

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Centro de Pesquisas e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Guilherme Murici Corrêa

Medição e análise de campos elétricos associados às correntes de descargas atmosféricas

Belo Horizonte
2010

Guilherme Murici Corrêa

Medição e análise de campos elétricos associados às correntes de descargas atmosféricas

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.

Orientador: Prof. Dr. Silvério Visacro Filho

Belo Horizonte
2010

C824m Corrêa, Guilherme Murici.

Medição e análise de campos elétricos associados às correntes de descargas atmosférica / Guilherme Murici Corrêa – Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.

Orientador: Silvério Visacro Filho

100 p.

Dissertação (mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica - Escola de Engenharia / UFMG

1. Descargas atmosféricas. 2. Campos Elétricos. 3. Corrente de retorno.
4. Sistemas de energia elétrica. 5. Proteção de sistemas elétricos.

I Título. II. Orientador.

CDD: 621.319 CDU: 621.3:551.594

Elaborada por: Maní Atticiati M. W. Silva – CRB 8/9610



ATA DA 631 DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO do aluno **Guilherme Murici Corrêa** registro de matrícula de número 2008661690. Às 14:00 horas do dia 30 (trinta) do mês de agosto de 2010, reuniu-se na Escola de Engenharia da UFMG a Comissão Examinadora da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO para julgar, em exame final, o trabalho intitulado "**Medição e Análise de Campos Elétricos Associados à Correntes de Descargas Atmosféricas**" da Área de Concentração em Engenharia de Potência, Linha de Pesquisa Sistemas de Energia Elétrica. O Prof. Silvério Visacro Filho, orientador do aluno, abriu a sessão apresentando os membros da Comissão e, dando continuidade aos trabalhos, informou aos presentes que, de acordo com o Regulamento do Programa no seu Art. 8.16, será considerado APROVADO na defesa da Dissertação de Mestrado o candidato que obtiver a aprovação unânime dos membros da Comissão Examinadora. Em seguida deu início à apresentação do trabalho pelo Candidato. Ao final da apresentação seguiu-se a arguição do candidato pelos examinadores. Logo após o término da arguição a Comissão Examinadora se reuniu, sem a presença do Candidato e do público, e elegeu o Prof. Silvério Visacro Filho para presidir a fase de avaliação do trabalho, constituída de deliberação individual de APROVAÇÃO ou de REPROVAÇÃO e expedição do resultado final. As deliberações individuais de cada membro da Comissão Examinadora foram as seguintes:

Membros da Comissão Examinadora	Instituição de Origem	Deliberação	Assinatura
Prof./Pesq. Silvério Visacro Filho – Dr. Orientador	DEE/UFMG	Aprovado	
Prof./Pesq. Alberto Resende De Conti - Dr. Membro	DEE/UFMG	Aprovado	
Prof./Pesq. Cláudia Rejane de Mesquita – Dra. Membro	LRC/UFMG	Aprovado	

Tendo como base as deliberações dos membros da Comissão Examinadora a Dissertação de Mestrado foi Aprovada. O resultado final de aprovação foi comunicado publicamente ao Candidato pelo Presidente da Comissão, ressaltando que a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica fica condicionada à entrega do TEXTO FINAL da Dissertação de Mestrado. O Candidato terá um prazo máximo de 30 (trinta) dias, a partir desta data, para fazer as CORREÇÕES DE FORMA e entregar o texto final da Dissertação de Mestrado na secretaria do PPGEE/UFMG. As correções de forma exigidas pelos membros da Comissão Examinadora deverão ser registradas em um exemplar do texto da Dissertação de Mestrado, cuja verificação ficará sob a responsabilidade do Presidente da Banca Examinadora. Nada mais havendo a tratar o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada pelo Presidente da Comissão Examinadora. Belo Horizonte, 30 de agosto de 2010.

ASSINATURA DO PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA

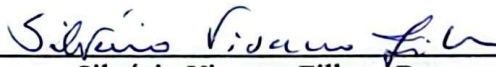
**"Medição e Análise de Campos Elétricos
Associados à Correntes de Descargas Atmosféricas"**

Guilherme Murici Corrêa

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

Aprovada em 30 de agosto de 2010.

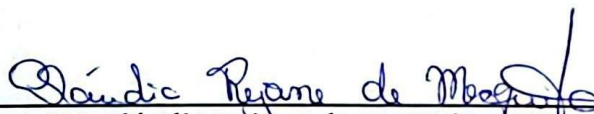
Por:



Silvério Visacro Filho - Dr.
Prof. DEE/UFMG - Orientador



Alberto Resende De Conti - Dr.
Prof. DEE/UFMG



Cláudia Rejane de Mesquita - Dra.
Pesq. LRC/UFMG

AGRADECIMENTOS

Inúmeras foram as pessoas que contribuíram para a conclusão de mais uma etapa da minha formação. Dentre todas, gostaria de destacar algumas que foram fundamentais e que me motivaram ao longo destes dois anos.

Em primeiro lugar, o meu professor orientador Silvério Visacro por mostrar os caminhos da pesquisa e vida acadêmica, contribuindo de uma maneira singular para meu aprendizado como engenheiro e pesquisador. Seu conhecimento e seu diálogo com outros autores favoreceram um ambiente de aprendizado com pesquisadores de todo o mundo e sempre me cativou para a realização deste trabalho.

O contato internacional proporcionado pelo professor Silvério permitiu que eu conhecesse e trabalhasse, em particular, com dois pesquisadores europeus radicados nos Estados Unidos que me mostraram o contexto mundial da pesquisa de descargas atmosféricas. Tive a oportunidade de trabalhar com pessoas maravilhosas como Vladslav Mazur e Lothar Ruhnke, este que considero com especial apreço e a quem agradeço profundamente por toda a dedicação em me ensinar a física e os meios para compreender a dinâmica das descargas atmosféricas.

Também agradeço a toda a equipe do LRC: ao Renato Zica por me orientar no início do trabalho e permitir que eu continuasse do ponto em que ele encerrou o seu, ao André Teixeira e demais colaboradores do laboratório por dividir as inúmeras visitas ao Morro do Cachimbo e diversos trabalhos que realizamos em parceria.

Todos esses me apoiaram dentro da universidade, mas fora tenho que agradecer especialmente à minha mãe por me motivar e engajar todos os dias destes dois anos, me mostrando a importância deste trabalho e me incentivando a focar nos meus objetivos. Ela foi a principal apoiadora deste trabalho de mestrado, pois nunca poupou esforços para que eu concluísse esta etapa.

Agradeço também ao meu pai por me ajudar nas difíceis decisões que foram tomadas durante o período, sempre mostrando seu interesse pelo meu trabalho e buscando me ajudar de todas as formas.

Agradeço também aos meus irmãos Alexandre e Mateus e por último, faço um agradecimento especial à minha avó Terezinha. Ela acompanhou meu desenvolvimento pessoal e acadêmico de perto e mostrou as belezas do caminho do conhecimento e dos estudos. Professora, foi fora da sala de aula que me ensinou alguns dos valores que considero fundamentais para a vida.

RESUMO

A fase do fenômeno descarga atmosférica de maior interesse para a engenharia de proteção refere-se à etapa final da formação do canal de descarga, em particular, ao surgimento e a evolução do canal ascendente, cujo encontro com o canal precursor descendente materializa o evento de descarga.

O canal ascendente que se encontra com o canal precursor define o ponto de incidência da descarga, razão pela qual existe um imenso interesse científico em avaliar as condições físicas que determinam seu surgimento e evolução.

Tal aspecto motiva a investigação do comportamento do campo elétrico ao nível do solo nos instantes que antecedem a descarga, bem como das variações deste campo durante os diversos processos que ocorrem em sua formação, incluindo o fluxo das correntes de retorno. O monitoramento e a análise destes parâmetros podem fornecer subsídios relevantes para a formulação de modelos matemáticos capazes de descrever o estágio final da formação das descargas atmosféricas.

Neste contexto, esta dissertação busca trazer uma contribuição relativa à análise da forma de onda de campo elétrico gerado pelas descargas atmosféricas e de sua associação com as correntes de retorno.

Para alcançar este objetivo, foi desenvolvido no Lightning Research Center¹ um sistema automatizado de medição de campos elétricos que foi instalado próximo à torre instrumentada do Morro do Cachimbo². Esse sistema de medição é descrito, com o detalhamento da instrumentação utilizada e das modificações e melhorias realizadas ao longo deste trabalho para permitir o registro simultâneo das formas de onda de correntes e de campo elétrico de descargas atmosféricas.

¹ Lightning Research Center (LRC) é o Centro de Pesquisa em Descargas Atmosféricas construído em parceria entre a UFMG e a CEMIG.

² A estação do Morro do Cachimbo, ou MCS (Morro do Cachimbo Station) como é normalmente citada em referências internacionais é a torre instrumentada localizada na região metropolitana de Belo Horizonte.

O sistema de medição foi utilizado em três temporadas de tempestades, as campanhas de medição, para adquirir um grande número de amostras de formas onda de campo elétrico gerados por descargas incidentes em um raio de até 20 km da Estação e, em alguns poucos casos, das formas de onda de correntes correspondentes às descargas que incidiram na torre ou em suas proximidades.

Este trabalho apresenta uma parcela dos resultados das campanhas de medição e, particularmente, são analisados exemplos representativos de formas de onda de campo elétrico similares a casos citados como referência na literatura.

Palavras-chave: descargas atmosféricas; campos elétricos; corrente de retorno; sistemas de energia elétrica; proteção de sistemas elétricos.

ABSTRACT

In terms of phenomenology, the main interest of lightning protection is the final phase of lightning channel development, particularly, the inception and evolution of the upward leader. These phases are important because the attachment between such leader and the downward stepped leader determines the striking point to the ground. There is a huge scientific interest in determining the physical conditions that generates the inception and development of this leader.

This scenario motivates the investigation of the electric field behavior at ground level during the period preceding the lightning discharge and also the variations of this field during the several processes involved in the lightning development including the flow of the return stroke currents. The recording and analysis of such parameters may provide the elements required to formulate models that describe the last stage of the lightning discharge.

In this scenario, this thesis contributes with the analyses of lightning-related electric field waveforms and their association with return stroke currents waveforms. In order to achieve such goal, as a first step, an automated electric-field measuring system was developed in the LRC and installed at Morro do Cachimbo Station, nearby the 60-m-high instrumented tower. This measuring system is described together with its instrumentation and the improvements developed to allow the simultaneous record of field and current waveforms.

This system was used during three lightning seasons, allowing the acquisition of a large number of electric-field waveforms that were yielded by lightning strikes to the ground in the 20-km radius surroundings. In some cases, the corresponding return stroke current waveforms were also measured.

Part of the results obtained in the measurement campaigns is presented and, particularly, some representative cases are analyzed in detail with electric-field waveforms similar to the references mentioned in literature.

