitana de Belo Horizonte fica em torno de 3 descargas/km²/ano, a densidade em torno da estação do Morro do Cachimbo é próxima de 6,7 descargas/km²/ano, considerando dados entre 1999 e 2005.

A posição do trecho de linha foi definida no alto de um morro, indicado pela fotografia da figura 3.1 que mostra as três torres da linha de transmissão experimental.



Fig. 3.1 – Local exato da instalação da linha. As elipses destacam as posições das torres.

Além disso, a proximidade da linha com a Estação do Morro do Cachimbo constitui facilidade em decorrência dos recursos já existentes na Estação.

3.2.3 Trecho de Linha de Transmissão Experimental

O trecho de linha construído tem extensão de aproximadamente 400 m, dividido em dois vãos; um com aproximadamente 230 m e outro com aproximadamente 170 m. Uma das torres, a instrumentada, pode ser vista na figura 3.2.



Fig. 3.2 – Uma das torres da linha. Todas apresentam a mesma forma. O carro contribui para uma noção de tamanho.

Cada uma das três torres de madeira tem 30 m de altura, situando o cabo OPGW, instalado no topo, muito acima de qualquer outro elemento no terreno. A madeira foi escolhida como material estrutural da torre pelo seu caráter isolante, que previne que ela seja utilizada como percurso da corrente de eventuais descargas para o solo, garantindo que a corrente passe pelo sistema de medição.

Por motivo de segurança e prevenção de vandalismo, todas as torres apresentam um cercado metálico com altura aproximada de 2,5 m. Com isso, apenas pessoal autorizado tem acesso permitido. Além disso, esta cerca está ligada ao aterramento do sistema de medição, o que ajuda na equalização do potencial no solo dentro do cercado no caso de eventual elevação deste em decorrência do fluxo de corrente associado à descarga pelo

aterramento da torre, aumentando a segurança do pessoal presente durante alguma ocorrência.

No que concerne a configuração dos condutores, o cabo correspondente a fase está a 25 m de altura ligado nas três torres. Sua única ligação ao solo, que tem o objetivo de assegurar que o referencial do potencial do condutor seja a terra, se dá na torre central. Tal aspecto pode ensejar, em alguns casos, a ruptura do ar entre condutor superior e o inferior na eventual incidência de descarga no primeiro. Esse tipo de ocorrência pode ser de interesse para os objetivos das medições.

O cabo OPGW se encontra no topo das três torres, a 30 m de altura. Ele apresenta também uma única ligação para o solo, na torre equipada com o sistema de medição e registro de corrente. Essa torre fica em uma das extremidades. Decidiu-se por manter o condutor aberto numa das torres nas extremidades porque essa configuração implica na reflexão total da onda de corrente associada a um possível evento quando esta encontra o circuito aberto. Com isso, a onda refletida também escoará para a terra pela torre instrumentada, mas com algum atraso em relação à primeira onda incidente. A medição desse tempo de atraso permite a definição do ponto de incidência da descarga na linha de transmissão.

3.2.4 Abrigo

Duas situações levaram à necessidade da construção do abrigo do sistema. Primeiro, o sistema de medição e registro envolve equipamentos eletrônicos muito sensíveis, como a placa de aquisição de dados e o computador. Segundo, a passagem da corrente de descarga atmosférica gera campos eletromagnéticos de alta intensidade, capazes de causar interferência e até queima desses componentes. E esse panorama é ainda pior quando se leva em conta a proximidade entre o sistema de registro e o condutor de descida. Logo, é realmente necessária a construção de um abrigo blindado para o sistema de medição.

Para resolver a questão, o sistema de registro de onda e o sistema de alimentação foram instalados dentro de dois cilindros metálicos de alumínio como indicado na figura 3.3.





Fig. 3.3 – Imagens do abrigo do sistema de medição. A primeira mostra o abrigo completo, a segunda, a parte inferior e a terceira, a parte superior.

3.2.5 Transdutores de Corrente

Transdutores de corrente são equipamentos que transformam uma corrente em outro tipo de sinal, geralmente tensão, com esse sinal permitindo a medição do valor da corrente. No caso do sistema ligado à linha de transmissão, os transdutores são duas Bobinas de Pearson, escolhidas para medições de partes diferentes da onda de corrente.

Bobinas de Pearson apresentam um funcionamento semelhante a um transformador de corrente, mas com núcleo feito com um material não-magnético. Com isso, ela suporta altos níveis de corrente. Sua operação específica, porém, é segredo do fabricante.

A primeira bobina suporta uma corrente máxima de 200 kA, valor bem superior que o pico mediano de correntes negativas descendentes medido no Brasil (45 kA). Esta bobina apresenta uma sensibilidade de 5 mV/A e consegue discernir bem tempos de frente da ordem de até 0,25 μ s. Apenas poucas correntes subseqüentes, geralmente de baixa

intensidade, possuem tempo de frente mais curto. Essa bobina tem como objetivo a medição da parte impulsiva da onda e suas altas correntes.

A segunda bobina suporta um valor de pico menor de corrente, apenas 50 kA, mas apresenta uma sensibilidade maior, 0,01 V/A e consegue discernir um tempo de frente menor, de apenas 100 ns. Além dessas características, ela apresenta uma faixa de passagem entre 0,25 Hz e 4 MHz. Com tudo isso, esse transdutor tem como objetivo a medição de fenômenos de baixa intensidade, desde os rápidos, como pulsos de canal ascendente, até os lentos, como a componente contínua.

As bobinas podem ser vistas na figura 3.4.



Fig. 3.4 – Bobinas de Pearson instaladas no local.

3.2.6 *Sistemas de Proteção, Aquisição e Registro*

Os transdutores de corrente estão ligados a um sistema para registro da onda. Esse sistema é composto por um computador e uma placa de aquisição de dados. Por serem equipamentos muito sensíveis, estes requerem uma proteção contra surtos elétricos.

Esse sistema de proteção foi dimensionado considerando o fluxo de uma corrente máxima de 10 kA na bobina de maior sensibilidade, o que implica numa tensão máxima de 100 V em sua saída. Para a outra bobina considerou-se o fluxo de corrente máxima de 150 kA, o que implica tensão de saída de 750 V. Como a tensão máxima suportada pela placa de aquisição é 5 V, foi requerida a conformação dos sinais de saída das bobinas.

A proteção começa com supressores de surto com modelos diferentes para cada bobina. Para a bobina de maior sensibilidade, foram utilizados quatro supressores de atuação bidirecional em torno de 100 V, além de muito rápidos e de suportar potências de até 1500 W. Para a bobina de menor sensibilidade, foram utilizados quatro conjuntos de três supressores conectados em série, ligados em paralelo. A tensão de atuação é de 750 V. Na saída dos supressores, robustos divisores resistivos de tensão diminuem a amplitude da onda que chega à placa em 20 vezes para a bobina de maior sensibilidade e em 200 vezes para a de menor sensibilidade. A última etapa do sistema de proteção é composta novamente por supressores de surto, dessa vez com atuação em 5 V.

A placa de aquisição de dados é do modelo NI PCI-5102, da *National Instruments*, que pode ser vista na figura 3.5. Ela apresenta dois canais com aquisição simultânea de até 20 MS/s, que permite visualizações de até 50 ns. Apesar de não possuir uma memória interna muito grande, ela permite a transferência de até 32 milhões de amostras para a memória RAM do computador, o que permite pelo menos 0,8 s de aquisição em cada canal com taxa máxima de amostragem, ou mais com taxas menores.



Fig. 3.5 – Placa de aquisição igual à utilizada no projeto

A interface dessa placa com o computador foi desenvolvida durante esse projeto a partir do *software LabView* da *National Instruments*. Esse *software* apresenta uma linguagem de programação de altíssimo nível, permitindo desenvolvimento de programas a partir de encadeamento de caixas, cada uma contendo um programa menor.

O programa desenvolvido para essa aplicação pode ser visto na figura 3.6. Suas partes foram numeradas para ajudar na explicação.

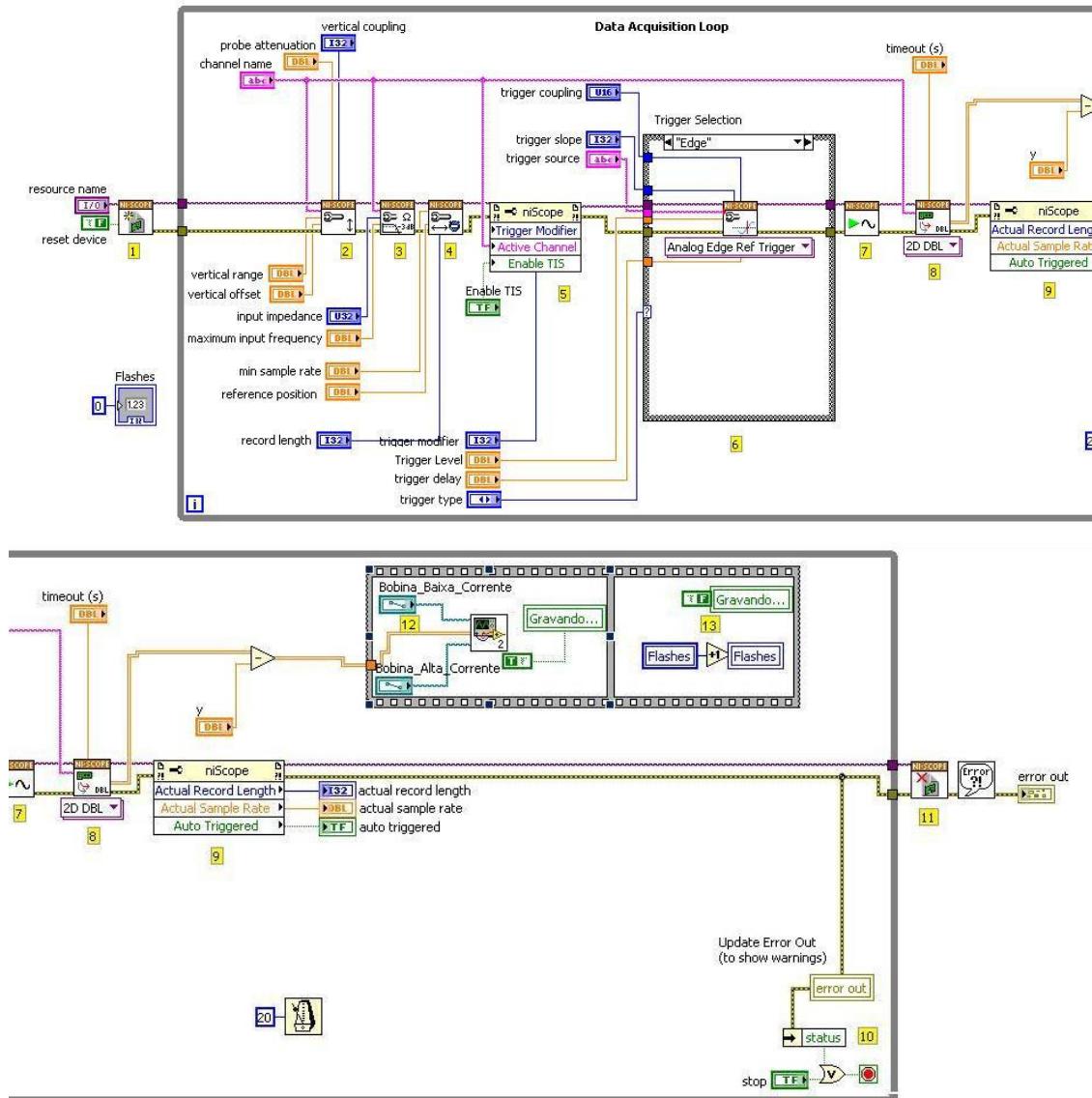


Fig. 3.6 – Janela que mostra o “loop” de aquisição de dados no *LabView*. Imagem partida para melhor visualização.

A primeira parte (numerada de 1 a 5) faz a configuração da placa, definindo parâmetros como faixa de passagem, impedância de entrada, taxa de amostragem, nível DC e acoplamento.

A segunda parte (número 6) define o tipo de disparo. A configuração mais usual é *edge*, que dispara a aquisição quando o nível do sinal ultrapassa determinado valor, mas o

utilizado no programa é do tipo *window*, que dispara a aquisição para quando o nível do sinal está maior que um valor ou menor que outro, ou seja, fora de uma janela.

A terceira parte (do número 7 ao 9) faz a aquisição do sinal medido. A aquisição funciona com a configuração *pre-trigger*, em que se faz a aquisição do sinal a partir de um tempo anterior ao disparo, no caso 100 ms. Essa parte só funciona se ocorrer um disparo.