Keywords: lightning strikes; electric fields; return current; electrical power systems; protection of electrical systems.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Relevância do tema	12
1.2 Objetivo	14
1.3 Organização do texto	14
2 CAMPOS ELÉTRICOS ASSOCIADOS AOS PROCESSOS ENVOLVIDOS NA FORMAÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	16
2.1 Introdução	16
2.2 Breve introdução sobre a eletrificação das nuvens	17
2.3 Configuração típica da distribuição de cargas nas nuvens	21
2.4 Perfis de campo Elétrico associados às descargas atmosféricas	25
2.5 Convenção de sinais do campo elétrico	32
2.6 Perfis de Campo elétrico vertical antes da formação das descargas atmosféricas segundo o modelo do tripolo	34
2.7 Variações de campo elétrico associadas às descargas atmosféricas	42
2.7.1 Considerações gerais	42
2.7.2 Variações de campo associadas aos Stepped Leaders	44
2.7.2.1 Ruptura inicial (<i>Breakdown</i>)	45
2.7.2.2 Estágio intermediário	47
2.7.2.3 Canal precursor de descarga (<i>Leader</i>)	47
2.7.3 Corrente de Retorno	51
2.7.4 Dart Leader	55
2.7.5 Componente contínua	56
2.7.6 Processos J E K	58
3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DA ESTAÇÃO DO MORRO DO CACHIMBO	60
3.1 Introdução	60
3.1.1 Breve histórico da Estação de Pesquisas do Morro do Cachimbo	60

3.1.2 A estação amplia e aperfeiçoa seu conjunto de instrumentos	62
3.2 Sistemas de medição de correntes	63
3.3 Sistemas de medição de campo elétrico	68
3.3.1 Breve histórico sobre as medições de campo elétrico na estação de pesquisa do Morro do Cachimbo	68
3.3.2 Descrição dos sensores e do condicionamento dos sinais	70
3.3.3 Modificação e melhorias realizadas	75
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS DAS MEDIÇÕES DE CAMPO ELÉTRICO	79
4.1 Introdução	79
4.1.1 Breve histórico das medições de campo elétrico na Estação de Pesquisas do Morro do Cachimbo	79
4.2 Análises de registros de campo elétrico selecionados	82
4.2.1 Análises de registros de campo elétrico de descargas únicas	82
4.2.2 Análises de registros de campo elétrico de descargas múltiplas	90
4.2.3 Análises de registros de campo elétrico de componentes contínuas	93
4.3 Análises correlatas de registros de campo elétrico e corrente	96
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	106
5.1 Considerações finais e conclusões	106
5.2 Proposta de continuidade e perspectivas futuras	108
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

1 INTRODUÇÃO

1.1 Relevância do tema

A crescente demanda por energia elétrica, motivada pelos avanços tecnológicos, exige, a cada dia que passa, melhorias na qualidade e na entrega dessa energia. Interrupções no fornecimento e distúrbios na forma de onda da tensão provocam, muitas vezes, queima de equipamentos e paradas na produção industrial, o que gera prejuízos e encarece produtos.

De um modo geral, as descargas atmosféricas constituem a principal causa de desligamentos não programados dos sistemas de energia elétrica. Dados da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) revelam que mais de 50% das interrupções no fornecimento de energia ocorridas no Estado de Minas Gerais são devidas às descargas atmosféricas que atingem diretamente os sistemas elétricos ou que, ao incidirem em suas proximidades, os solicitam através de induções de elevadas tensões [1].

Estudos vêm sendo conduzidos ao redor do mundo com o objetivo de minimizar os danos causados pelas descargas atmosféricas e propiciar mais segurança e confiabilidade aos sistemas elétricos de potência. Os parâmetros de descargas

atmosféricas vêm sendo coletados em diversas investigações sobre o fenômeno realizadas em torres instrumentadas e laboratórios especializados. Até certo ponto, no que concerne à caracterização de parâmetros associados, são escassas as investigações relativas às etapas anteriores à descarga de retorno, as quais envolvem a formação dos canais precursores de descarga, embora seu princípio seja bem relatado.

Por outro lado, os efeitos dos campos eletromagnéticos associados aos raios têm importância cada vez maior no estudo das descargas atmosféricas. Sabe-se hoje que, além dos casos em que ocorre a incidência direta e, portanto o fluxo de corrente é transmitido integralmente no ponto de impacto, são relatados danos causados por descargas próximas que induzem campos eletromagnéticos elevados e possibilitam a formação de canais precursores de descarga a partir de estruturas não atingidas diretamente.

Neste cenário torna-se necessário compreender e relacionar as formas de onda de campo eletromagnético com as correntes de retorno que as originam. Alguns trabalhos encontrados na literatura [2,3] buscam relacionar como os campos eletromagnéticos são produzidos a partir das correntes dos raios e como estes se propagam dependendo das características espaciais e topográficas.

Tem-se a expectativa de que o melhor conhecimento da relação entre as descargas atmosféricas e seus campos eletromagnéticos associados permitirá, no futuro, o aprimoramento das práticas de blindagem e de proteção contra os raios. Novas configurações baseadas na instalação de captadores, constituição de corpos elevados ou estruturas reticuladas que formem pontos preferenciais de surgimento de canais precursores de descarga exemplificam possíveis metodologias de proteção.

Com estes comentários iniciais, denota-se a relevância do tema em investigação: a descarga atmosférica e sua formação, analisada sob o ponto de vista da análise dos campos elétricos associados.

1.2 Objetivo

O objetivo fundamental desta dissertação de mestrado consiste no desenvolvimento e implantação de um sistema de medição baseado na detecção e registro de campos elétricos, para fins de caracterização de parâmetros de canais formadores de descargas atmosféricas nuvem-solo, bem como a apresentação de resultados da aplicação.

Pretende-se com isso contribuir para a análise do fenômeno a partir das informações conjuntas fornecidas pelas formas de onda da corrente de retorno e dos campos elétricos associados à mesma.

1.3 Organização do texto

Nesta dissertação, procurou-se evitar a repetição de assuntos já considerados em trabalhos consagrados na literatura técnica sobre o tema das descargas atmosféricas. Tais trabalhos que tratam os pontos relevantes sobre o tema são referenciados quando necessário.

Nessa perspectiva, buscou-se a apresentação de um texto conciso, dedicado objetivamente ao foco do trabalho. O texto da dissertação foi dividido em cinco capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

No capítulo 2, é apresentado o estado da arte do tema. O campo elétrico associado às descargas atmosféricas é abordado em todas as etapas de desenvolvimento e ocorrência das descargas. O desenvolvimento do capítulo segue a ordem cronológica do desenvolvimento de um evento, iniciando com a eletrificação das nuvens e finalizando com o fluxo de uma corrente de retorno.

No capítulo 3, é apresentada uma descrição detalhada da estação de pesquisas e

torre instrumentada do Morro do Cachimbo, local em que os dados experimentais foram obtidos. Todas as etapas de concepção, desenvolvimento e instalação do sistema de medição que inclui as medições de campos elétricos, correntes e aquisição de imagens são detalhadamente abordados.

No capítulo 4, são apresentados exemplos comentados de registros adquiridos nos sistemas de medição descritos no capítulo 3. Os resultados são analisados de acordo com a teoria descrita no capítulo 2 e comparados com referências da literatura.

No capítulo 5, onde se apresenta a conclusão do trabalho e resumem-se as principais contribuições realizadas nesta dissertação. Também são exploradas as propostas de continuidade e desdobramentos dos resultados obtidos.

2 CAMPOS ELÉTRICOS ASSOCIADOS AOS PROCESSOS ENVOLVIDOS NA FORMAÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

2.1 Introdução

O objetivo deste capítulo consiste na apresentação de considerações fundamentais relativas aos campos elétricos observados no nível do solo associados aos processos envolvidos na formação das descargas atmosféricas. Este tema representa uma ampla área do conhecimento relativo aos raios que abrange não só os conceitos eletromagnéticos, mas também conhecimentos de outras áreas como climatologia, termodinâmica e química, entre outros.

Como tema está associado à distribuição de cargas elétricas nas nuvens de tempestade, são inicialmente abordados os conceitos relativos à formação e eletrificação das nuvens, de maneira breve e simplificada apenas para a contextualização do cenário típico encontrado nas nuvens de tempestade nos instantes anteriores à ocorrência das descargas atmosféricas. Pode-se dizer que, para a finalidade dos estudos desenvolvidos nesta dissertação, o amplo tema “eletrificação das nuvens” foge ao escopo do trabalho. Desta forma, é apresentada apenas uma visão geral dos principais mecanismos e modelos mais aceitos pela comunidade científica no momento da escrita desta dissertação.

Em seguida, o campo elétrico gerado pela distribuição de cargas das nuvens é analisado

enfatizando-se os aspectos mais importantes para a compreensão dos registros obtidos em estações de medição e pesquisa de descargas atmosféricas. Esta parte do capítulo apresenta a teoria básica que possibilita a interpretação da parcela eletrostática dos campos elétricos medidos a uma pequena distância da fonte. Esta é a parcela preponderante para os registros analisados neste trabalho, como indicado em capítulos posteriores.

Por fim, alguns registros de campo elétrico, obtidos a partir de referências selecionadas, são analisados de maneira qualitativa com o objetivo de formar uma base de exemplos para comparação com os dados obtidos na Estação de Pesquisas de Raios do Morro do Cachimbo (MCS).

2.2 Breve introdução sobre a eletrificação das nuvens

As principais nuvens de tempestade produtoras de raios são as nuvens cumulonimbus, encontradas com maior frequência nas regiões equatoriais e litorâneas. Essas nuvens são geralmente formadas pelo encontro de frentes frias com frentes quentes ou sobre regiões da costa que foram expostas ao calor durante o dia, produzindo massas quentes ascendentes que se locomovem e interagem com outras massas tornando-se úmidas [4].

Basicamente, dentro de uma nuvem de tempestade, existe um ambiente em que coexistem as correntes de vento, as partículas de ar úmido e os pequenos cristais de gelo, todos submetidos ao campo gravitacional terrestre e a um gradiente de temperatura característico. A interação de todos estes elementos produz, de forma ainda não compreendida exatamente, regiões eletrificadas nas nuvens [5].

Segundo [4], existem dois principais mecanismos de eletrificação das nuvens. Tratam-se dos mecanismos de colisão e de convecção. O mecanismo de colisão é conhecido em inglês como *non-inductive graupel-ice collision mechanism*. Este nome é devido ao fato de que as colisões referidas neste mecanismo são entre pequenos cristais de gelo com partículas de água supercongelada¹. Já o mecanismo de convecção recebe este nome por afirmar que

¹ Água em estado líquido mesmo em temperaturas inferiores ao ponto de congelamento da água.

eletrificação das nuvens é consequência de processos convectivos que ocorrem no interior das nuvens. Existe um crescente consenso de que o mecanismo de colisão é o que melhor explica os processos de eletrificação das nuvens. Abaixo, encontra-se uma breve descrição de ambos os mecanismos.

Mecanismo da convecção: Esta hipótese considera a existência de três fontes de geração de cargas elétricas. A primeira delas é originada nas regiões de bom tempo, com pequenas concentrações de cargas positivas no ar, devido ao campo elétrico natural da Terra. A segunda é oriunda do efeito corona² próximo ao nível do solo, que também produz cargas positivas, e a última fonte de cargas são os raios cósmicos³, que atingem as camadas mais altas das nuvens e geram cargas negativas.