A quarta parte (10 e 11) faz uma avaliação de erro no programa e também controla o encerramento de operação. Esse encerramento pode ser comandado pelo usuário ou pela avaliação de erro.

A última parte (12 e 13) faz a gravação dos dados adquiridos no disco rígido do computador. Depois da gravação dos dados, o programa volta à espera de um sinal para aquisição.

A interface desse programa com o usuário é muito simples e é mostrada na figura 3.7. Ela permite a configuração dos parâmetros: pasta em que os dados serão salvos, taxa de aquisição, número de amostras a ser salvo (o que determina o tempo de aquisição) e o nível de disparo. Além disso, apresenta um contador de *flashes* salvos, um pequeno mostrador que avisa se a terceira (aquisição) ou quinta (gravação) parte está em funcionamento e um botão que permite a interrupção do programa a qualquer momento.

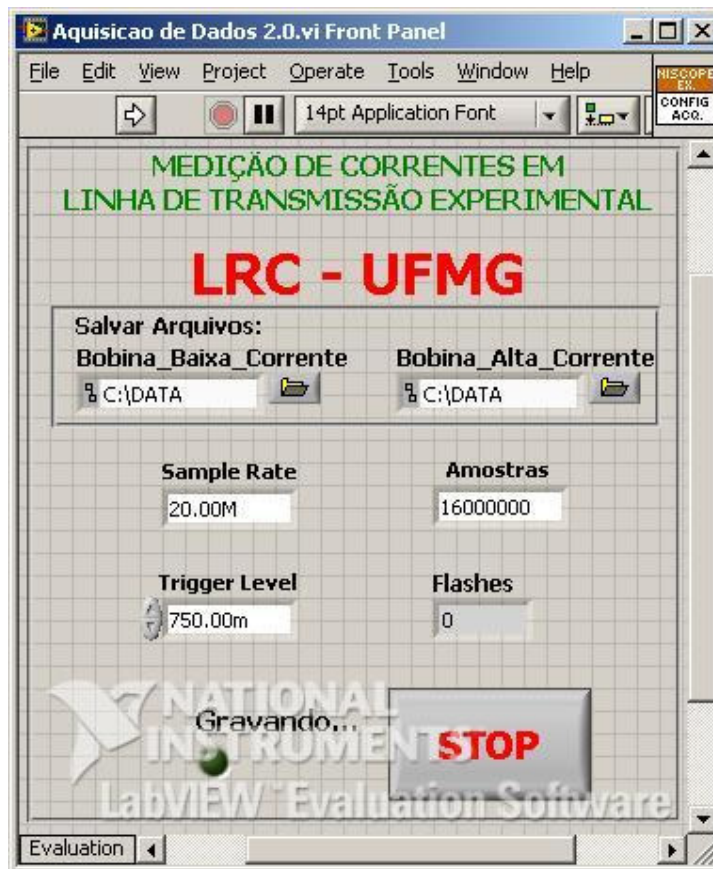


Fig. 3.7 – Interface do programa com o usuário.

O computador para essa aplicação deve ter características especiais de memória, processamento e robustez. Como a aquisição de dados envolve muita troca de informação da memória RAM, ela deve ser bem desenvolvida. O *software* exige certo nível de processamento. A placa requer um barramento tipo PCI. Além disso, como ele fica instalado dentro de um abrigo metálico de dimensões reduzidas que está exposto às intempéries naturais, há restrições de dimensão do gabinete, que requer ambiente bem ventilado.

Foi utilizado um computador com processador E7300 2,66 GHz Core 2 Duo e 4 GB de memória RAM DDR2 com características especiais de refrigeração. Seu gabinete pode ser visto na figura 3.8.



Fig. 3.8 – Gabinete do computador utilizado no projeto.

3.2.7 Sistemas de Alimentação e Acionamento

Por ficar muito perto de um ponto de incidência de corrente de descarga atmosférica, a alimentação do computador também deve permanecer dentro de um abrigo blindado. Como o abrigo superior está ocupado pelo computador, o inferior foi utilizado como abrigo para esse sistema de alimentação. Além disso, é útil que esse sistema seja isolado da rede elétrica, já que essa também é fonte de surtos elétricos.

Optou-se por um inversor alimentado por um banco de baterias, com a intenção de conseguir a maior auto-suficiência. Esse banco é composto por três baterias de 100 Ah, e foi utilizado um inversor de 600 W. Essas baterias são trocadas periodicamente para manter o sistema em funcionamento. A figura 3.9 permite a visualização desse sistema instalado no local.



Fig. 3.9 – Baterias e inversor instalados no local.

O projeto definiu que o conjunto fosse capaz de assegurar a operação ininterrupta do sistema por 36 horas. Nesse projeto, o computador opera apenas quando existir tempestade próxima. Isso implicou a construção do sistema de ativação, composto por um sensor de campo elétrico e de um circuito de ativação.

O sensor escolhido para a ativação do sistema de medição foi uma agulha de corona, que consiste num pequeno bastão de tungstênio cuja ponta foi amolada até apresentar um raio menor que $10\ \mu\text{m}$. Essa ponta finíssima consegue aumentar o campo elétrico na sua extremidade a ponto de produzir uma pequena corrente de corona para campos elétricos ao nível do solo típicos da proximidade de tempestades. Essa corrente passa por um resistor causando uma queda de tensão que dispara a ativação do sistema quando o campo elétrico ambiente estiver em torno de $2\ \text{kV/m}$ ao nível do solo. A vantagem desse sensor é que ele não consome energia, como sensores eletrônicos, nem gera altas correntes por estar perto da passagem da corrente de descarga, como sensores magnéticos. Imagens desse sensor podem ser vistas na figura 3.10.

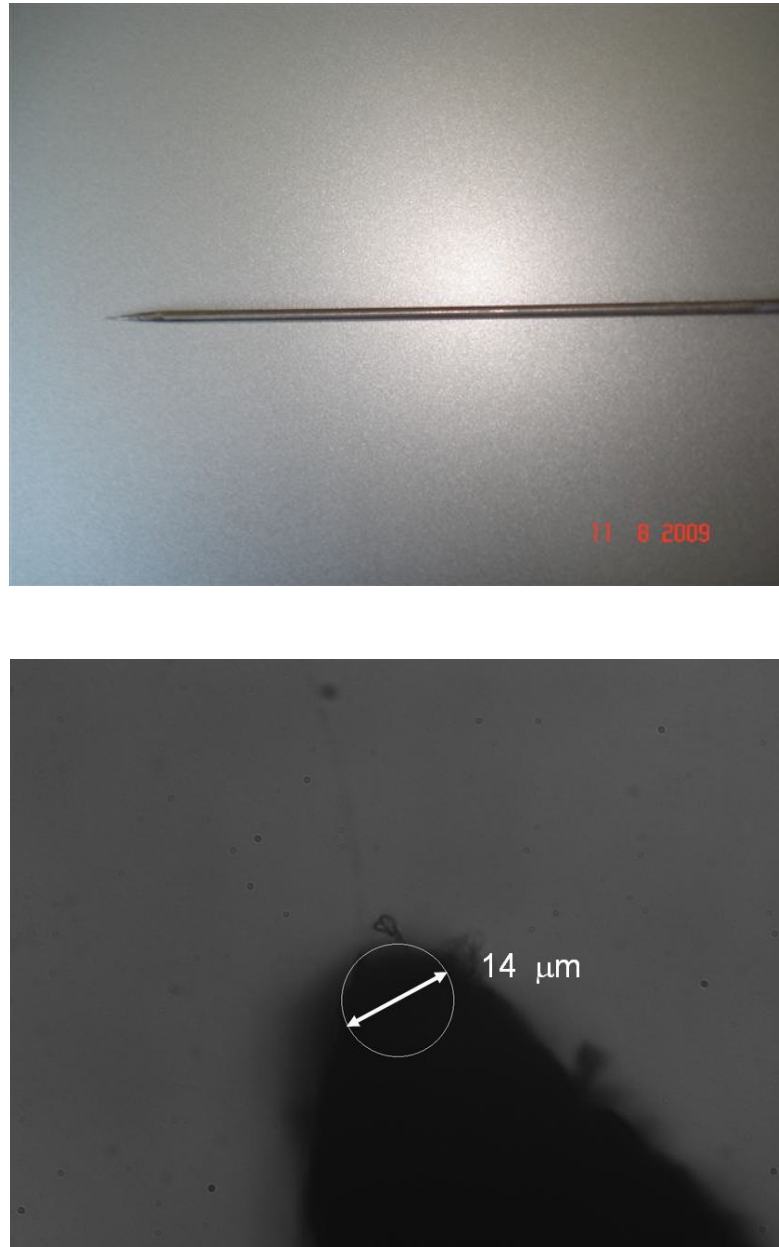


Fig. 3.10 – Imagens da Agulha de Corona. A primeira mostra toda a agulha e a segunda, um detalhe da ponta utilizando um microscópio eletrônico.

Para ativar o computador, foi desenvolvido um circuito específico, cujo esquema pode ser visto na figura 3.11.

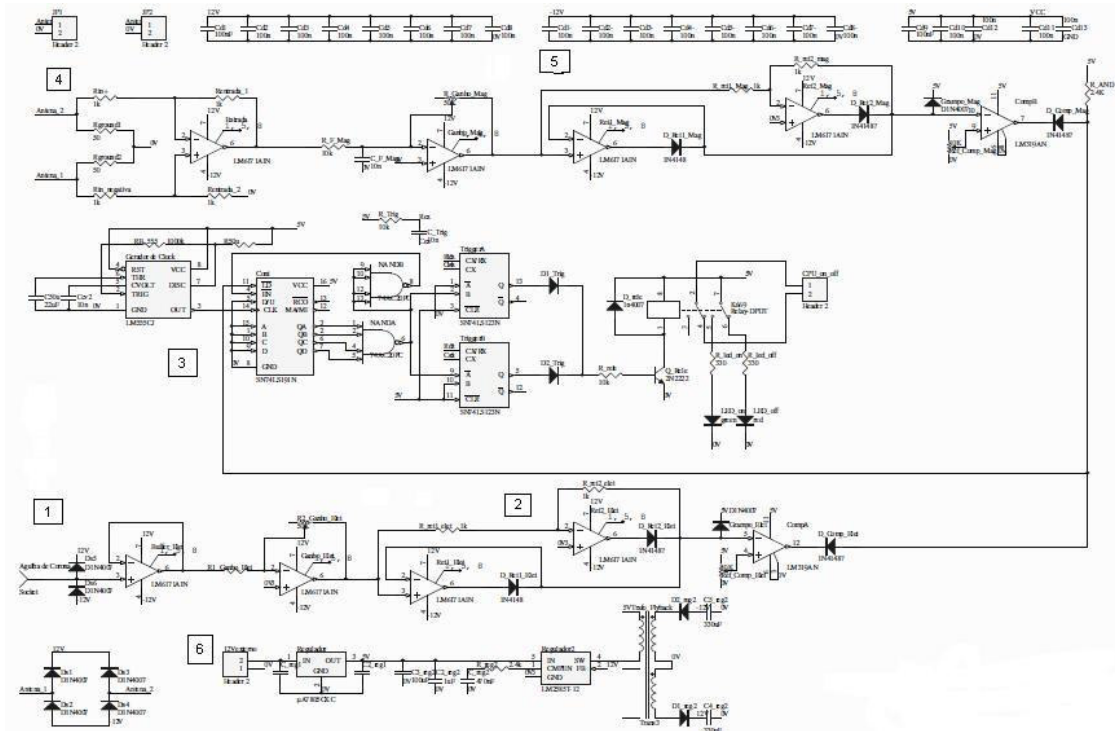


Fig. 3.11 – Diagrama esquemático do circuito

A placa foi desenvolvida com entrada para dois sensores: a agulha de coroa e uma antena para detecção de campo magnético. Sempre que a condição de tempestade próxima é verificada, a placa comanda a energização do computador e, através de verificações periódicas, o mantém ligado enquanto essa condição permanecer.

A instalação de um sensor tipo antena de detecção de campo magnético foi descartada devido à proximidade do sensor em relação ao percurso de corrente de descarga, que poderia constituir fonte de solicitações eletromagnéticas intensas no sistema de medição.