À medida que a nuvem se desenvolve, as cargas positivas são elevadas do lado de fora da nuvem para o topo através de correntes de ar ascendentes. As cargas negativas geradas pelos raios cósmicos são levadas para a base pelo resfriamento do ar e contribuem para o aumento do campo elétrico no nível do solo e conseqüentemente para o aumento das cargas positivas geradas pelo efeito corona. Isso leva à realimentação do processo. A separação das cargas é creditada à chamada convecção organizada, que movimenta as cargas negativas superiores para baixo e eleva as cargas positivas para as camadas superiores das nuvens.

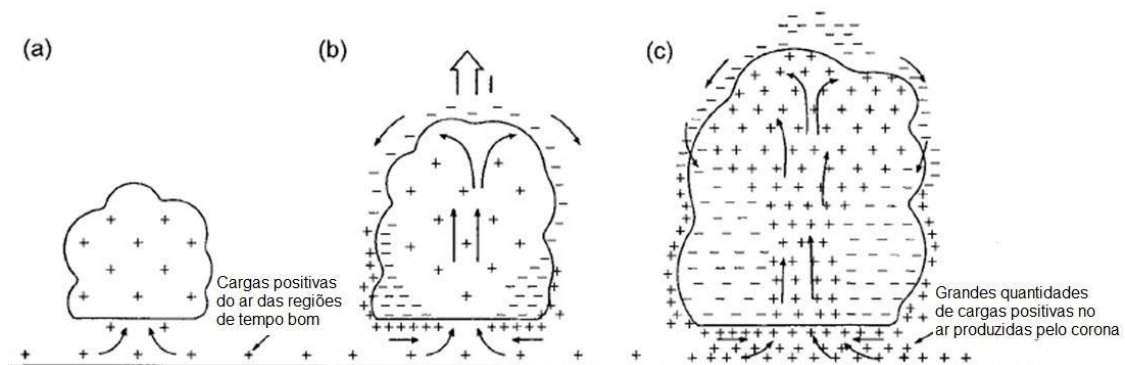


Figura 2.1 – Diagrama ilustrativo do mecanismo de convecção. Adaptado de [4]

² Efeito corona é o fenômeno em que micro-arcos elétricos são formados entre condutores e moléculas de ar ionizadas próximas aos mesmos. Estes micro-arcos ocorrem devido ao campo elétrico gerado pelo alto potencial em que o condutor está submetido [23].

³ Os raios cósmicos são partículas altamente energéticas produzidas nas reações nucleares estelares. Estas partículas são constituídas normalmente por partes dos núcleos de hidrogênio e/ou hélio e quando atingem as altas camadas da atmosfera da Terra produzem cargas negativas (i.e. elétrons) ao se chocar com moléculas de oxigênio e hidrogênio [24].

Alguns experimentos foram realizados na tentativa de comprovar este mecanismo [6,7], porém os resultados obtidos não dão suporte às hipóteses propostas pelo mecanismo. Segundo [7], este mecanismo talvez possa explicar a existência do centro de cargas positivo inferior, também conhecido como LP (*lower positive*), que é discutido mais a frente.

Mecanismo da colisão (“Graupel-ice”): Segundo este mecanismo, existem dois processos distintos que configuram o carregamento das nuvens. O primeiro deles é responsável pela eletrificação das partículas líquidas existentes nas nuvens, também chamados de hidrometeoros. Trata-se de um processo que ocorre em uma escala pequena, resultando no carregamento de cada partícula individualmente. Já o segundo processo ocorre em larga escala, sendo responsável pela separação espacial das cargas geradas. Poder-se-ia pensar que a geração de cargas seria rapidamente neutralizada pela recombinação dos íons recém-criados, porém a razão pela qual os centros de carga se mantêm separados após seus processos de formação é atribuída ao fato de que o ambiente interno da nuvem é considerado um bom isolante.

Portanto, segundo este mecanismo, o carregamento das nuvens é originado a partir dos choques mecânicos entre as partículas líquidas super congeladas (*i.e. Graupel*)⁴ e pequenos cristais de gelo em ambientes úmidos. O conceito de hidrometeoros é fundamental para o esclarecimento deste mecanismo e é detalhado a seguir.

A nuvem produz um cenário típico em que coexistem os estados líquido, sólido e gasoso da água. As partículas de água condensada “flutuam” neste ambiente, sujeitas às correntes de ar e à aceleração da gravidade. À medida que estas partículas se unem umas as outras e crescem, a tendência é que seu peso prepondere sobre as correntes de ar e que ocorra a precipitação desta partícula. Estas “gotinhas” são denominadas partículas de precipitação e são geralmente maiores que as partículas condensadas da nuvem. Quando uma partícula de precipitação atinge uma velocidade de queda superior a 0,3 m/s esta partícula recebe o nome de hidrometeoro.

⁴ A palavra *Graupel* possui outros significados diferentes de hidrometeoro em inglês. Contudo, ambas podem ser utilizadas para expressar as partículas líquidas de precipitação nas nuvens.

Os hidrometeoros (*Graupel*) são mais pesados do que as partículas de precipitação e caem em um ambiente de pequenos cristais de gelo misturados com gotículas de água supercongelada. Estas gotículas permanecerão líquidas até tocarem os cristais de gelo, no momento em que grudam e passam a fazer parte destes cristais. Este processo é denominado *sinclero* ou *sanceno*, em inglês, *riming*.

Experimentos de laboratório mostram que para temperaturas abaixo de um valor crítico (chamado temperatura de reversão, T_R), os choques entre hidrometeoros e cristais de gelo geram um carregamento negativo. Já para temperaturas superiores à T_R , os choques geram um carregamento positivo dos hidrometeoros. A faixa de valores de referência encontrado na literatura para a T_R é entre -10°C e -20°C [4].

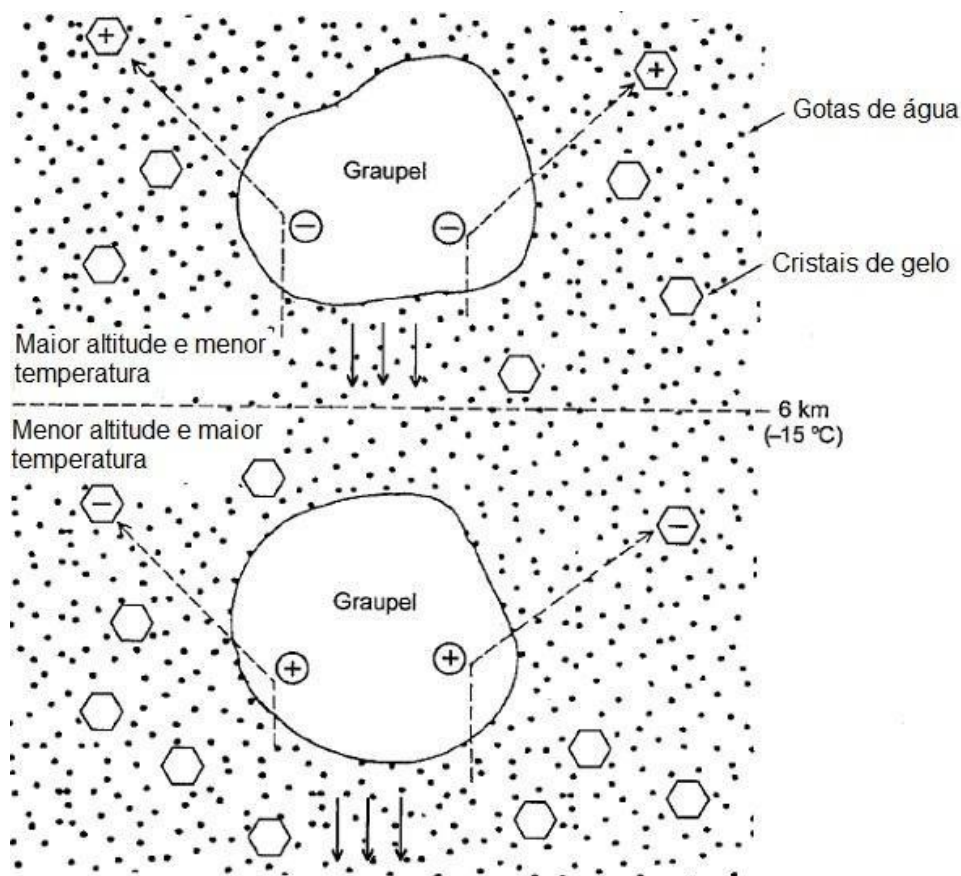


Figura 2.2 – Diagrama ilustrativo do mecanismo de colisão. Adaptado de [4]

Nos eventuais casos em que os choques produzissem carregamento positivo do hidrometeoro mesmo a temperaturas inferiores à T_R , haveria um acúmulo de cargas

positivas na parte inferior da nuvem, outra hipótese existente para a formação do centro positivo de cargas inferior, abordado mais a frente. Além disso, é possível que exista mais de uma T_R quando os hidrometeoros são muito pequenos ($< 10 \mu\text{m}$), fato que poderia explicar a existência de várias camadas de carga nas nuvens, como mostram alguns dos resultados de medições de campo elétrico *in situ*, discutidos mais a frente.

Acredita-se que a separação das polaridades está relacionada às taxas de crescimento dos hidrometeoros e dos cristais de gelo. Não há consenso na física detalhada do processo. Os resultados dos experimentos laboratoriais indicam que os choques entre hidrometeoros e cristais de gelo na presença de ambientes úmidos produzem distribuições de carga compatíveis com o modelo simplificado do tripolo, uma aproximação que é muito utilizada para ilustrar a distribuição de cargas da nuvem e é abordada mais a frente neste capítulo. Entretanto, sabe-se que os experimentos estão limitados às condições de laboratório e às dificuldades de se reproduzir o ambiente de uma nuvem.

Atualmente existe um crescente consenso de que o mecanismo da colisão é o dominante na formação de cargas nas nuvens de tempestade, pelo menos nos seus estágios iniciais de formação [4]. É possível que outros métodos de eletrificação e separação de cargas se tornem mais importantes nos estágios mais avançados de desenvolvimento das nuvens eletrificadas como, por exemplo, o mecanismo da convecção.

2.3 Configuração típica da distribuição de cargas nas nuvens

Após a breve menção dos mecanismos que produzem o carregamento elétrico das nuvens, fica clara a complexidade do estudo do campo elétrico gerado pelos centros de carga, dada a aleatoriedade dos processos de eletrificação das nuvens. Contudo, para simplificar este cenário, foi adotada uma aproximação [4] que reproduz as características básicas observadas na maioria dos casos e que facilita a compreensão dos modelos mais utilizados na literatura.

Várias pesquisas atmosféricas foram conduzidas entre as décadas de 1960 e 2000 [4,5] até

que foi assumida como padrão uma distribuição de cargas que é característica das nuvens de tempestade após as etapas de desenvolvimento e eletrificação da nuvem. Esta configuração também ficou conhecida como o estágio final da formação de uma tempestade. Neste cenário, existem bolsões de carga negativa e bolsões de carga positiva que, agrupados, formam um dipolo elétrico no qual as cargas negativas estão presentes na parte inferior da nuvem enquanto a parte superior da nuvem possui carga predominantemente positiva.

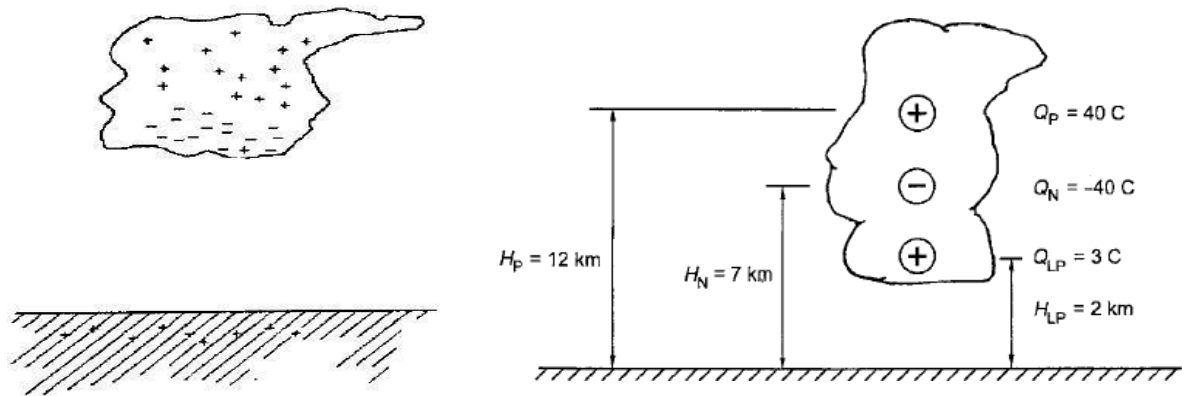


Figura 2.3 – Diagrama ilustrativo da distribuição de cargas padrão (esquerda) de uma nuvem eletricamente carregada; e do modelo do tripolo (direita). Adaptado de [4]

As cargas positivas estão, na maioria dos casos, espalhadas por um grande volume localizado a uma altitude superior a 10 km e totalizam algumas dezenas de Coulomb [4]. Já as cargas negativas estão confinadas a uma faixa da nuvem menos espessa que possui sua altitude muito relacionada com a região da Terra em que se encontra, com características do relevo e também com o tamanho da nuvem. A quantidade de cargas negativas é também da ordem de algumas dezenas de Coulomb. Em alguns casos, acredita-se na existência de bolsões de cargas positivas de volume e carga reduzidos localizados abaixo da faixa das cargas negativas, próximas à base da nuvem, com concentração normalmente inferior a 10 C.

Várias medições de campo elétrico ao nível do solo, nas proximidades e no interior das nuvens, vêm sendo realizadas desde o século passado com o objetivo de estabelecer a localização média e a quantidade de carga média presente nas nuvens produtoras de raios. Estas referências foram reunidas para produzir o que é conhecido como modelo do tripolo,

(Figura 2.3), uma aproximação simplificada da distribuição de cargas das nuvens. A compreensão deste modelo é fundamental para o entendimento da distribuição do campo elétrico produzido pelas cargas nas nuvens.

Contudo, antes de avaliar o campo produzido pelo modelo do tripolo, convém analisar suas qualidades e pontos fracos de acordo com as informações obtidas nas medições de campo elétrico e densidade de carga das nuvens. Segundo diversos estudos [4] realizados no nível do solo, a altura da faixa de cargas negativas varia consideravelmente de tempestade para tempestade. Estas cargas estão normalmente localizadas em uma faixa da atmosfera que compreende variações de temperaturas dentro das nuvens entre -10°C e -25°C [4]. Já as medições de campo elétrico realizadas nas proximidades ou no interior das nuvens revelam que três centros de carga não são suficientes para representar a quantidade e a complexidade da distribuição de cargas existente. Estas medições são realizadas por balões e foguetes estratosféricos e apresentam perfis de campo elétrico que sugerem a existência de seis ou mais planos de carga ao longo de uma nuvem.

No caso das medições realizadas por balões, é importante lembrar que o perfil do campo elétrico obtido é basicamente uma linha vertical, enquanto as medições realizadas por aviões resultam em perfis de campo horizontais. Considerando que a maioria dos estudos é feita através de foguetes ou balões, foi proposta uma aproximação de planos infinitos de carga uniforme superpostos para construir os modelos a partir dos dados medidos [4]. Outro detalhe importante é o fato de que o tempo de elevação dos instrumentos medidores pode ser da mesma ordem das constantes de tempo de formação dos centros de carga e que o ambiente dinâmico da nuvem não pode ser retratado em tais métodos de obtenção do campo.

Mesmo com todas estas restrições, os trabalhos realizados apontam para a existência de vários planos de carga alternados e também de uma camada superior próxima ao limite da nuvem em que uma grande concentração de cargas negativas é encontrada, com densidade de carga por unidade de volume muito superior à densidade de carga presente no restante da nuvem. Esta camada é denominada camada de blindagem, ou em Inglês,

screening layer, e estaria associada às reações da atmosfera com os raios cósmicos.

Outro parâmetro de difícil definição no modelo do tripolo é a quantidade de cargas em cada elemento concentrado de carga usado para representar um tipo de cargas. Os estudos realizados através de medições com radares e balões apontam para resultados muito diferentes, ou seja, a densidade de cargas medida depende muito da tempestade, do método de medição utilizado e de vários outros fatores aleatórios. Ciente da faixa de variação existente, o modelo do tripolo assume valores que são considerados de referência para alguns lugares do mundo. As altitudes destes centros de carga também são assumidas para a região do planeta em que os resultados mais influentes foram obtidos.

O modelo do tripolo é, portanto, uma grande simplificação de um sistema complexo e aleatório. Por este motivo, ele falha para muitos casos observados e chega a ser considerado inadequado para alguns autores. Algumas modificações foram propostas para que se tornasse mais próximo à realidade, considerando pelo menos a inclusão da camada de blindagem, no limite superior da nuvem.

A necessidade de outras abordagens motivou o desenvolvimento de outros modelos nuvens, como por exemplo, os modelos numéricos. Estes levam em consideração os parâmetros físicos da nuvem para avaliar alguns aspectos importantes para a formação das descargas atmosféricas:

- i. Validação dos mecanismos de eletrificação das nuvens.
- ii. A relação das correntes de ar ascendentes com a eletrificação e a micro-física das nuvens de tempestade.
- iii. Quais fatores influenciam a localização das descargas elétricas nas nuvens de tempestade e as taxas de ocorrência de *flashes*⁵.
- iv. Os efeitos das descargas elétricas na distribuição de cargas da nuvem.

Para o estudo e simulação das nuvens por meio de modelos numéricos, o ar úmido é

⁵ Flash é o termo em inglês adotado para descargas elétricas plenas [1].

dividido em pequenos volumes espaciais e o cálculo do campo elétrico é realizado para o ambiente que é descrito por três equações físicas:

- Equação de movimento (cinética)
- Equação termodinâmica
- Equação de continuidade

Vários modelos numéricos já foram propostos (Takahachi, Helsdon, MacGerman, Baker e Solomon, Mazur e Ruhnke [4]) e alguns alcançam resultados semelhantes aos observados na natureza. A grande dificuldade de realização destes modelos é a falta de valores de referência. Os critérios de campo crítico, por exemplo, são relativamente arbitrários entre diferentes autores. A rigidez dielétrica do meio é um parâmetro muito difícil de ser detectado através de medições, motivo pelo qual os experimentos laboratoriais não conseguem representar com fidelidade as condições encontradas naturalmente. Devido às dificuldades inerentes à modelagem e as incertezas associadas, torna-se difícil a validação das propostas de modelo.

2.4 Perfis de campo elétrico associados às descargas atmosféricas

Foi mostrado nas seções anteriores que as nuvens de tempestade adquirem um carregamento elétrico e que este carregamento pode ser expresso por um modelo simplificado em que todas as cargas são concentradas em pontos. O modelo do tripolo é questionável, conforme discutido anteriormente, mas trata-se de um bom ponto de partida para o entendimento do campo elétrico ao nível do solo gerado pela presença de uma nuvem eletricamente carregada. Esta aproximação é utilizada neste trabalho para analisar as variações de campo elétrico que ocorrem quando um fenômeno associado a um raio acontece, isto é, quando uma corrente de retorno flui pelo canal de descarga.

Com o objetivo de descrever o modelo do tripolo, é inicialmente analisado o campo elétrico produzido apenas por uma simples carga pontual colocada em algum ponto acima do solo que é considerado condutor perfeito. Nestas condições ideais, é possível utilizar a formulação tradicional para cálculo de campo devido a uma carga pontual. O método das

imagens é aplicado para considerar o efeito do solo perfeitamente condutor.

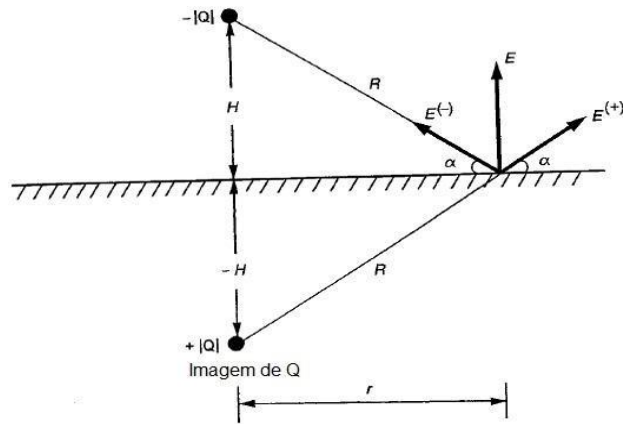


Figura 2.4 – Componentes do campo elétrico produzidas pela carga e sua imagem. Adaptado de [4]

Observando a Figura 2.4, nota-se que o módulo do campo elétrico a uma distância horizontal r da carga Q vale:

$$|E^{(-)}| = |E^{(+)}| = \frac{|Q|}{4\pi\epsilon_0(H^2 + r^2)} \quad (2.1)$$

O termo $(H^2 + r^2)$ se refere ao quadrado da distância do ponto de observação até a carga e pode ser entendido também como o quadrado da hipotenusa do triângulo retângulo formado por r , H e R . Levando em consideração as condições de fronteira do campo elétrico, somente a componente normal do campo não é nula e o módulo total do campo elétrico vale a somatória das contribuições da carga e de sua imagem. Como o módulo do campo elétrico normal produzido pela carga é igual ao módulo da parcela normal do campo elétrico produzido por sua imagem, o campo total é equivalente a duas vezes a componente normal campo produzido por uma carga.

Assim, para realizar o cálculo do campo elétrico vertical produzido por uma carga a uma altura H e a uma distância r do observador no nível do solo condutor perfeito (Figura. 2.4) deve-se multiplicar a expressão (2.1) por $2 \cdot \text{sen}(\alpha)$:

$$\begin{aligned} |E| &= 2|E^{(-)}| \cos(90^\circ - \alpha) = 2|E^{(+)}| \cos(90^\circ - \alpha) \\ &= 2|E^{(-)}| \text{sen } \alpha = \frac{|Q|H}{2\pi\epsilon_0(H^2 + r^2)^{3/2}} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Sendo que $\sin \alpha = \frac{H}{\sqrt{H^2 + r^2}}$

Como pode ser visto, a Equação (2.2) possui duas variáveis (H e r) que influenciam no valor de campo medido pelo observador. Para visualizar o significado desta equação, foi realizada uma análise de sensibilidade, considerando a variação do módulo do campo elétrico vertical ao nível do solo com a variação das distâncias horizontal (r) e vertical (H) da carga em relação ao ponto de observação.