3.3 O Sistema de Medição instalado no Morro do Cachimbo

3.3.1 A Estação do Morro do Cachimbo

A concepção da Estação do Morro do Cachimbo foi uma consequência do interesse da CEMIG¹ em estudos sobre descargas atmosféricas no estado de Minas Gerais, iniciada na década de 70. Nesse período, já se havia chegado à conclusão da importância do tema, sendo ele um dos principais motivos de prejuízos, e se mostrava necessário a existência de dados regionais. O primeiro passo nessa pesquisa foi o levantamento do índice cerâmico no estado. Depois, utilizou-se de uma rede de contadores de descarga para levantamento da densidade de descargas por área. O passo seguinte era levantar valores de referência para a corrente e campo.

Com isso, em 1985 foi construída nos arredores de Belo Horizonte a primeira estação de pesquisa em descargas atmosféricas na América Latina. Seu projeto original foi desenvolvido por Ericksson, que já havia trabalhado na construção da estação na África do Sul. Uma torre metálica em forma de mastro de 60 m da altura foi construída e um sistema de medição foi instalado para registro de corrente.

Sua primeira configuração era composta por duas câmeras para aquisição de imagens, um contador de descarga modificado, um sensor eletrônico de campo elétrico e, na base da torre, dois transdutores de corrente. Os sinais medidos eram levados a um abrigo blindado onde ocorria o registro em osciloscópios. Os sistemas de registro eram ativados pelo contador ou sensor de campo quando ocorria alguma descarga próxima.

Anos mais tarde, em 1998, a estação foi transferida para o LRC e um processo de modernização dos equipamentos foi iniciado. Nesse contexto se coloca o novo sistema de medição do corrente descrito na próxima seção.

¹ CEMIG – Companhia Energética do Estado de Minas Gerais

Outros sistemas de medição já instalados na Estação são descritos em Gómez (2007), Oliveira (2007), Naime (2001) e Silvino *et al.* (2003). Análises interessantes para dados anteriormente obtidos são encontradas em Schroeder (2001), Guedes (2004) e Almeida (2002).

3.3.2 Visão Geral

O sistema de medição instalado no Morro do Cachimbo apresenta muitas semelhanças com o sistema instalado na linha de transmissão.

Descargas incidentes no mastro da Estação sensibilizam dois transdutores de corrente instalados em sua base para medição integral da onda de corrente. Os sinais medidos são registrados dentro de uma estação blindada localizada a alguns metros da torre.

Assim como na linha de transmissão experimental, os transdutores escolhidos foram bobinas de Pearson com diferentes sensibilidades e faixas de excursão de sinal.

A digitalização do sinal é feita também por uma placa da *National Instruments* de oito canais e taxa de amostragem de 60 MS/s. A interface da placa com o computador foi programada no LRC utilizando o *software LabVIEW*.

A estação é alimentada pela rede elétrica e, com isso, o sistema funciona ininterruptamente. No caso de falta de energia, um banco de baterias entra em funcionamento, garantindo 16 horas de autonomia.

Nos itens seguintes, cada um desses sistemas é descrito com um maior detalhamento.

3.3.3 Torre Instrumentada

O sistema de medição do Morro do Cachimbo se inicia na torre de captação de descargas. Ela fica no alto do morro e foi construída como um mastro metálico de 60 m de altura constituído por treliças, se colocando com destaque no relevo da região. Por ser muito alta

em comparação com a área de sua base, ela é estaiada em várias alturas por cabos isolantes. Tudo isso é para garantir que a torre apresente apenas uma ligação para o solo. Uma imagem da torre é mostrada na figura 3.12.



Fig. 3.12 – Visão da torre instrumentada da estação

Em volta dessa ligação única na base da torre, ficam os sensores de corrente. Para proteger esses equipamentos, neste local foi construído um novo abrigo, também de material isolante. Pode-se visualizar esse abrigo na figura 3.13.



Fig. 3.13 – Abrigo na base da torre instrumentada da estação

O aterramento da estação apresenta disposição vista na figura 3.14. Apesar de sua grande extensão, a alta resistividade do solo (muito rochoso) não permitiu a obtenção de uma baixa de resistência de aterramento. Medições locais indicam valores da ordem de 30 Ω .

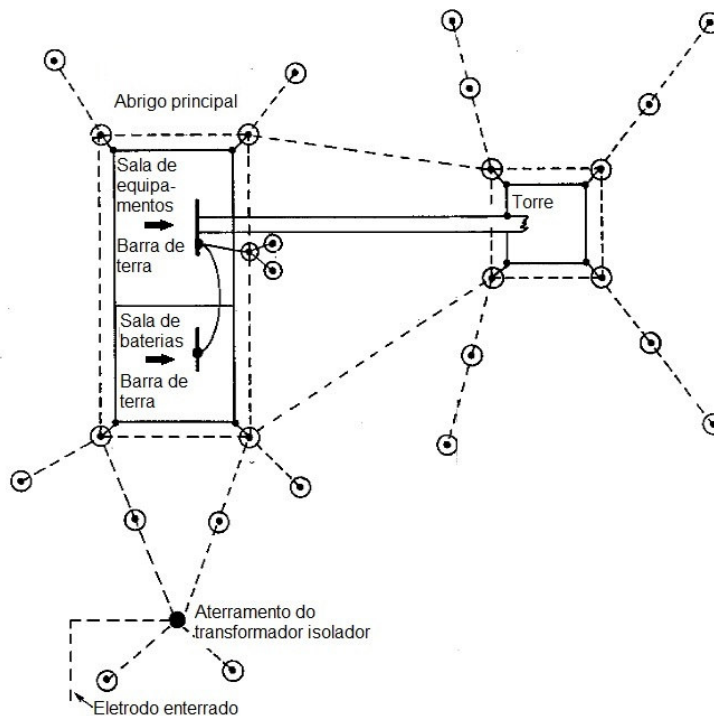


Fig. 3.14 – “Layout” do aterramento da estação

3.3.4 Transdutores de corrente

Os transdutores utilizados nesse sistema são dos mesmos modelos utilizados na linha de transmissão. Isso ocorreu porque em ambos o objetivo era a medição integral da corrente de descargas, desde as fases de baixa amplitude até os grandes impulsos. Logo, é adequado utilizar os mesmos sensores. A figura 3.15 mostra os transdutores instalados no abrigo.



Fig. 3.15 – Bobinas de Pearson instaladas no abrigo. Nessa imagem também se vê outro par de bobinas e um resistor “Shunt” para medições redundantes de corrente.

3.3.5 Sistemas de Proteção, Aquisição e Registro

O sinal detectado pelas bobinas é registrado por um sistema eletrônico que também requer um sistema de proteção.

Como dito anteriormente, a proteção do sistema é dimensionada a partir da corrente máxima a ser medida no sistema (10 kA, gerando uma tensão de 100 V e 150 kA, gerando uma tensão máxima de 750 V nas saídas da bobinas). Nesse caso, houve uma folga maior já que a tensão suportada pela placa é superior, 15 V.

O sistema de proteção do Morro do Cachimbo é bem parecido com o utilizado na linha de transmissão. Apresenta três partes, sendo a primeira, os supressores de surto de alta tensão, exatamente igual. As diferenças estão nos valores dos divisores de tensão que promovem a redução de 6,23 vezes para a bobina mais sensível e 49,51 vezes para a bobina menos sensível e no valor da tensão de atuação do supressor de surto de baixa tensão, 15 V.

A placa de aquisição da *National Instruments*, que pode ser vista na figura 3.16, apresenta oito canais com aquisição simultânea de 60 MS/s, frequência que permite visualizações a cada 16,6 ns. Ela também permite a transferência de 60 milhões de amostras para a memória RAM do computador, o que permite a gravação de 1 s com a taxa máxima de aquisição.



Fig. 3.16 – Placa de aquisição igual à utilizada no desenvolvimento

Como a placa utilizada nesse projeto é do mesmo fabricante da utilizada no projeto descrito anteriormente, a interface da placa do computador também foi desenvolvida a partir do *software* próprio do fabricante, o *LabVIEW*. A figura 3.17 mostra o programa desenvolvido, também com numeração para melhor visualização da explicação.

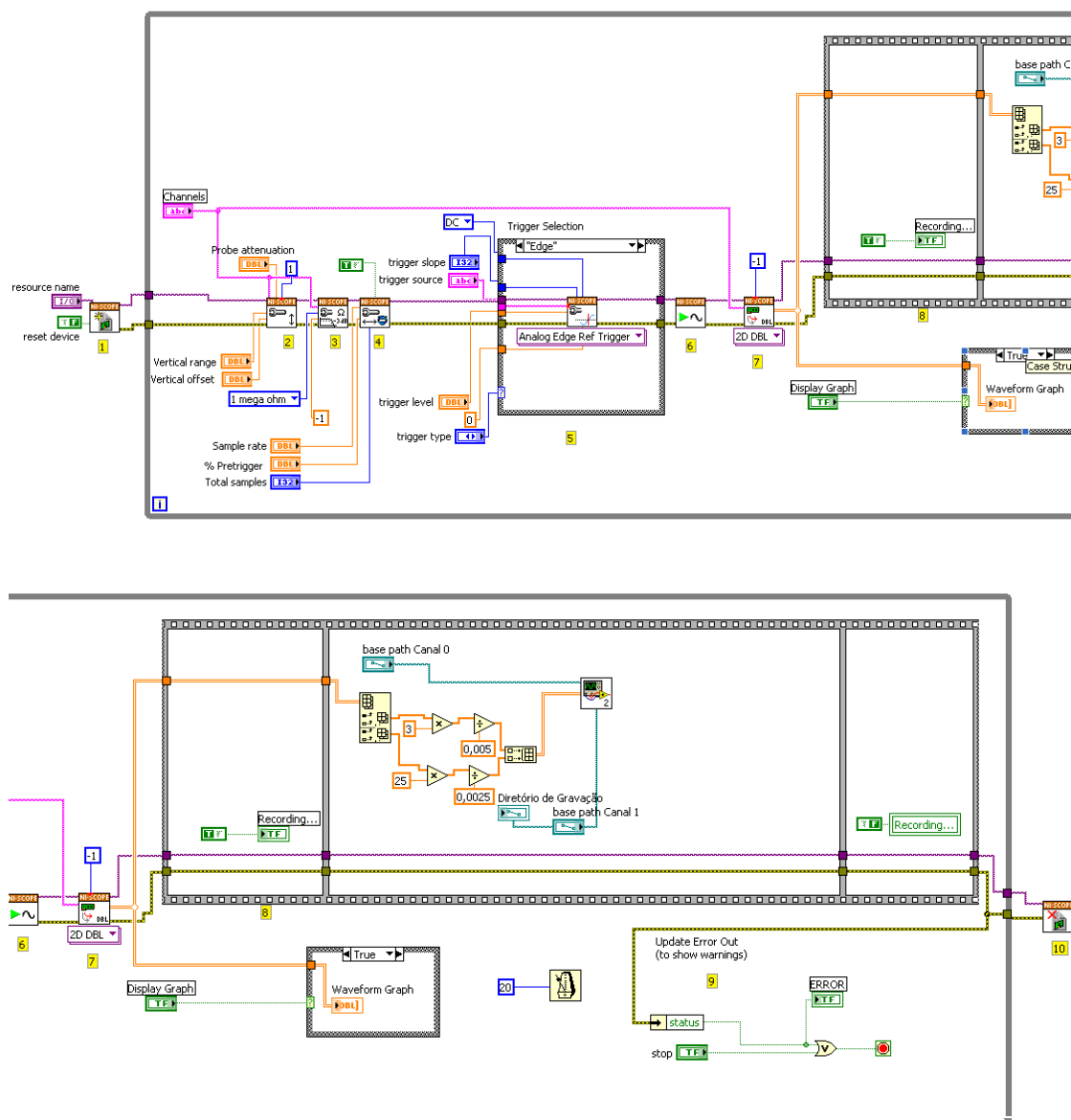


Fig. 3.17 – Janela que mostra o “loop” de aquisição de dados no LabView. Imagem partida para melhor visualização.

A primeira parte (numerada de 1 a 4) inicia a placa e faz sua configuração, definindo parâmetros como faixa de passagem, impedância de entrada, taxa de amostragem, nível DC e acoplamento.

A segunda parte (número 5) define o tipo de disparo. Nesse programa foi utilizado também o tipo *window*.

A terceira parte (números 6 e 7) faz a aquisição do sinal medido. Mais uma vez, a aquisição funciona com a configuração *pre-trigger*, em que se faz a aquisição do sinal a partir de um tempo anterior ao disparo, no caso 100 ms. Essa parte só funciona se ocorrer um disparo.

A quarta parte (9 e 10) faz uma avaliação de erro no programa e também controla o encerramento de operação. Esse encerramento pode ser comandado pelo usuário ou pela avaliação de erro, como no programa anterior.