Inicialmente, supõe-se a situação em que o observador é mantido fixo e o campo elétrico é calculado para diversos valores de r , mantendo H fixo como ilustrado na Figura 2.5. Neste caso, quando a carga é movida ao longo da reta indicada pela linha tracejada, o campo elétrico atinge seu valor máximo quando estiver exatamente sobre o ponto de observação ($r=0$) e decresce na medida em que a carga se afasta, ou seja, na medida em que r cresce.

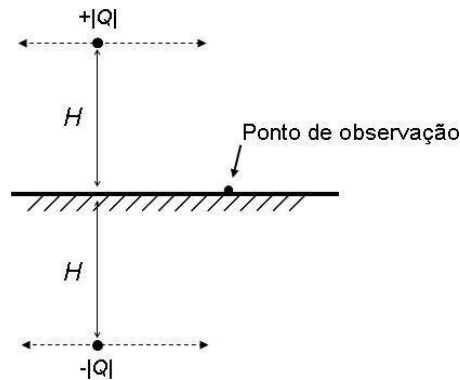


Figura 2.5 - Ilustração da variação da posição horizontal da carga.

Se a expressão $\frac{|Q|}{2\pi\epsilon_0}$ for designada por k , a Equação (2.2) pode ser reescrita para $r = 0$:

$$k = \frac{|Q|}{2\pi\epsilon_0} \therefore |E| = \frac{k \cdot H}{(H^2)^{3/2}} = \frac{k \cdot H}{H^3} = \frac{k}{H^2} \quad (2.3)$$

A expressão $\frac{k}{H^2}$ representa o valor máximo do módulo do campo elétrico vertical para determinada altura H . Este valor máximo ocorre sempre imediatamente abaixo da carga. Para efeito de comparação, se o ponto de observação estiver a uma mesma distância

horizontal da carga de sua altura ($r = H$), o campo valerá aproximadamente 35% do valor encontrado pela Equação (2.3). Já na situação em que $r = 2H$, o valor do campo elétrico atinge apenas 9% do valor máximo encontrado pela Equação (2.3).

A Figura 2.6 ilustra a variação do módulo do campo elétrico vertical em função da variação da distância horizontal da carga em relação ao ponto de observação, como ilustrado na Figura 2.5 e denota as duas situações indicadas acima. Este perfil de campo elétrico foi obtido através da aplicação de (2.2) para uma carga negativa de 1 C que está a 1000 metros de distância do solo e para valores de distância horizontal (r) variando entre -2 km e + 2 km. Este é um resultado de certa forma intuitivo, pois o campo gerado por uma carga qualquer é mais intenso em suas proximidades. Outra interpretação possível da figura 2.6 seria que os valores do módulo do campo elétrico vertical diminuem à medida que o observador se afasta da origem, abaixo da carga.

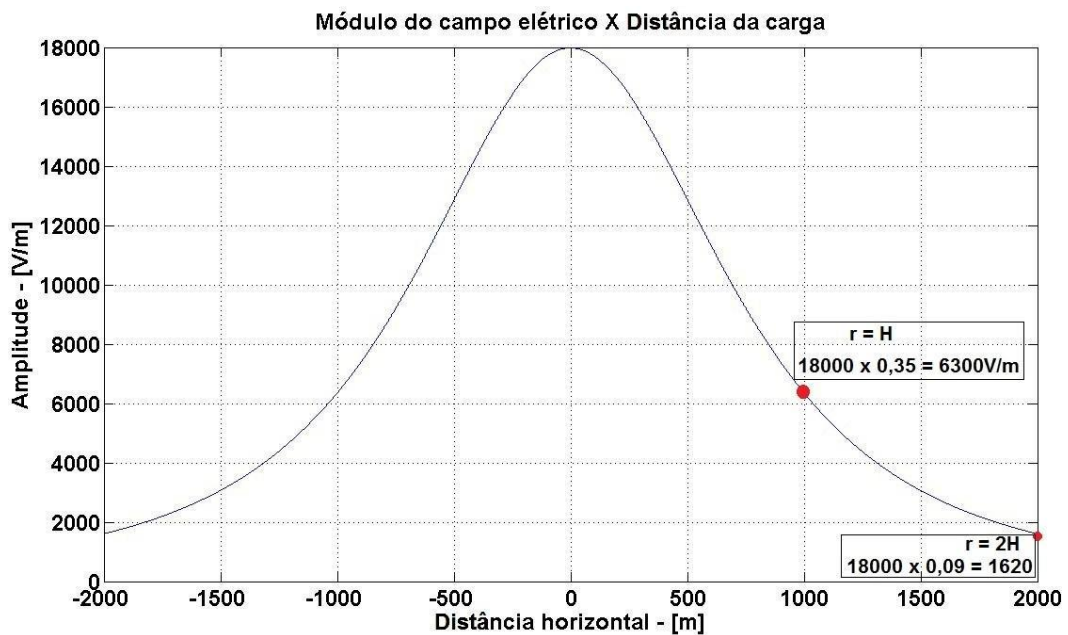


Figura 2.6 – Módulo do campo elétrico vertical em função da distância horizontal da carga. ($Q = -1C$, $H = 1000m$)

Uma vez demonstrado como o campo elétrico varia com a distância horizontal, resta agora realizar a mesma análise para a distância vertical. Supõe-se uma situação em que o observador é mantido fixo e o campo elétrico é calculado para diversos valores de H , mantendo a distância horizontal, denominada r , fixa em 100 metros como ilustrado na Figura 2.7.

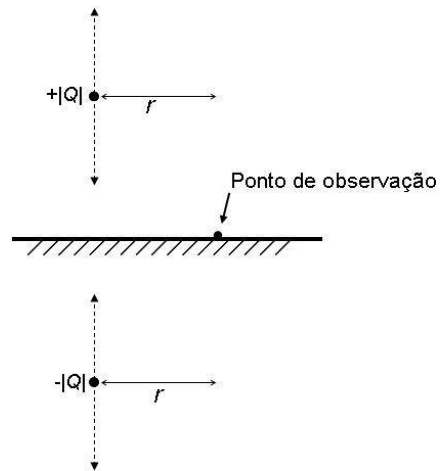


Figura 2.7 – Ilustração da variação vertical da carga.

Neste caso, a relação não é tão intuitiva como no caso anterior. Quando a carga é movida ao longo da reta indicada pela linha tracejada, o campo elétrico cresce, atinge seu valor máximo em uma determinada altura e depois decresce na medida em que a carga se afasta, ou seja, com o crescimento de H . A Figura. 2.8 ilustra a variação do módulo do campo elétrico vertical em função da variação da distância vertical da carga em relação ao ponto de observação.

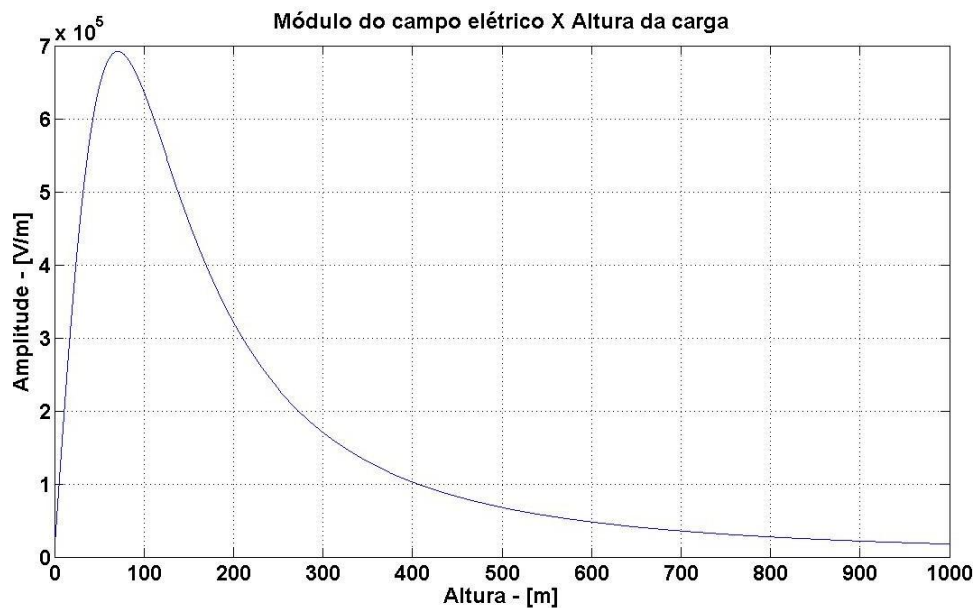


Figura 2.8 – Variação do campo elétrico vertical em função da altura (distância vertical) da carga.

Para encontrar a distância vertical (H) que produz o maior módulo de campo elétrico vertical, foi utilizada a Equação (2.2):

$$E(H) = k \cdot \frac{H}{(H^2 + r^2)^{3/2}}$$

O ponto de máximo acontece quando a derivada do campo elétrico em relação à altura (H) vale zero:

$$\frac{d}{dH} E(H) = 0$$

$$E(H) = k \cdot H \cdot (H^2 + r^2)^{-3/2}$$

Utilizando a regra da derivada do produto:

$$\frac{d}{dH} E(H) = k \cdot \left[(H^2 + r^2)^{-3/2} + H \cdot \frac{d}{dH} (H^2 + r^2)^{-3/2} \right]$$

Utilizando a regra da cadeia:

$$\frac{d}{dH} (H^2 + r^2)^{-3/2} = \frac{dX}{du} \cdot \frac{du}{dH}$$

$$u = H^2 + r^2$$

$$\frac{du}{dH} = 2H$$

$$\frac{dX}{du} = -\frac{3}{2} u^{-5/2}$$

Assim,

$$\frac{d}{dH} E(H) = k \cdot \left[(H^2 + r^2)^{-3/2} + H \cdot 2H \cdot -\frac{3}{2} (H^2 + r^2)^{-5/2} \right]$$

$$\frac{d}{dH} E(H) = k \cdot \left[\frac{1}{(H^2 + r^2)^{3/2}} - \frac{3H^2}{(H^2 + r^2)^{5/2}} \right]$$

Igualando a derivada à zero, obtêm-se:

$$E(H)_{MAX} \rightarrow H = \frac{r}{\sqrt{2}} \quad (2.4)$$

Segundo o resultado obtido em (2.4), o módulo do campo elétrico vertical máximo

acontece na situação em que a distância vertical é aproximadamente 70% da distância horizontal, como é possível observar na Figura 2.8. Esta relação é encontrada se substituirmos o valor de r por 1 na dedução de (2.1) ou por inspeção na Figura. 2.8:

$$E(H)_{MAX} \rightarrow H = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$$

Quando a carga está a uma altura superior a 70% de sua distância horizontal em relação ao ponto de observação, o aumento de H produz um decréscimo no campo com o inverso do quadrado da altura (2.3), como mostra a Figura 2.9. Esta Figura resume as relações tratadas anteriormente. Vale observar que as curvas coloridas representam a variação do módulo do campo elétrico vertical na medida em que a distância horizontal é modificada, situação idêntica à apresentada pela Figura 2.6. A diferença entre esta (Figura 2.9) e a Figura 2.6 reside no fato de que a carga negativa de 1 C foi simulada para diversas alturas como mostra a legenda. Para o caso em que a carga simulada estava localizada a uma altura de 1 km, o campo máximo obtido foi de 18 kV/m, enquanto para o caso em que a carga foi colocada a uma altura de 2 km, o campo máximo obtido foi de 4.5 kV/m, exatamente um quarto do campo obtido para 1 km. Ou seja, com o dobro da altura simulada o campo foi quatro vezes menor (2.3), como previsto pela relação do decréscimo inverso ao quadrado da distância vertical.