A última parte (8) faz a gravação dos dados adquiridos no disco rígido do computador. Depois da gravação dos dados, o programa volta à espera de um sinal para aquisição.

A interface desse programa com o usuário é um pouco mais complexa que a do programa anterior e pode ser visualizada na figura 3.18. Ela permite a configuração de um número maior de parâmetros, além da visualização de dados adquiridos.

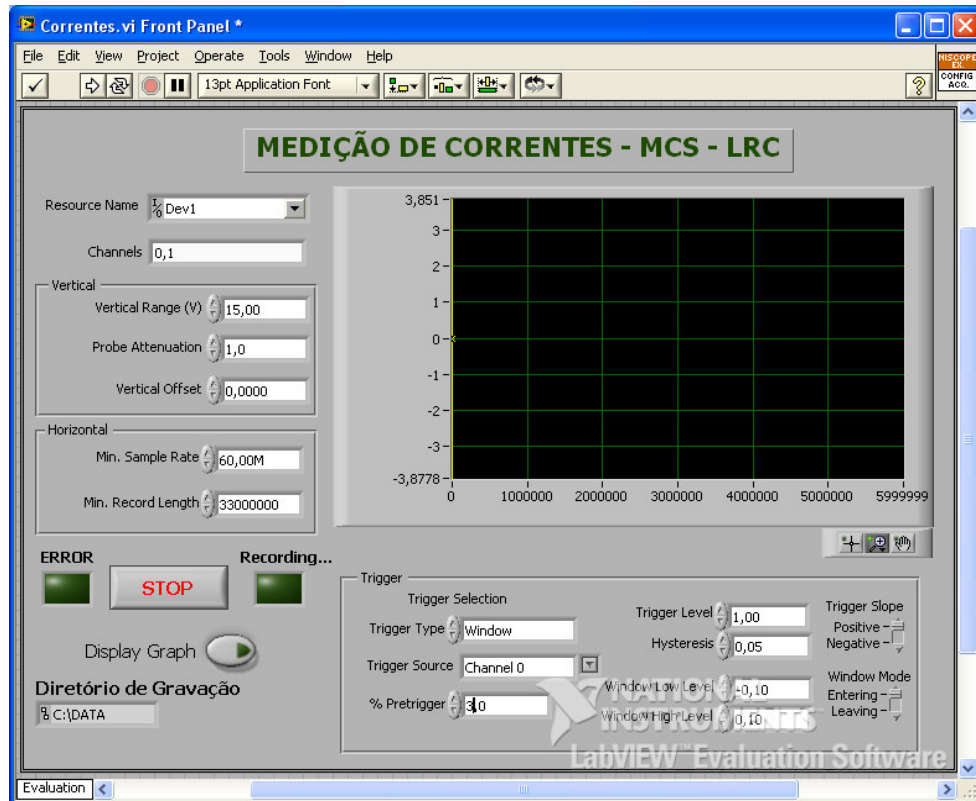


Fig. 3.18 – Interface do programa com o usuário.

O computador para essa aplicação tinha de atender todos os requisitos da aplicação anterior, menos o problema de espaço. Nesse caso foi escolhido um computador com processador E7400 2,80 GHz Core 2 Duo e 4 GB de memória RAM DDR2. Na estação, ele fica localizado dentro de um abrigo metálico para melhorar ainda mais a blindagem do sistema, que é mostrado na figura 3.19.



Fig. 3.19 – Computador utilizado no projeto instalado no local

4 Resultados e Análises

4.1 Introdução

Para fins de ilustrar os resultados obtidos até o momento com os sistemas de medição desenvolvidos no contexto desse trabalho, são apresentados neste capítulo dados de medições realizadas recentemente.

4.2 Dados obtidos pelo sistema instalado no trecho de linha de transmissão experimental

O sistema de medição da linha experimental encontra-se em funcionamento pleno desde dezembro de 2009. Desde sua montagem até a época atual, seus componentes foram testados, ora individualmente, ora como um todo. Testes feitos no sítio de medição com ondas impulsivas de baixa intensidade foram medidos corretamente e a correta operação do sistema de acionamento (considerado como a principal fonte de eventuais erros) foi verificada sistematicamente em condições reais.

Mesmo com todos esses cuidados, passada uma temporada de chuvas (que em Belo Horizonte usualmente vai de outubro a março), infelizmente não foram conseguidos dados de corrente de descargas atmosféricas. Várias medições foram realizadas apenas pela bobina de maior sensibilidade, mas aparentam ser apenas ruído.

Algumas das medições realizadas podem ser vistas nas figuras 4.1 a 4.4.

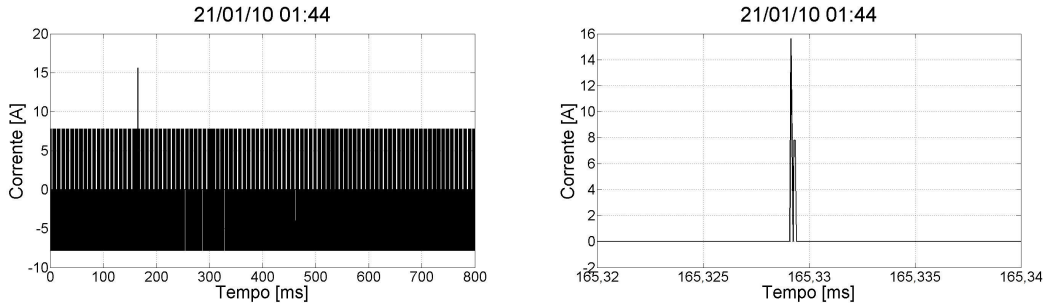


Fig. 4.1 - Medição realizada dia 21/01/10, às 01h44min. A segunda imagem mostra um detalhe da primeira.

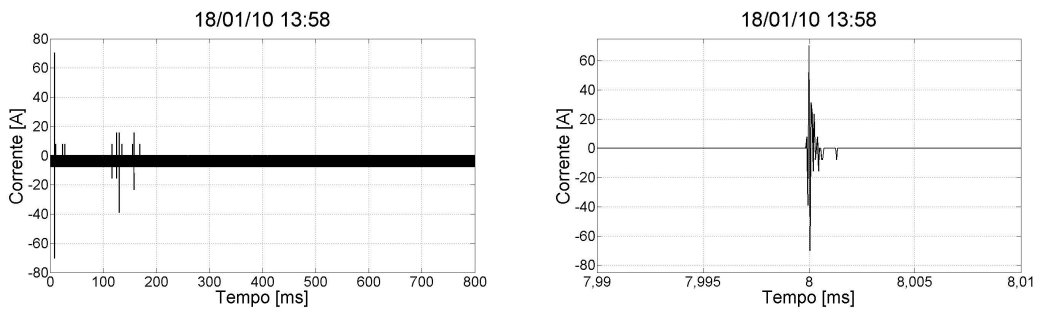


Fig. 4.2 - Medição realizada dia 18/01/10, às 13h58min. A segunda imagem mostra um detalhe da primeira.

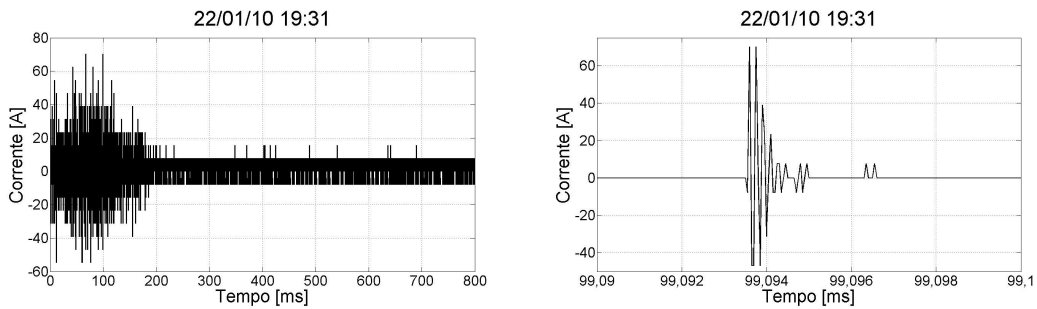


Fig. 4.3 - Medição realizada dia 22/01/10, às 19h31min. A segunda imagem mostra um detalhe da primeira.

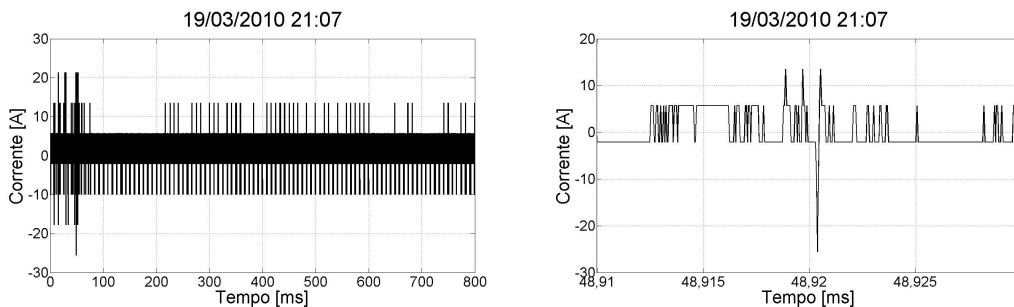


Fig. 4.4 - Medição realizada dia 19/03/10, às 21h07min. A segunda imagem mostra um detalhe da primeira.

Essas quatro figuras mostram bem os tipos de ruído medidos na linha de transmissão. O primeiro se caracteriza por apenas um pequeno pulso sobressaindo. O segundo, por poucos pulsos, geralmente com um de destaque. O terceiro, um pacote de ruído. E o quarto, uma série de pulsos, espaçados ou não, sem um de destaque.

Têm-se a expectativa do registro de correntes de descarga na próxima temporada de chuvas.

4.3 Sistema instalado no Morro do Cachimbo

4.3.1 Resumo das medições realizadas recentemente

O desenvolvimento do sistema instalado no Morro do Cachimbo foi iniciado pelo autor ainda durante sua graduação, mas seu funcionamento só se estabeleceu em janeiro de 2008. Durante seu funcionamento oito descargas plenas foram medidas. A tabela 4.1 sumariza seus dados.

Tab. 4.1 – Sumário das Medições Realizadas no Morro do Cachimbo entre janeiro de 2008 e abril de 2010

Data	Número de Correntes de Retorno	Pico da maior descarga [kA]
01/02/2008	1	-153
24/02/2008	4	-26
24/02/2008	2	-8
31/10/2008	9	-47
24/03/2009	3	-65
07/10/2009	6	-42
19/12/2009	1	-45
22/01/2010	1	-50

4.3.2 Ilustração de registros das fases impulsivas da corrente de descarga

Alguns exemplos da fase impulsiva das correntes de descargas, contemplando primeiras descargas, subseqüentes e canais ascendentes não-conectados são mostrados nas figuras do item 4.3.2 (4.5 a 4.11). O detalhamento desses dados é apresentado numa publicação recente do *Journal of Geophysical Research (JGR)* (Visacro *et al.* 2010).

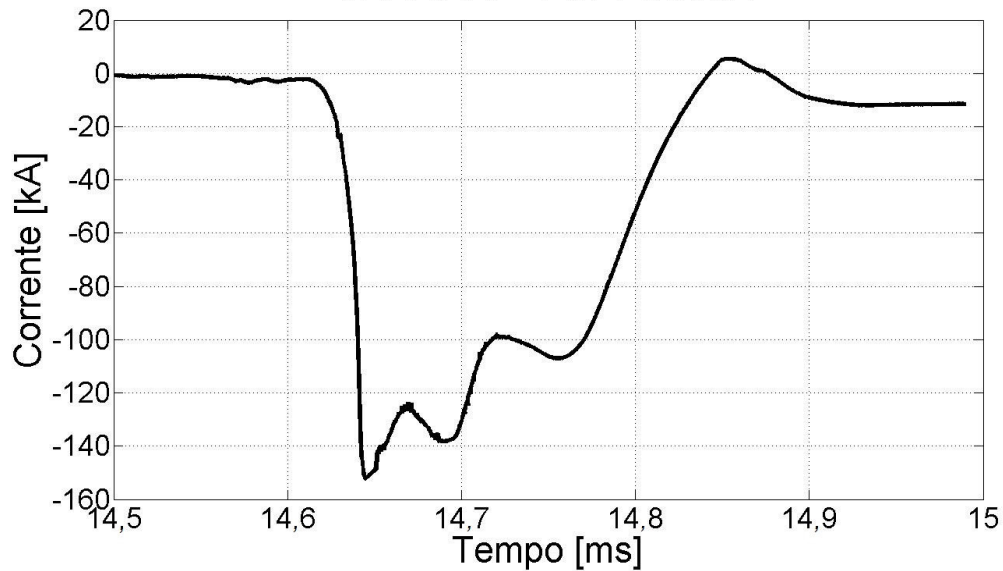


Fig. 4.5 - Primeira corrente de descarga ocorrida dia 01/02/08, às 22h26min.