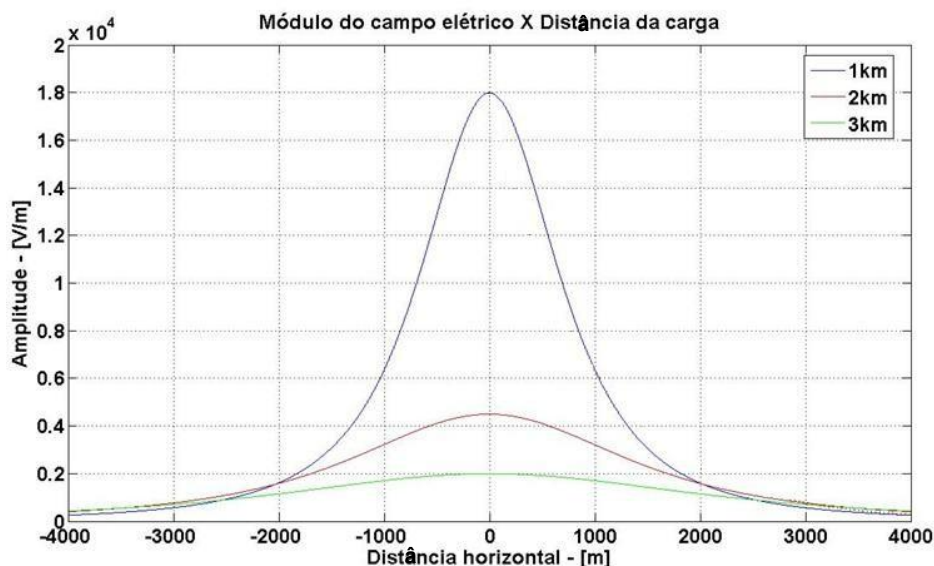


Figura 2.9 – Variação do módulo do campo elétrico para diversas alturas do centro de carga em função da distância horizontal.

O mesmo acontece para o caso em que a carga foi colocada a uma altura de 3 km. Nesse

caso, contudo, o campo máximo atingido foi de 2 kV/m, ou seja, com o triplo da altura em relação à curva em azul, o campo máximo atingido foi nove vezes menor. Estas relações e simulações obtidas serão de suma importância para a compreensão das variações de campo elétrico associadas às descargas atmosféricas, sendo referidas ao longo do restante do texto. Até o presente momento, foi considerada a presença de apenas uma carga pontual a uma determinada altura e distância horizontal do ponto de observação. Foi possível entender como o módulo do campo elétrico vertical se comporta à medida que tanto r quanto H são variados e em quais situações os valores máximos são atingidos. Sabe-se, contudo, que as cargas presentes em uma nuvem não podem ser modeladas apenas por uma simples carga pontual, conforme foi discutido anteriormente. Daí a importância de acrescentar outras cargas que representam os demais centros de carga das nuvens.

As seções seguintes discutem as variações do campo elétrico e sua assinatura nas diversas etapas de formação e evolução das descargas atmosféricas. Antes disso, contudo, torna-se necessário esclarecer a convenção de sinais adotada para a medição e apresentação do campo elétrico, o que se faz a seguir.

2.5 Convenção de sinais do campo elétrico

O campo elétrico natural da Terra em condições de tempo bom vale aproximadamente 100 V/m e aponta na direção do planeta. Este valor de referência foi escolhido por uma parcela dos estudiosos do campo elétrico como sendo positivo e por outra parcela como negativo, como detalhado a seguir.

A Figura 2.10 ilustra as duas diferentes convenções de sinais que foram denominadas convenção física e convenção meteorológica. Estes nomes têm origem nos antigos estudos meteorológicos e de eletricidade da atmosfera em que o campo que aponta na direção do planeta é considerado positivo possivelmente devido ao fato de que este é o campo “padrão”, medido em situações em que não existem nuvens eletricamente carregadas sobre o ponto de observação. Já a convenção física coincide com a notação normalmente adotada pelos engenheiros eletricitas, na qual o sistema de coordenadas possui o eixo de

coordenadas radial apontando na direção da nuvem. Desta forma, o campo elétrico medido em condições de tempo bom é negativo segundo a convenção física.

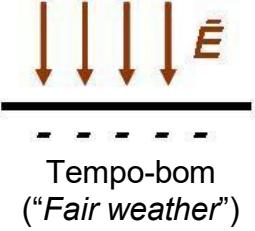
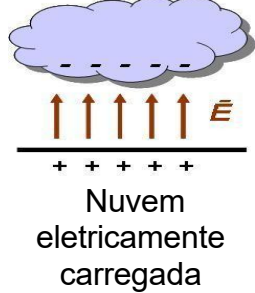


Convenção de Sinais		
FÍSICA	Direção do campo	METEOROLÓGICA
NEGATIVO	 <p>Tempo-bom ("Fair weather")</p>	POSITIVO
POSITIVO	 <p>Nuvem eletricamente carregada</p>	NEGATIVO

Figura 2.10 – Quadro comparativo da convenção de sinais.

A utilização de uma determinada convenção implica diferentes resultados para a avaliação das variações do campo elétrico associadas às descargas atmosféricas, como é visto mais a frente. A Figura 2.11 ilustra as diferenças que ocorrem na escolha de uma convenção específica. A explicação da variação do campo devido a cada fenômeno é feita nas seções posteriores.

Ao longo do texto, os resultados de medições de campo elétrico realizadas na estação de pesquisa do Morro do Cachimbo apresentam campos elétricos de acordo com a convenção atmosférica, enquanto as curvas experimentais ou computacionalmente geradas são apresentadas nesta dissertação seguindo a notação física de sinais. Para que não haja confusão por parte do leitor, a convenção utilizada será explicitamente indicada a cada figura, freqüentemente seguida do motivo da escolha da convenção em questão.

FÍSICA	Evento	METEOROLÓGICA
ΔE NEGATIVO	 Descarga negativa	ΔE POSITIVO
ΔE POSITIVO	 Descarga positiva	ΔE NEGATIVO

Variações do campo elétrico devidas aos canais descendentes (<i>stepped leaders</i> ⁶ e <i>dart leaders</i> ⁷)		
ΔE POSITIVO	Canal precursor de descarga <u>negativa</u> , medido até <u>aproximadamente 5 km</u> do ponto de incidência	ΔE NEGATIVO
ΔE NEGATIVO	Canal precursor de descarga <u>negativa</u> , medido <u>após ~5 km</u> do ponto de incidência	ΔE POSITIVO

Figura 2.11 – Quadro comparativo da convenção de sinais.

2.6 Perfis de campo elétrico vertical antes da formação das descargas atmosféricas segundo o modelo do tripolo

Foram brevemente abordados nas seções anteriores os temas de desenvolvimento e de eletrificação das nuvens, enfatizando-se, dentre outros aspectos, o motivo da adoção do modelo de cargas do tripolo e também como o módulo do campo elétrico vertical varia de acordo com a posição das cargas. Estas informações serão utilizadas nesta seção para ilustrar a configuração básica do campo elétrico vertical no nível do solo na presença de uma nuvem eletricamente carregada que pode dar origem a uma descarga atmosférica.

⁶ *Stepped leader* é o termo em inglês utilizado para denominar o canal descendente precursor de descarga [1]. O nome em inglês remete a natureza de propagação do canal por passos regulares.

⁷ *Dart leader* é o termo em inglês que denomina o canal condutor das descargas subsequentes [1]. Neste caso ele pode ou não se propagar por passos, como será discutido mais a frente.

Para entender a distribuição espacial do campo no nível do solo segundo o modelo do tripolo, basta estender os resultados obtidos nas Figuras 2.6, 2.8 e 2.9 para a situação em que a nuvem é modelada por três cargas pontuais ao invés de apenas uma. O módulo do campo elétrico vertical em cada ponto será a soma da contribuição individual de cada uma das cargas e de suas respectivas imagens. Ao fixar a altura de cada um dos centros de carga das nuvens e modelá-los como cargas pontuais, surgirá a simplificação da distribuição de cargas adotada pelo modelo do tripolo. Desta forma, o valor de campo elétrico vertical é função da distância horizontal entre o ponto de observação e as cargas (centro da nuvem), e este valor é calculado de acordo com a contribuição individual de cada carga e cada imagem no ponto de observação, como ilustrado na Figura 2.12.

De acordo com a distribuição de cargas sugerida na Figura 2.3 [4], a curva superior (Q_N) na Figura 2.12 representa o perfil de campo elétrico vertical em função da distância horizontal somente devido as cargas negativa do modelo do tripolo, localizadas a 7 km do solo e com valor total de -40 C. Já a curva tracejada inferior, ilustra a contribuição individual do centro Q_{LP} , em que +3 C estão localizados a 2 km do nível do solo. Já a curva inferior contínua, identificada pelo centro de cargas positivo (Q_P) representa a parcela de campo produzida pela carga total de +40 C a uma altura de 12 km. Quando somadas, estas três parcelas dão origem à curva tracejada, o Campo Elétrico resultante, que fornece o cálculo do valor da resultante para cada distância horizontal em relação aos centros de carga.

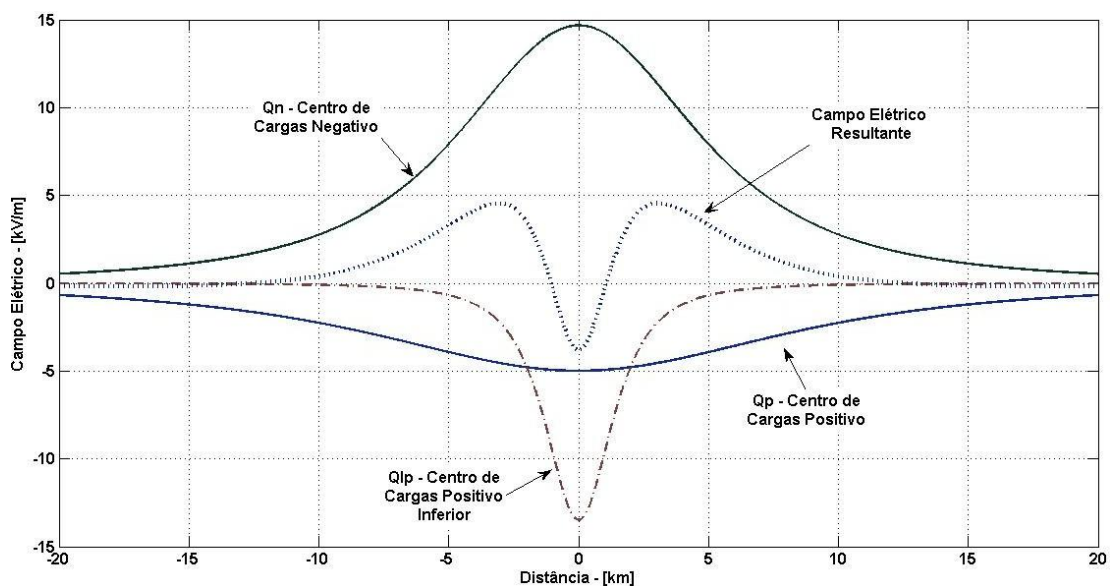


Figura. 2.12 – Simulação dos perfis de campo elétrico vertical fornecido pelos centros de carga (Q_P , Q_N , Q_{LP}) individualmente e pelo somatório dos três centros de carga (Resultado) em função da distância horizontal. (Convenção física)

O perfil de campo elétrico resultante pode ser obtido experimentalmente a partir de várias medições de campo a diferentes distâncias horizontais do centro da nuvem, e também já foi registrado por medidores que permaneceram estáticos enquanto uma nuvem carregada se deslocava, passando por cima do ponto de medição [4]. O formato desta curva se deve ao fato de que o modelo do tripolo é constituído de três cargas com distâncias horizontais iguais, porém com alturas diferentes. Como já mencionado e ilustrado na Figura 2.8, as maiores contribuições para o módulo do campo elétrico no nível do solo serão obtidas para uma determinada altura, dada pela Equação (2.4). Assim, para distâncias horizontais muito pequenas, a maior contribuição em módulo para o campo elétrico vertical total no nível do solo é devida à presença do centro representado por Q_{LP} , já que este é o centro com altura mais próxima do máximo de campo elétrico produzido para aquela distância horizontal. O resultado é que o vale acentuado presente no meio da figura é causado pela forte influência de Q_{LP} para pequenas distâncias horizontais, e mais, quando observado com cuidado, este vale acentuado é similar à curva de campo elétrico produzido somente devido à presença de Q_{LP} (curva tracejada).

À medida que o observador se afasta das cargas, a contribuição de Q_{LP} para o módulo do campo resultante vai decrescendo e ficando menos importante em relação à Q_N , que domina o campo total (soma de cada um dos campos produzidos pelos três centros de carga individualmente) ao longo de uma faixa de distâncias intermediárias. Repare que a curva de campo resultante se assemelha à curva do campo produzido apenas por Q_N para esta faixa de distâncias horizontais. Por fim, quando o observador está muito distante da nuvem, o centro Q_P torna-se preponderante em relação às outras cargas que representam os centros de carga inferiores.

Outra característica visível na Figura 2.12 são as mudanças de polaridade do campo elétrico para pequenas e grandes distâncias. No caso das pequenas distâncias, cerca de 1 km para a figura em questão, a mudança na polaridade ocorre somente devido à presença do centro Q_{LP} , como pode ser visualizado na Figura 2.13. Essa figura apresenta a simulação da remoção do centro de cargas LP, situação que pode ser mais real do que a situação fornecida pelo modelo do tripolo para diversas localidades no planeta devido à dúvida relacionada com a existência do Q_{LP} .

A simulação ilustrada na Figura 2.13 foi realizada com os valores considerados pela referência [4] como sendo o padrão para as nuvens de tempestades medidas na Flórida que se encontram indicados na Tabela 2.1. Contudo, existem valores que possuem uma maior semelhança com as características encontradas no Brasil, mais particularmente na região de Minas Gerais [1]. Tais valores, que também se encontram descritos na Tabela 2.1, foram utilizados para gerar a Figura 2.14, que ilustra um perfil de campo elétrico diferente daquele ilustrado na Figura 2.13.

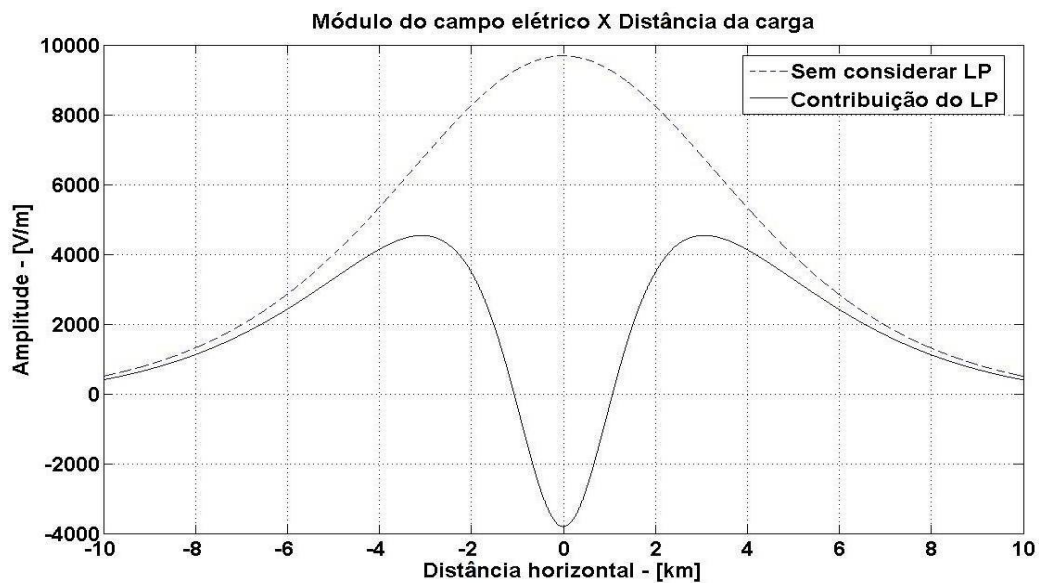


Figura 2.13 – Perfil de campo elétrico vertical em função da distância horizontal das cargas na presença e na ausência do LP.
(Convenção física)

No primeiro caso, referente aos dados de Rakov [4] e ilustrado na Figura 2.13, foi simulada a configuração de cargas considerada padrão para as regiões estudadas no hemisfério Norte. Já no segundo caso, descrito na tabela como variação de caso, foi simulada a condição que parece mais representativa das condições de regiões temperadas do hemisfério Sul que têm a base da nuvem mais elevada e o topos mais baixos com alturas tipicamente na faixa de 12km.

Tabela 2.1 – Valores de carga e altura dos centros de carga de acordo com as referências [1] e [4]

Referência	Centro de cargas	Altura – [km]	Carga – [C]
Rakov [4]	Centro de cargas positivas (Q_P)	12	+40
	Centro de cargas negativas (Q_N)	7	-40
	Cargas positivas inferiores (Q_{LP})	2	+3

Variação de caso [1]	Centro de cargas positivas (Q_P)	10	+40
	Centro de cargas negativas (Q_N)	5,5	-40
	Cargas positivas inferiores (Q_{LP})	3,5	+3

O perfil de campo elétrico ilustrado na Figura 2.14 é utilizado posteriormente no capítulo de análise dos dados obtidos em campo para demonstrar que os valores de referência propostos por [1] são mais adequados para representar as nuvens de tempestade que ocorrem na vizinhança da região da Estação do Morro do Cachimbo, e possivelmente em uma grande extensão do estado de Minas Gerais.

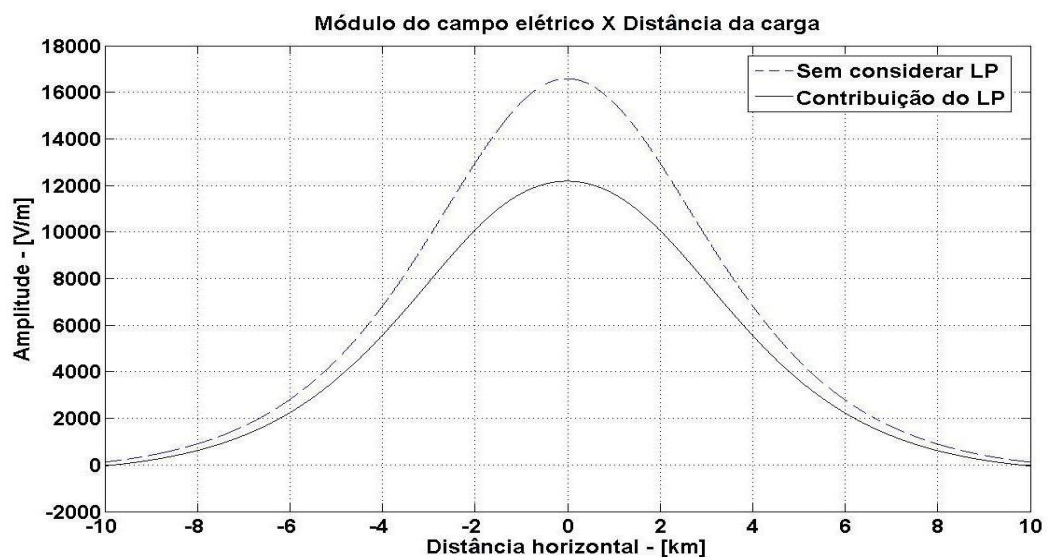


Figura 2.14 – Perfil de campo elétrico vertical em função da distância horizontal das cargas na presença e na ausência do LP segundo [1]. (Convenção física)

A característica que diferencia as Figuras 2.13 e 2.14 é nítida: A presença ou não do centro de cargas representado por Q_{LP} não modifica a polaridade do campo elétrico vertical mesmo a uma pequena distância horizontal dos centros de carga. A explicação para tal constatação seria:

- A contribuição de Q_{LP} para o campo resultante diminui se a altura deste centro de cargas aumenta;
- A contribuição de Q_N torna-se maior com a diminuição da altura deste centro de cargas.

Assim, o efeito resultante destas duas mudanças é de aumentar a influência do campo elétrico vertical positivo (segundo a convenção física) para todas as distâncias, e por consequência, diminuir o campo elétrico negativo nas proximidades dos centros de carga. Pode-se dizer, portanto, que a grande influência do centro Q_{LP} sobre o campo elétrico vertical presente na Figura 2.13 somente acontece devido à sua baixa altura em relação ao centro de cargas negativo Q_N . No Capítulo 4, é possível observar curvas de campo elétrico medidas que indicam que o centro Q_{LP} não apresenta uma grande influência mesmo nos casos em que as nuvens de tempestade estão visivelmente sobre a Estação do Morro do Cachimbo. Infelizmente, não é possível dizer com certeza se estas evidências indicam a ausência do Q_{LP} , ou apenas que o centro Q_N está mais baixo e portanto produz um campo elétrico que se sobrepõe à parcela produzida pelo Q_{LP} .

Voltando à Figura 2.12, outra importante característica do campo elétrico vertical é a mudança de polaridade que ocorre a grandes distâncias dos centros de carga das nuvens. Neste caso é possível percebê-las nas distâncias a partir de 15 km aproximadamente. O campo total (linha tracejada) apresenta duas mudanças de polaridade nesta figura. A primeira devido à presença do Q_{LP} que acontece a uma pequena distância dos centros de carga (aproximadamente 1-2 km) como discutido acima. Já a segunda mudança de polaridade, mais discreta, acontece distante do centro da nuvem e indica o limiar de influência do campo elétrico positivo (notação física) da nuvem. A partir desta distância, no nível do solo, o campo elétrico natural da Terra, que é negativo (notação física), passa a ser da mesma ordem de grandeza ou maior do que o campo elétrico produzido pela nuvem de tempestade, cancelando a influência elétrica da nuvem, como pode ser observado na Figura 2.12(b) a seguir, com o detalhamento dos perfis de campo elétrico para distâncias entre 17,5 km e 20 km.