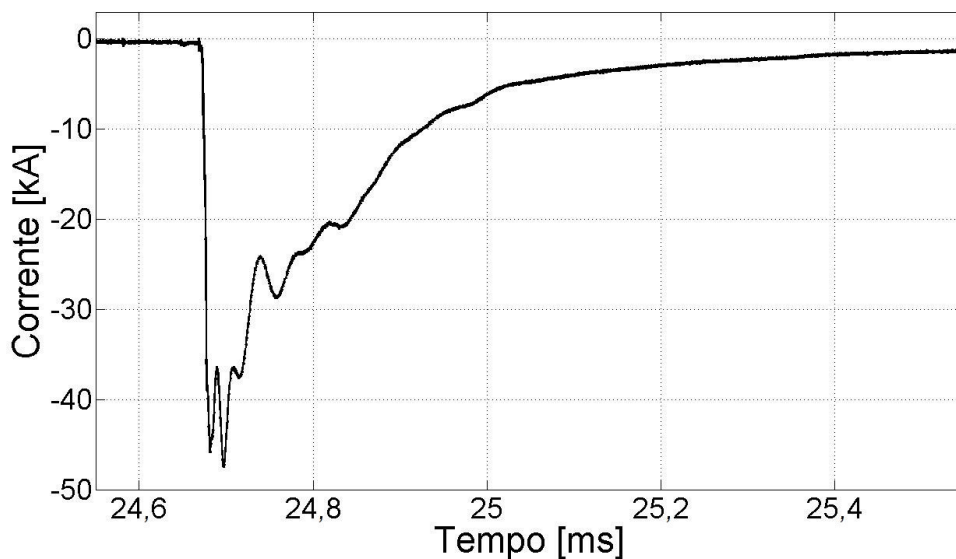


Fig. 4.6 - Primeira corrente de descarga ocorrida dia 31/10/08, às 15h40min.

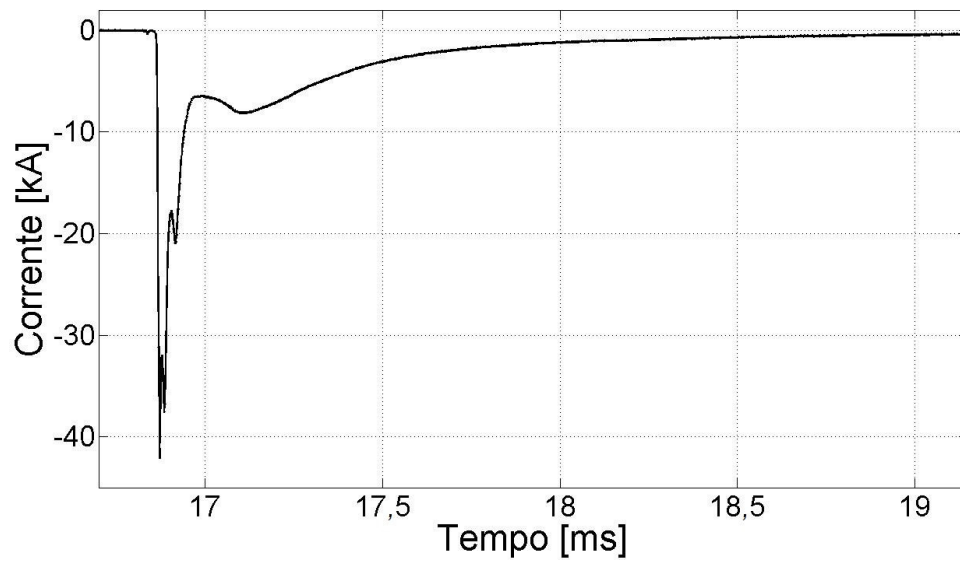


Fig. 4.7 - Primeira corrente de descarga ocorrida dia 07/10/09, às 23h33min.

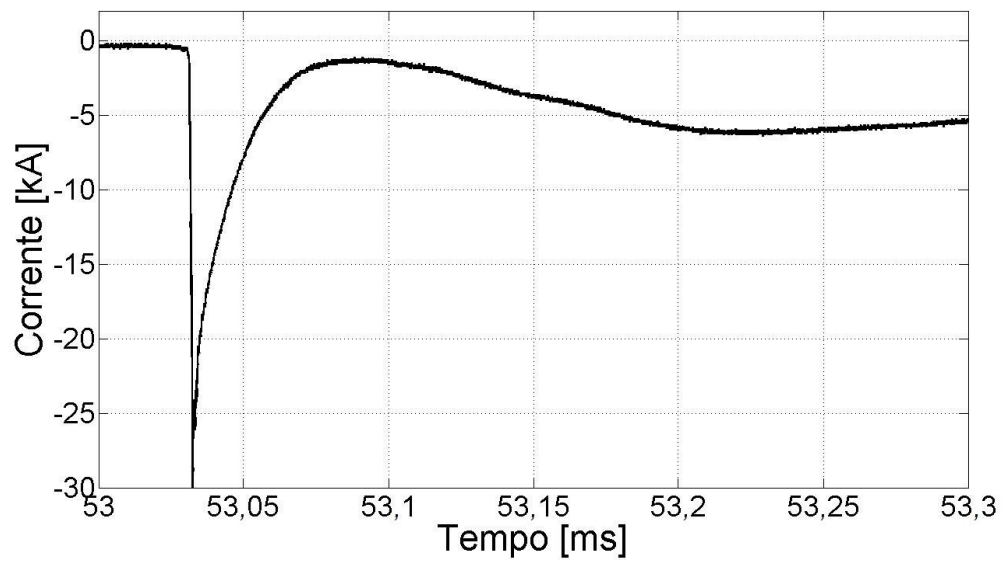


Fig. 4.8 - Corrente subsequente de descarga ocorrida dia 24/02/08, às 14h21min.

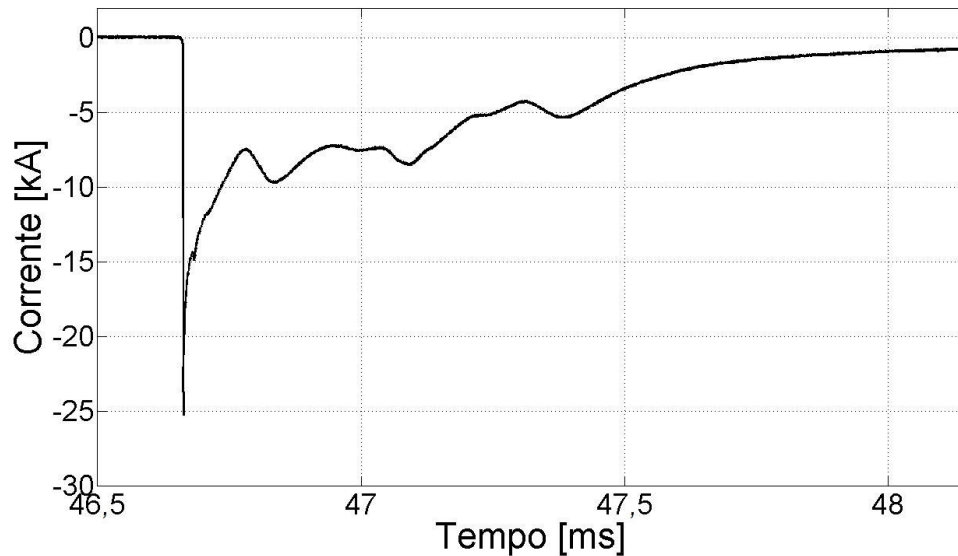


Fig. 4.9 – Corrente subseqüente de descarga ocorrida dia 07/10/09, às 23h33min.

Além de descargas plenas, também foram medidas as correntes de três canais ascendentes que não evoluíram para materializar descargas. Estes canais, designados canais ascendentes não-conectados (tradução do termo em inglês *Unconnected Upward Leaders*), se desenvolveram na torre em resposta a canais descendentes se aproximando ao solo. Esses eventos ocorreram dias 31/10/08, 30/03/09 e 21/12/09 e foram associados com descargas incidentes no solo em pontos próximos à torre (de centenas de metros a alguns quilômetros). As figuras 4.10 e 4.11 exemplificam esse fenômeno.

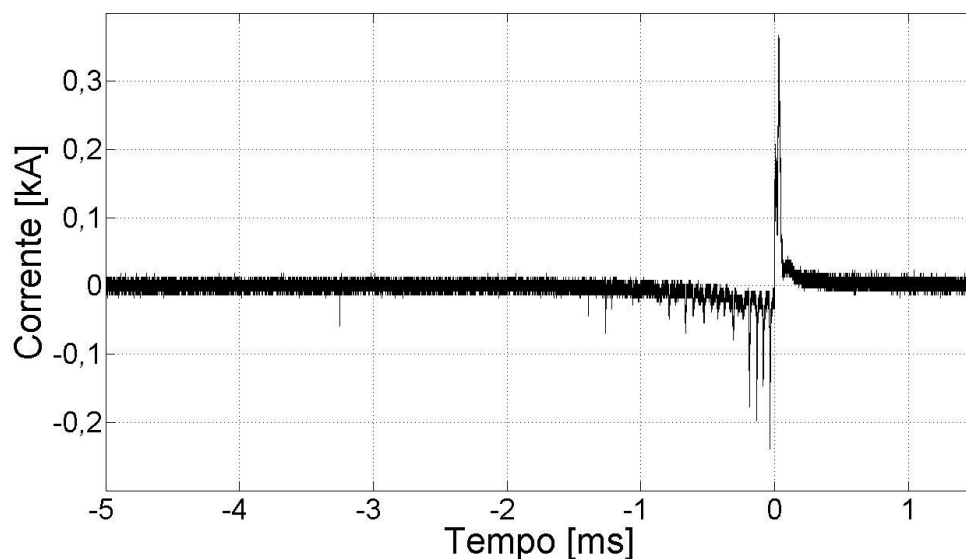


Fig. 4.10 – Corrente de canal ascendente não-conectado ocorrido dia 31/10/08, às 15h38min.

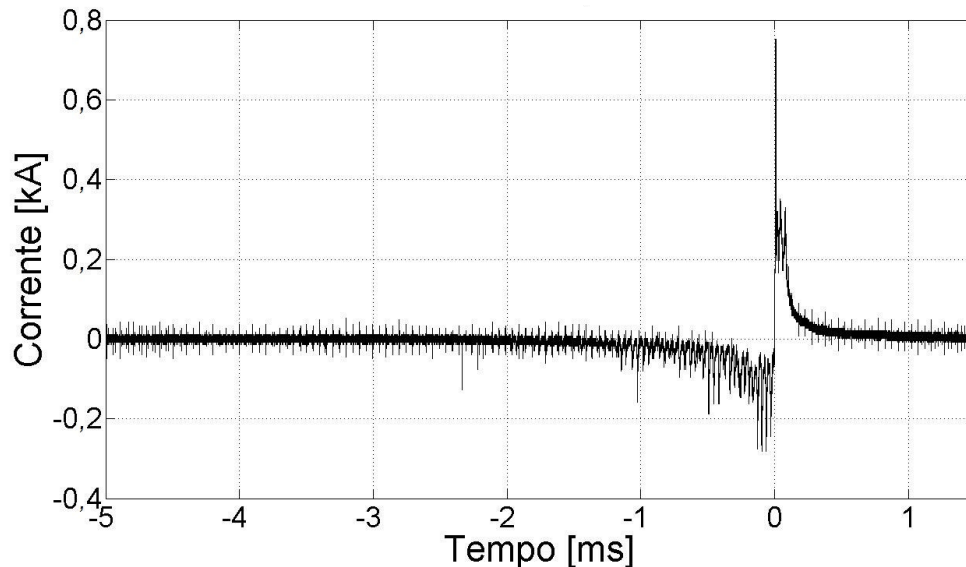


Fig. 4.11 – Corrente de canal ascendente não-conectado ocorrido dia 30/03/09, às 20h34min.

Os canais ascendentes não-conectados apresentam uma forma próxima à de uma primeira descarga em seus estágios iniciais. São notados pulsos unipolares correspondentes a resposta à aproximação do canal precursor ao solo. Porém, enquanto na primeira descarga a corrente continua crescendo de maneira contínua e consistente, em canais ascendentes não-conectados a corrente sofre um colapso. A carga positiva acumulada no canal ascendente e suas intermediações é descarregada para o solo, causando o fluxo de uma corrente de relativo intenso valor e polaridade oposta à corrente inicial. O pico medido dessa corrente variou entre 400 A e 800 A.

As medições realizadas no Morro do Cachimbo têm grande destaque nas pesquisas atuais sobre descargas por sua torre relativamente baixa, o que torna as correntes medidas muito próximas de corrente de descargas naturais. Nas medições de descargas induzidas por foguetes, as correntes apresentam um comportamento parecido com as de descargas subseqüentes, dependendo da técnica utilizada. Por outro lado, as medições em torres muito altas se referem, na grande maioria dos casos, a corrente de descargas ascendentes, que raramente ocorrem em condições naturais. Atualmente, as medições do Morro do

Cachimbo são possivelmente as que apresentam dados de maior qualidade no que concernem as descargas naturais e particularmente para a primeira corrente de descarga negativa descendente.

4.3.3 Registro de corrente de descarga na fase anterior à primeira corrente de retorno

Essas medições produziram aparentemente os primeiros registros da fase anterior à primeira corrente de descarga publicados na literatura.

Estes dados originais constituem num dos destaques do artigo recentemente publicado pela equipe do LRC no *JGR* (Visacro *et al.* 2010) e o assunto é ali tratado com maiores detalhes.

Tipicamente, esse período apresenta como característica pequenos pulsos de corrente, sobreposto a um patamar cada vez maior de corrente, que pode culminar na corrente de retorno. As imagens das figuras 4.12 e 4.13 exemplificam essa fase.

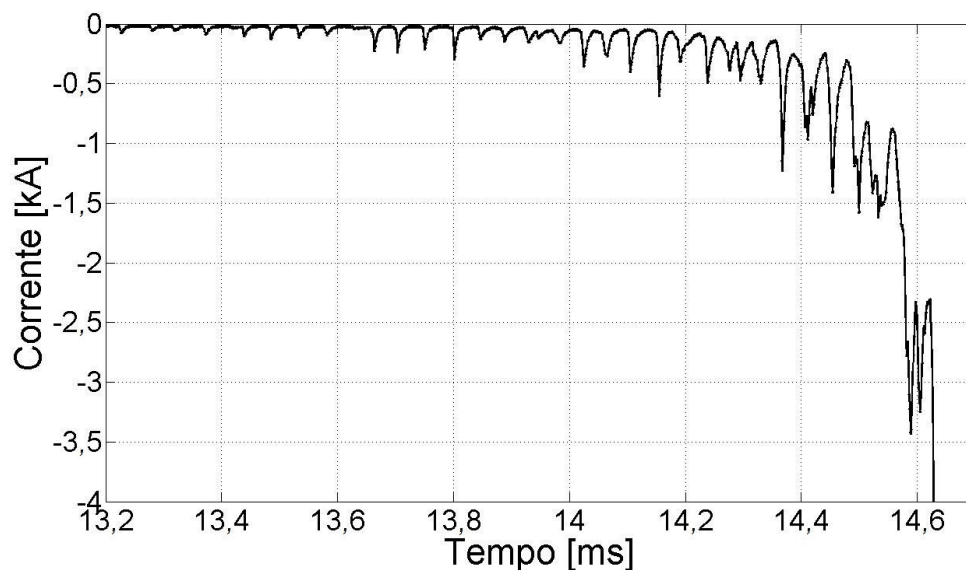


Fig. 4.12 – Fase anterior à primeira descarga ocorrida dia 01/02/08, às 22h26min.

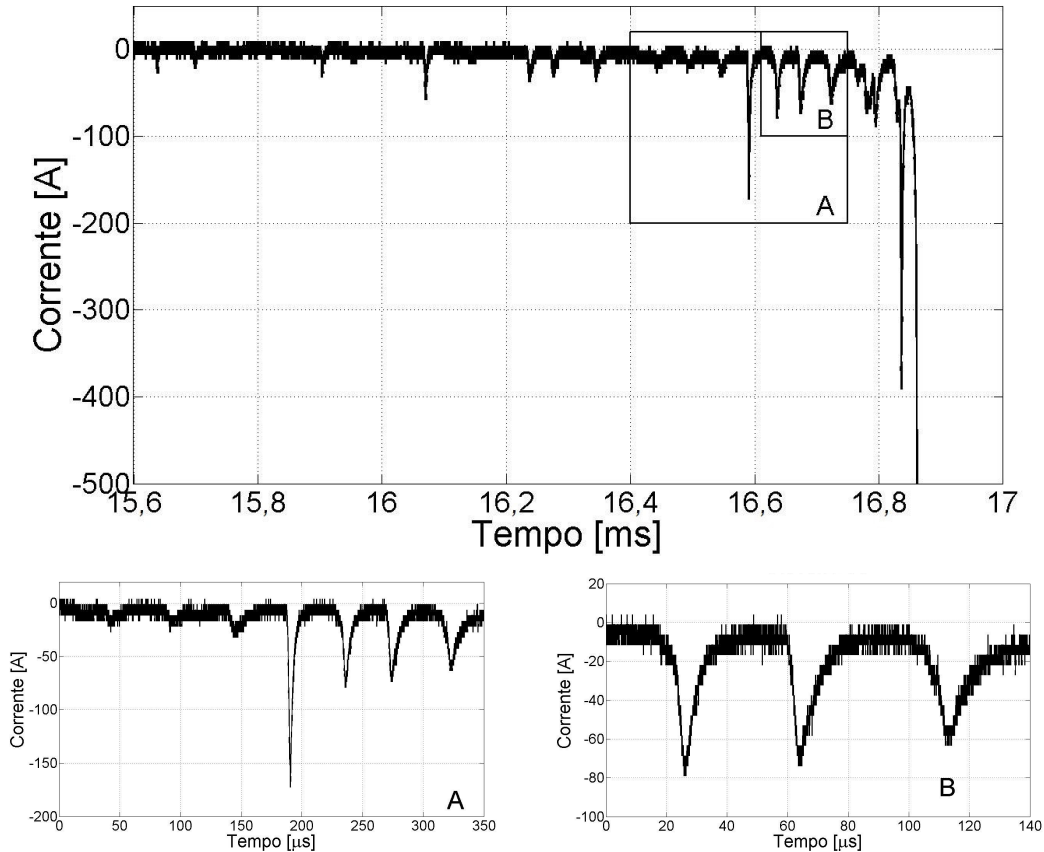


Fig. 4.13 – Fase anterior à primeira descarga ocorrida dia 07/10/09, às 23h33min. As imagens menores mostram detalhes da completa.

Para explicar a ocorrência desses pulsos deve-se fazer a associação deles com os passos da formação do canal ascendente, em resposta aos passos do canal precursor. Cada passo para extensão do canal induz o fluxo de corrente pela torre que deposita carga na extremidade do canal. Além disso, com a aproximação do canal precursor, sua indução se torna mais forte, o que explica o gradativo aumento médio de intensidade dos pulsos.

O comportamento da fase logo anterior a descargas subsequentes apresenta comportamento distinto. A presença de pulsos é muito discreta e muito próxima do início da corrente de retorno. Muitas vezes, tais pulsos não são sequer percebidos. Sua explicação está, mais uma vez, no processo de formação da descarga. A descarga subsequente é formada pelo processo de recarregamento direto, que não envolve passos nem a criação de canais ascendentes. Apenas em alguns casos, nos últimos momentos desse processo, podem ocorrer passos para recriar um pequeno comprimento da canal

próximo ao solo, o que explica a ocorrência de apenas alguns pulsos de corrente. As figuras 4.14 e 4.15 mostram exemplos disso.

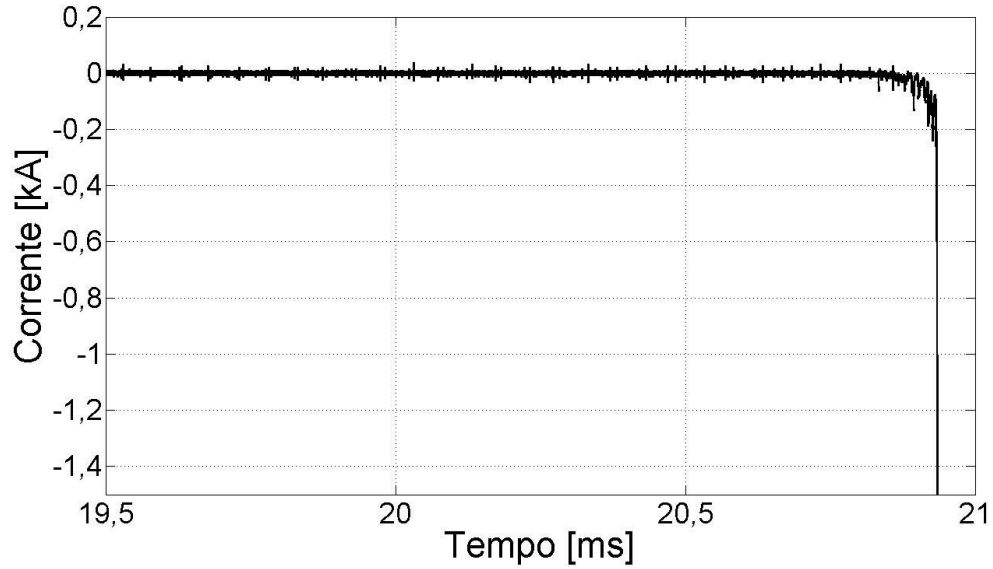


Fig. 4.14 - Fase anterior à segunda descarga ocorrida dia 24/03/09, às 18h24min. Pode-se perceber a presença dos pulsos logo antes da corrente de retorno.

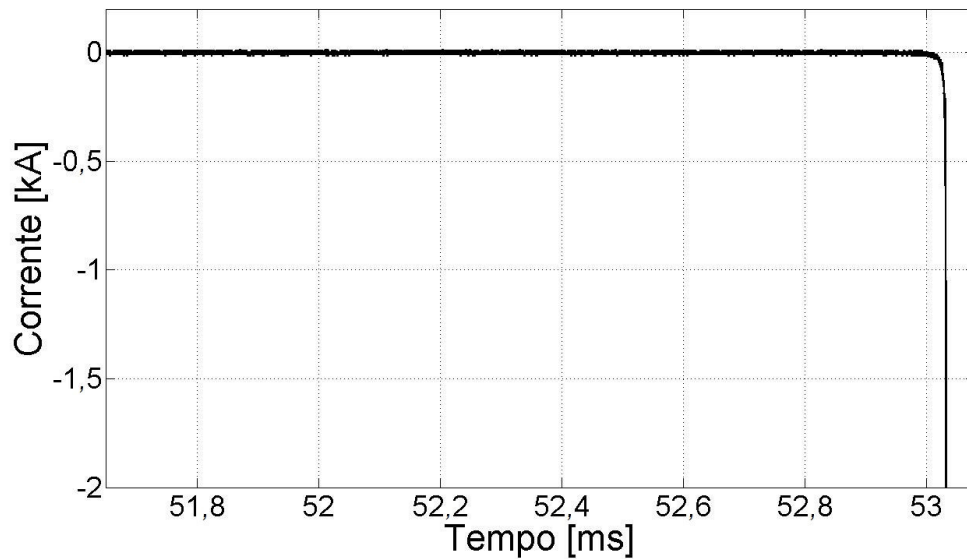


Fig. 4.15 - Fase anterior à segunda descarga ocorrida dia 24/02/08, às 14h21min. Pode-se perceber a ausência dos pulsos.

Um fato interessante foi a percepção de que uma das descargas plenas, a ocorrida dia 24/02/08 com quatro correntes de retorno, não apresentava os pulsos característicos na fase anterior a primeira descarga, o que a diferenciava das demais. A explicação para tal só foi encontrada com a análise dos dados do LLS. Apesar de a descarga ter sido a primeira a atingir a torre, ela era, de fato, uma subsequente, cuja primeira descarga fechou para outro ponto a algumas centenas de metros de distância. Logo, ela apresenta o comportamento típico de uma subsequente.

Mesmo com uma quantidade ainda não volumosa de dados sobre os pulsos anteriores à corrente de retorno, a falta de conhecimento sobre essa fase motivou um estudo estatístico sobre o tema. Para todos os pulsos superiores a 30 A com qualidade de medição satisfatória, os seguintes dados foram avaliados: corrente de pico, intervalo entre pulsos, tempo de frente e largura do pulso a meio pico. Para melhor entendimento, os dados para primeiras descargas e canais ascendentes não-conectados são dispostos separadamente. Os pulsos de descargas subsequentes não foram avaliados, pois a quantidade de amostras era pouco significativa.

Para cada parâmetro, uma análise simplificada e histogramas foram feitos a partir dos resultados obtidos. O primeiro a ser abordado é a corrente de pico dos pulsos.

Nos casos analisados, os pulsos anteriores à corrente de retorno começaram alguns milissegundos antes da descarga (foram medidos entre 3,3 e 1,2 ms), com valores baixos, até algumas poucas centenas de Ampères. Os primeiros pulsos apresentam valores na faixa de 20 A e depois se mantêm próximos de 50 A até um limite que ocorre aproximadamente 300 μ s antes da corrente de retorno. A partir daí, os pulsos começam a exceder 100 A e se encontram sobrepostos a uma corrente que cresce continuamente. Nesse período, os pulsos podem assumir valores muito altos, até alguns milhares de Ampères. O maior valor medido ultrapassou 3000 A, porém ele ocorreu na descarga de 153 kA, amplitude muito acima da mediana de correntes medida na Estação.

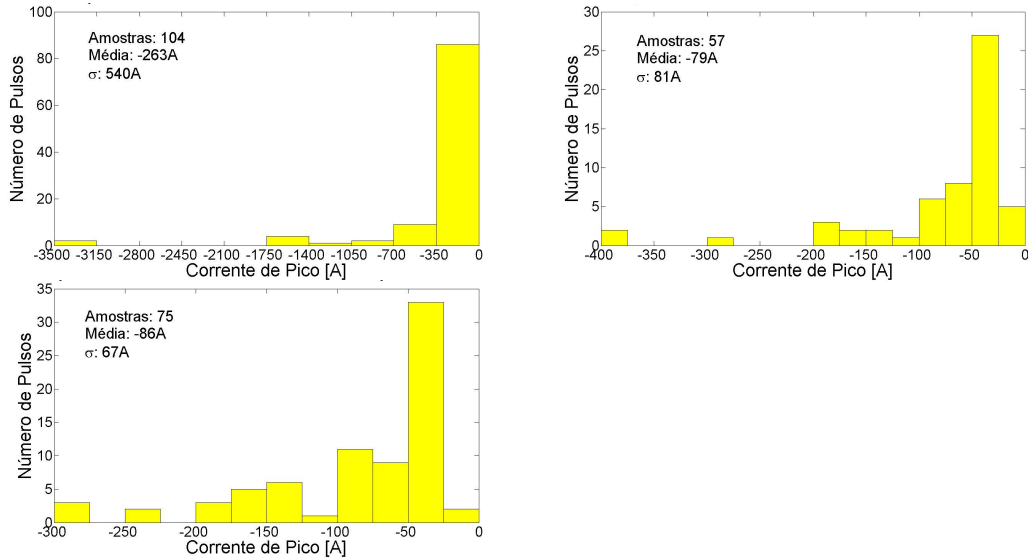


Fig. 4.16 - Histogramas com resultados do estudo para corrente de pico. O primeiro para primeiras descargas, o segundo para primeiras descargas desconsiderando a do dia 01/02/08 e o terceiro para canais ascendentes não conectados.

O primeiro histograma da figura 4.16 mostra um valor médio de 263 A para o pico dos pulsos. Esse valor se mostrou bem maior que a média para correntes medidas em canais ascendentes não-conectados, 86 A. Quando os pulsos da corrente de 153 kA eram desconsiderados o valor encontrado para a média foi de 79 A, bem mais próximo da média de 86 A. Isso era esperado porque os dois processos são basicamente os mesmos nesse ponto, só se diferenciando na passagem ou não da corrente de retorno.

A seguir é avaliado o intervalo entre pulsos. A figura 4.17 indica os resultados.

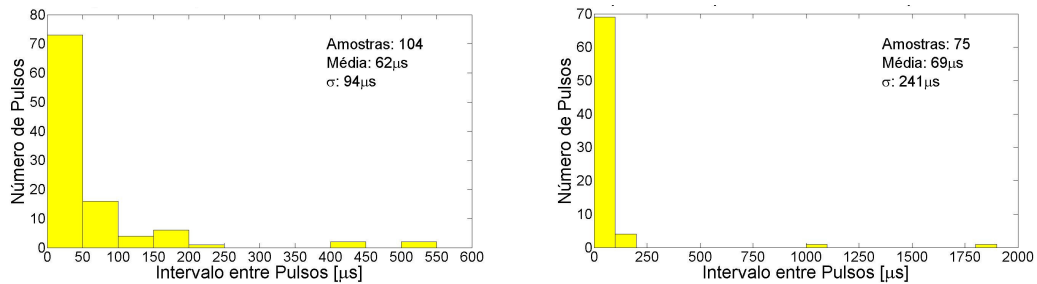


Fig. 4.17 - Histogramas com resultados do estudo para intervalo entre pulsos. O primeiro para primeiras descargas e o segundo para canais ascendentes não conectados.

O comportamento do intervalo entre pulsos para os dois casos é muito parecido. No último milissegundo esse valor fica em torno de $50 \mu\text{s}$, valor tido como intervalo médio entre os passos do canal precursor de descarga. Os resultados mostrados nos histogramas, porém, são maiores já que no início do processo os intervalos podem ser mais espaçados, chegando a mais de 1 ms no caso extremo.

O próximo parâmetro discutido é a largura do pulso a meio pico. Esse valor foi escolhido porque como há um nível de ruído de alguns Ampères nos sinais medidos, além do patamar crescente na fase final, a definição de começo e fim pode não ser tão clara. Os histogramas da figura 4.18 mostram os resultados.

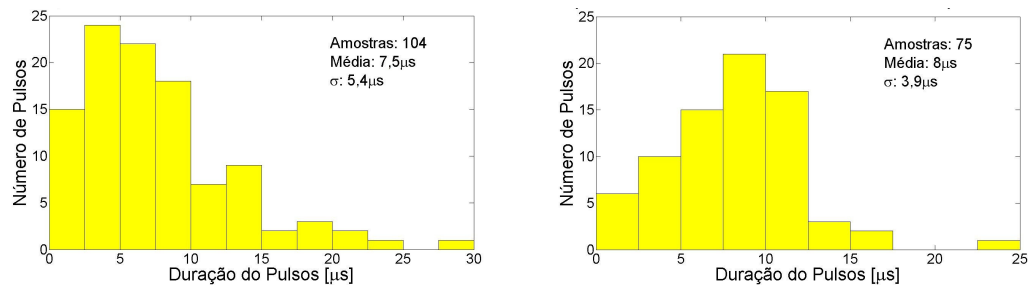


Fig. 4.18 - Histogramas com resultados do estudo para largura dos pulsos a meio pico. O primeiro para primeiras descargas e o segundo para canais ascendentes não conectados.

As figuras mostram um comportamento bem parecido para ambos os casos, com valores médios de $7,5 \mu\text{s}$ e $8 \mu\text{s}$ para primeira descarga e canais não conectados, respectivamente. A maioria dos pulsos apresenta menos de $15 \mu\text{s}$ e poucos ultrapassaram $20 \mu\text{s}$.

O último parâmetro a ser discutido é o tempo de frente dos pulsos. A maioria dos pulsos de baixa amplitude possui tempos de subida e decaimento bem parecidos, apesar do tempo de decaimento ser um pouco maior, como pode ser visto nos detalhes da figura 4.13. Para os pulsos de alta amplitude, essa tendência não se mantém, o tempo de frente é muito menor que o decaimento.

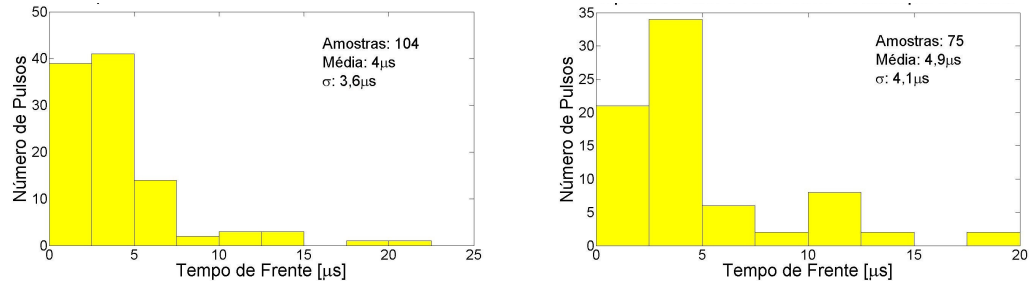


Fig. 4.19 – Histogramas com resultados do estudo para tempo de frente. O primeiro para primeiras descargas e o segundo para canais ascendentes não conectados.

Os histogramas da figura 4.19 mostram valores médios bem parecidos, $4 \mu\text{s}$ e $4,9 \mu\text{s}$ para os pulsos das primeiras descargas e canais ascendentes não-conectados respectivamente. Esses tempos apresentam a mesma ordem de grandeza dos tempos de frente de primeiras descargas.

5 Conclusões

5.1 Conclusões Gerais

Nesta dissertação, buscou-se descrever dois desenvolvimentos experimentais implementados pelo autor com o intuito de realizar medições diretas de correntes de descargas atmosféricas. Esse trabalho se coloca como uma continuidade de pesquisas realizadas no LRC sobre o fenômeno e deve ser realçado que seu desenvolvimento envolveu a contribuição de vários membros da equipe do LRC. Resultados bem interessantes foram alcançados.

Os sistemas de medição implementados foram descritos, bem como suas potencialidades e limitações. Discutiu-se também a filosofia e o andamento do processo de desenvolvimento, além de experiências, problemas ocorridos e soluções encontradas durante as investigações.

O sistema de medição de corrente instalado no Morro do Cachimbo nunca produziu tantos dados relevantes e detalhados como produz com sua configuração atual. Suas medições são de vital importância, já que são, no momento, aparentemente as únicas no mundo que geram dados sobre o fenômeno mais comum e, por consequência, relevante para a engenharia de proteção, a descarga nuvem-solo negativa descendente.

Além disso, a qualidade das medições obtidas permitiu, pela primeira vez, a visão da corrente de uma fase do fenômeno que só havia sido avaliada a partir da inferência de campos elétricos medidos, a fase anterior à corrente de retorno, o canal ascendente. Essa informação é de suma relevância para o conhecimento do fenômeno e dos aspectos de sua formação.

Essa fase começa com a constituição de pulsos de corrente de baixa intensidade alguns milissegundos antes da corrente de retorno e seus valores podem ultrapassar a ordem de milhares de Ampères quando próximo ao estabelecimento desta corrente. Além disso, eles podem ocorrer por indução mesmo quando a descarga não se materializa para o local em questão. Nesse caso (canal ascendente não-conectado), a carga acumulada no canal volta para o solo e ocorre um pico de corrente também de ordem pouco inferior a 1000 A nos casos medidos. Estudos estatísticos foram realizados para desenvolver conhecimento sobre essa fase preliminar da corrente de descarga, a despeito do número reduzido de amostras.

O sistema de medição instalado na linha de transmissão experimental apresenta potencialidades. A medição permitirá avaliar correntes induzidas por descargas próximas e distribuições da corrente de descarga incidentes na linha, bem como das conseqüências da reflexão em descontinuidades. Além disso, estudos sobre a queima de cabos OPGW pela componente contínua poderão ser desenvolvidos.

5.2 Propostas de Continuidade

As atividades desenvolvidas durante esse trabalho se inserem numa pesquisa mais abrangente e aprofundada realizada pela equipe do LRC sobre o fenômeno descargas atmosféricas. Nesse contexto, é importante um melhor intercâmbio desses dados com os obtidos nas medições de campo eletromagnético e, principalmente, nas filmagens da câmera rápida. Esses dados também podem ser utilizados para a calibração do sistema de detecção de raios na área de cobertura próximas às instalações.

6 Referências Bibliográficas

D. R. Almeida, **“Um Novo Modelo de Representação da Corrente de Retorno do Canal e da Torre de Medição para Estudos de Contaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas”**, dissertação de Mestrado, PPGEE-UFMG, 2002.

R. B. Anderson e A. J. Eriksson, **“Lightning parameters for engineering application”** em *Electra*, 69, pp. 65-102, 1980.

K. Berger, R. B. Anderson e H. Kröninger, **“Parameters of Lightning Flashes”** em *Electra*, 41, pp. 23-37, 1975.

J. S. Boyle e R. E. Orville, **“Return stroke velocity measurements in multistroke lightning flashes”** em *J. of Geophysical Research*, 81, 1976.

M. Brook, N. Kitagawa e E. J. Workman, **“Quantitative study of strokes and continuing current in lightning discharges to ground”** em *J. of Geophysical Research*, 67, 1962.

N. D. Clarence e D. J. Malan, **“Preliminary discharge process in lightning flashes to ground”** em *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 83, pp. 72-161, 1957.

A. R. de Conti, **“Modelos para Definição de Ondas de Corrente e Tensão**

Representativas das Solicitações de Sistemas de Distribuição por Descargas Atmosféricas", tese de Doutorado, PPGEE-UFMG, 2006.

A. R. de Conti e S. Visacro, "**Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms**", em *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol.49, no.2, 2007.

G. M. Corrêa, A. M. N. Teixeira, S. Visacro, C. R. Mesquita, L. C. Pereira, H. R. L. Almeida, A. L. Senna, L. Ruhnke e V. Mazur, "**Improvements of the Facilities for Lightning Research at Morro do Cachimbo Station**" em *Proc. of 29th Int. Conf. on Lightning Protection*, 2008.

G. M. Corrêa, S. Visacro, A. M. N. Teixeira, L. Ruhnke e V. Mazur, "**The response of towers to nearby Lightning: Recent Improvements in the Measuring System**" em *Proc. of IX SIPDA - 9th International Symposium on Lightning Protection*, 2007.

S. M. Davies, "**Properties of lightning discharges from multiple-station wideband electric field measurements**", tese para Ph.D., University of Florida, 1999.

R. N. Dias, "**Nova Metodologia para Identificação de Pontos Críticos de Desempenho em Linhas de Transmissão Baseada na Aplicação de Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas**", tese de Doutorado, PPGEE-UFMG, 2006.

R. N. Dias, C. R. Mesquita, M. H. M. Vale e S. Visacro, "**Lightning Location Systems: a Discussion about Flash and Stroke Density**" em *Proc. 28th Int. Conf. on Lightning Protection*, 2006.

A. J. Erickson, "**Lightning and tall structures**" em *Trans. South African IEEE*, 69, 1978.

A. J. Erickson, "**A discussion on lightning and tall structures**" em *CSIR Special Report ELEK*, 152. 1978.

R. J. Fisher, G. H. Schnetzer, R. Thottappillil, V. A. Rakov, M. A. Uman e J. D. Goldberg, **"Parameters of triggered-lightning flashes in Florida and Alabama"** em *J. of Geophysical Research*, 98, 1993.

A. N. Gómez **"Uma Contribuição para a Medição das Componentes de Correntes de Descargas Atmosféricas Através de Transdutores Resistivos"**, tese de Doutorado, PPGEE-UFMG, 2007.

D. G. Guedes, **"Modelagem Matemática de Correntes na Torre da Estação Morro do Cachimbo (Brasil)"**, tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004.

V. P. Idone e R. E. Orville, **"Lightning return stroke velocities in Thunderstorm Research International Program (TRIP)"** em *J. of Geophysical Research*, 87, 1982.

V. P. Idone e R. E. Orville, **"Correlated peak relative light intensity and peak current in triggered lightning subsequent stroke"** em *J. of Geophysical Research*, 90, 1985.

D. M. Jordan, V. P. Idone, V. A. Rakov, M. A. Uman, W. H. Beasley e H. Jurenka, **"Observer dart leader speed in natural and triggered lightning"** em *J. of Geophysical Research*, 97, 1992.

N. Kitagawa e M. Brook, **"A comparison of intraclouds cloud-to-ground lightning discharges"** em *J. of Geophysical Research*, 65, 1960.

N. Kitagawa, M. Brook e E. J. Workman, **"Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges"** em *J. of Geophysical Research*, 67, 1962.

P. R. Krehbiel, **"An analysis of the electric field produced by lightning"**, tese para Ph.D., University of Manchester, 1981.

P. R. Krehbiel, M. Brook e R. McGrory, **"An analysis of the charge structure of lightning"**

discharges to the ground" em *J. of Geophysical Research*, 84, 1979.

E. P. Krider, C. D. Weidman e R. C. Noggle, **"The electric field produced by lightning stepped leaders"** em *J. of Geophysical Research* 82, no. 6, pp. 951-960, 1977.

Y. T. Lin, M. A. Uman, J. A. Tiller, R. D. Brantley, W. H. Beasley, E. P. Krider e C. D. Weidman, **"Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurements"** em *J. of Geophysical Research*, 84, 1979.

D. M. Mach, e W. D. Rust, **"Photoelectric return-stroke velocity and peak current estimates in natural an triggered lightning"**, *J. of Geophysical Research* 94, 1989.

D. J. Malan e H. Collins, **"Progressive Lightning III - the fine structure of return lightning strokes"** em *Proc. Roy. Soc.*, A162, 1937.

V. Mazur, **"Physical Processes During Development of Lightning Flashes"** em *Proc. of International Conference on Ground and Earthing & Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity (Ground 2002 & 3rd WAE)*, 2002.

V. Mazur, P. R. Krehbiel e X. Shao, **"Correlated high-speed video and radio interferometric observations of a cloud-to-ground lightning flash"** em *J. of Geophysical Research*, 100, 1995.

B. G. Melander, **"Effects of Tower Characteristics on Lightning Arc Measurements"** em *Proc. of 1984 Int. Conf. on Lightning and Static Electricity*, pp. 34/1-34/22, 1984.

C. R. Mesquita, **"Investigação de Sistemas de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas"**, dissertação de Mestrado, PPGEE-UFGM, 2001.

C. R. Mesquita, **"Nova Metodologia para Calibração de Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas"**, tese de Doutorado, PPGEE-UFGM, 2006.

C. R. Mesquita, R. N. Dias, S. Visacro e A. Cazetta F., "**Lightning Parameters Obtained by LLS in MG State: Analyses and Discussion**", em *Proc. of International Conference on Ground and Earthing & International Conference on Lightning Physics and Effects (Ground 2006 & 2nd LPE)*, 2006.

A. Nag e V. A. Rakov, "**Electric Field Pulse Trains Occurring Prior to the First Stroke in Cloud-to-Ground Lightning**" em *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, 51, 2009.

A. L. F. Naime, "**Contribuição ao Estudo dos Erros dos Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas: Proposta de Antena de Medição Indireta de Corrente de Retorno**", dissertação de Mestrado, PPGEE-UFGM, 2001.

R. Z. de Oliveira, "**Sistema para Medição de Parâmetros de Canais Ascendentes de Descargas Atmosféricas na Estação de Pesquisa do Morro do Cachimbo**", dissertação de Mestrado, PPGEE-UFGM, 2007.

D. E. Proctor, R. Uytendogaardt e B. M. Meredith, "**VHF radio pictures of lightning discharges to ground**" em *Journal of Geophysical Research*, 93, 1988.

V. A. Rakov e M. A. Uman, "**Waveforms of first and subsequent leaders in negative lightning flashes**" em *J. of Geophysical Research*, 95, 1990a.

V. A. Rakov e M. A. Uman, "**Some properties of negative cloud-to-ground lightning flashes versus stroke order**" em *J. of Geophysical Research*, 95, 1990b.

V. A. Rakov e M. A. Uman, "**Lightning: Physics and Effects**" por Cambridge University Press, 2003.

V. A. Rakov, M. A. Uman, G. R. Hoffman, M. W. Masters e M. Brook, "**Burst of pulses in lightning electromagnetic radiation: observation an implications for lightning tests standards**" em *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, 38, 1996.

V. A. Rakov, M. A. Uman, D. M. Jordan e C. A. Priore, **“Ratio of leader to return stroke Field change for first and subsequent lightning strokes”** em *J. of Geophysical Research*, 95, 1990.

C. Rhodes e P. R. Krehbiel **“Interferometric observations of a single stroke cloud-to-ground flash”** em *Geophysical Research Letters*, 16, 1989.

P. L. Rustan, M. A. Uman, D. G. Childers, W. H. Beasley e C. L. Lennon, **“Lightning source locations from VHF radiation data for a flash at Kennedy Space Center”** em *J. of Geophysical Research*, 85, 1980.

B. F. J. Schonland, **“Progressive lightning, part 4, The discharge mechanisms”** em *Proc. Roy. Soc.*, A164, 1938.

B. F. J. Schonland, **“The lightning discharge”** em *Handbuch der Physik*, vol. 22, 1956.

B. F. J. Schonland, D. J. Malan e H. Collins, **“Progressive Lightning, part 6”** em *Proc. Roy. Soc.*, A168, 1938.

M. A. O. Schroeder, **“Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas: Aplicação às Medições da Estação do Morro do Cachimbo”**, tese de Doutorado, PPGEE-UFMG, 2001.

X. M. Shao, P. R. Krehbiel, R. J. Thomas e W. Rison, **“Radio interferometric observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida”** em *J. of Geophysical Research*, 100, 1995.

F. H. Silveira, **“Modelagem para Cálculo de Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas”**, tese de Doutorado, PPGEE-UFMG, 2006.

F. H. Silveira e S. Visacro, **“On the lightning-induced voltage amplitude: first versus**

subsequent negative strokes” em *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 51, no. 3, doi:10.1109/TEMC.2009.2025268, 2009.

F. H. Silveira, A. R. de Conti, S. Visacro e J. V. P Duarte, **“Tensões Induzidas por Raios no Sistema Elétrico: Que Fatores São Mais Importantes?”** em *Eletricidade Moderna*, v. 371, p. 106-119, 2005.

J. L. Silvino, C. R. Mesquita e S. Visacro, **“Non-direct lightning current measurement for lightning location systems calibration”** em *Electronics Letters*, v. 39, n. 6, 2003.

A. Soares J., **“Modelagem de Linhas de Transmissão para Avaliação de Desempenho frente a Descargas Atmosféricas”**, tese de Doutorado, PPGEE-UFMG, 2001

A. Soares J., M. A. O. Schroeder e S. Visacro, **“Transient voltages in transmission lines caused by direct lightning strikes”** em *IEEE Trans. Power Del.*, vol.20, no.2, doi: 10.1109/TPWRD.2004.839214, 2005.

E. M. Thomson, M. A. Uman e W. H. Beasley, **“Speed and current for lightning stepped leaders near ground as determined from electric field records”** em *J. of Geophysical Research*, 90, 1985.

R. Thottappillil, J. D. Goldberg, V. A. Rakov, M. A. Uman, R. J. Fischer e G. H. Schnetzer, **“Properties of M components from current measured at triggered lightning channel base”** em *J. of Geophysical Research*, 100, 1995.

R. Thottappillil, V. A. Rakov e M. A. Uman, **“K and M changes in close lightning ground flashes in Florida”** em *J. of Geophysical Research*, 95, 1990.

S. Visacro, **“A representative curve for lightning current waveshape of first negative stroke”**, em *Geophysical Research Letters*, 31, no. 7, L07112, DOI:10.1029/2004.GL019642, 2003.

S. Visacro, **“Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia”** por Artliber Editora, 2005.

S. Visacro e F. H. Silveira, **“Lightning Current Waves at Short Instrumented Towers: The Influence of Sensor Position”** em *Geophysical Research Letters*, 32, 2005.

S. Visacro, M. A. O. Schroeder, A. Soares, L. C. L. Cherchiglia e V. J. Sousa, **“Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station”**, *J. of Geophysical Research*, 109, 2004.

S. Visacro, M. H. M. Vale, G. M. Corrêa e A. M. N. Teixeira, **“The Early Phase Of Lightning Currents Measured In A Short Tower Associated With Direct And Nearby Lightning Strikes”** em *J. of Geophysical Research*, doi:10.1029/2010JD014097, in press, 2010.

D. Wang, N. Takagi, T. Watanabe, V. A. Rakov e M. A. Uman, **“Luminosity waves in branched channel of two negative lightning flashes”** em *J. Atmos. Electr.*, 20, 1999.

C. D. Weidman, **“The submicrosecond structure of lightning radiation fields”**, tese para Ph.D., University of Arizona, 1982.

C. D. Weidman e E. P. Krider, **“The fine structure of lightning return stroke waveforms”** em *J. of Geophysical Research* 83, no. C12, 1978.

S. Yokoyama, K. Miyake, T. Suzuki e S. Kanao, **“Winter lightning on Japan Sea coast – development of measuring system on progressive feature of lightning discharge”** em *IEEE Trans. on Power Delivery*, 5, 1990.