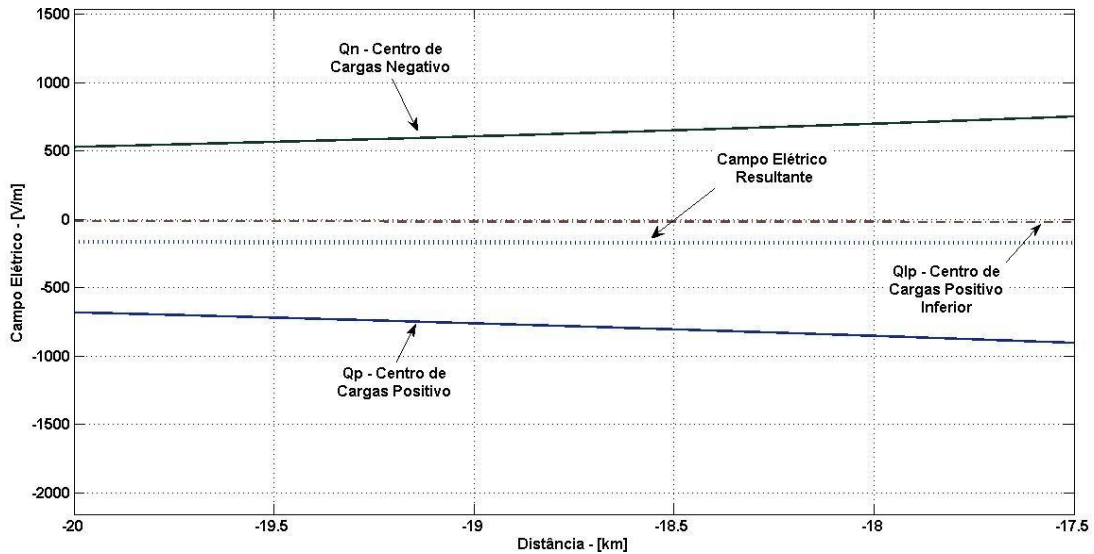


Figura 2.12(b) – Detalhe da Figura 2.12 para distâncias horizontais entre 17,5 km e 20 km dos centros de carga.

Uma maneira simplificada de calcular a distância de influência elétrica de uma nuvem de tempestade é retirar o centro Q_{LP} . Se a nuvem for modelada como apenas dois centros de carga de mesma intensidade, um negativo inferior e outro positivo superior, pode-se obter uma expressão para a distância de reversão, que é a distância horizontal a partir dos centros de cargas em que acontece a mudança de polaridade do campo elétrico. Segundo [4], esta distância é dada por:

$$D_0 = \sqrt{(H_p H_N)^{2/3} \cdot (H_p^{2/3} + H_N^{2/3})} \quad (2.4)$$

Onde H_p é a altura do centro de cargas positivo e H_N é a altura do centro de cargas negativo. Em princípio, a Equação 2.4 pode parecer muito útil para alguns propósitos como, por exemplo, para detectar a distância dos centros de carga e, possivelmente, das descargas atmosféricas de uma tempestade que se aproxima. No entanto, as aproximações necessárias para se chegar a uma fórmula relativamente simples acabam por dificultar bastante a sua utilização em casos práticos. Como discutido anteriormente, a distribuição de cargas de uma nuvem de tempestade continua a ser um assunto delicado e que permanece sem valores de referência universalmente estabelecidos. Portanto, aproximar a distribuição equivalente de cargas de uma nuvem apenas como duas cargas pontuais pode ser suficiente para se traçar o perfil de campo elétrico vertical obtido a diversas distâncias do centro da nuvem, mas definitivamente não é suficiente para se obter expressões de

distância de reversão devido à grande variedade de formas, tamanhos e alturas que as nuvens podem adquirir. Uma aplicação possível de (2.4) é o cômputo de diversas alturas H_P e H_N que forneça uma relação entre a variação da distância de reversão (D_0) e a altura relativa dos centros de carga. Com esta finalidade, foram escolhidos alguns casos ilustrativos que incluem valores aleatórios e outros considerados referências para o cálculo da distância de reversão.

Observando a Tabela 2.2, percebe-se que alguns casos calculados não são possíveis nas situações reais. Trata-se da primeira linha (H_P e $H_N = 1$) e de todas as linhas em que o centro de cargas positivo estava abaixo do centro de cargas negativo. Essas situações foram calculadas apenas para verificar quais resultados seriam obtidos por (2.4), afinal trata-se de uma aproximação teórica.

Tabela 2.2: Cálculo de D_0 para diversas alturas dos centros de carga

H_n [km]	H_p [km]	D_0 [km]
1	1	1,414 ($\sqrt{2}$)
1	2	2,027
1	4	2,978
1	8	4,472
2	1	2,027
2	2	2,828
2	4	4,053
2	8	5,956
4,5	8	8,563
5	9	9,577
5,5	10	10,592

Inicialmente, percebe-se que a distância de reversão não varia linearmente com as alturas dos centros de carga, como esperado. Em segundo lugar, as linhas sombreadas ilustram que, se fosse possível trocar de lugar o centro de cargas positivo com o centro de cargas negativo, a distância de reversão seria a mesma, um resultado inesperado visto que o campo elétrico da Terra influenciaria tornando este cenário impossível. Por fim, a conclusão mais importante e que pode ser utilizada de alguma forma prática vem dos casos em que a altura H_N é mantida constante e a altura H_P é dobrada. Nestes casos, percebe-se que D_0 aumenta cerca de uma vez e meia. Ou seja, *caso a distância entre os centros de carga aumente duas vezes, a distância de reversão aumenta aproximadamente uma vez e meia.*

As últimas três linhas da tabela destacam um dado conhecido empiricamente: o campo

elétrico vertical de uma nuvem é percebido até distâncias da ordem de 10 km. Esses valores foram obtidos a partir do conjunto de três possibilidades de H_P e H_N utilizados na literatura [1].

Estas análises sobre a distância de reversão encerram a seção deste capítulo sobre o campo elétrico vertical antes das descargas. Nesta seção foram abordados alguns conceitos básicos e algumas ilustrações do perfil de campo elétrico para diversas distâncias horizontais dos centros de carga das nuvens modelados pelo modelo do tripolo. Este cenário elétrico construído é utilizado no Capítulo 4 para analisar as variações de campo elétrico que acontecem durante os diversos eventos associados às descargas atmosféricas. Cada etapa da descarga atmosférica modifica de alguma forma o campo elétrico estático apresentado anteriormente. Como comentado adiante, é possível observar um registro de campo elétrico e reconhecer as diversas assinaturas de cada evento, o que fornece uma leitura dos eventos a partir dos efeitos produzidos e medidos no campo elétrico.

2.7 Variações de campo elétrico associadas às descargas atmosféricas

2.7.1 Considerações gerais

Foi visto que o campo elétrico resultante é diferente para diferentes distâncias horizontais e alturas dos centros de carga das nuvens. Por outro lado, é compreensível que ocorram variações no campo elétrico no momento em que ocorram modificações na configuração original das cargas: quando se aproximarem do solo ou quando fluírem pelo canal de descarga. De fato, quando uma descarga atmosférica ocorre, cargas depositadas ao longo do canal são anuladas por outras cargas retiradas da superfície da Terra. Assim, considerando a nuvem como o sistema em análise, a ocorrência de um determinado raio produz redução na quantidade de cargas de algum centro de cargas, quantidade esta transferida para a terra pelo fluxo da corrente de retorno.

Considerando, então, que a distribuição de cargas é diferente nos instantes anterior e posterior ao raio, é razoável ter a expectativa de que o perfil do campo elétrico nas

proximidades da nuvem se modifique quando ocorrer o fluxo da corrente de retorno. No intervalo de tempo entre os instantes anterior e posterior à descarga de retorno, o campo elétrico se modifica produzindo formas de onda características, as assinaturas, para cada processo elétrico que ocorra no período envolvendo a formação dos canais descendentes, das descargas subseqüentes, etc. Ao longo desta seção, é mostrada porque e como essa variação de campo elétrico ocorre com exemplos das formas de onda para cada assinatura.

Antes de se iniciar a discussão, é importante frisar que a causa das variações de campo elétrico nas nuvens de tempestade é *a variação das cargas*. Segundo [4], “O campo elétrico varia de uma quantidade igual à quantidade de cargas neutralizadas (removidas da nuvem) em uma descarga elétrica”.

Imagine uma carga elétrica inserida em um espaço. Esta carga produz um campo elétrico radial que pode ser medido em suas proximidades. Se retirarmos esta carga observando o valor de campo medido no instrumento, haverá uma mudança na leitura para o valor de campo medido no espaço antes da inserção da carga. Ou seja, a variação no campo elétrico devida à retirada da carga **é o negativo da contribuição inicial**. Por exemplo: O campo elétrico de um determinado local vale 10 V/m. Ao inserir uma determinada carga, o valor muda para 13 V/m. Devido à ocorrência de um processo de neutralização de cargas, por exemplo uma descarga atmosférica, a carga é removida. O valor do campo elétrico medido após a remoção da carga volta a ser 10 V/m e, conseqüentemente, a variação do campo elétrico é de -3 V/m, ou seja, o negativo da contribuição inicial daquela carga para o campo medido.

Da mesma maneira, quando acontece uma descarga atmosférica nuvem solo, de polaridade negativa, o efeito resultante é a redução da quantidade de cargas negativas da nuvem. A variação de campo elétrico neste caso será o negativo da contribuição inicial daquela carga que foi removida. No caso de cargas negativas, o efeito medido será uma redução no campo positivo (convenção física) que é produzido pelas cargas negativas da nuvem.

Cada fase de uma descarga atmosférica, desde o canal descendente até as componentes de

corrente contínua, possui um fluxo de carga associado (ou corrente), de forma que é possível estabelecer diferenças entre os determinados eventos, caracterizando assinaturas típicas das diversas fases, como ilustra a Figura 2.15. As seções seguintes exemplificam e ilustram variações de campo elétrico para cada evento.

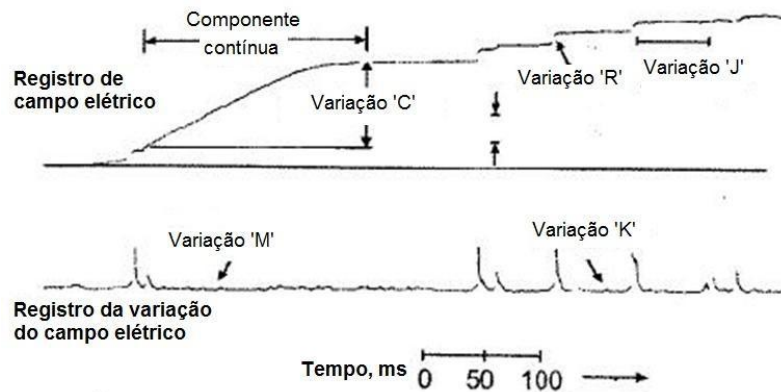


Figura 2.15 – Oscilograma de campo elétrico vertical indicando as assinaturas para diversos fenômenos.

Adaptado de [4]. (Convenção atmosférica)

2.7.2 Variações de campo associadas aos Stepped Leaders

Os *stepped leaders* marcam o início de uma descarga nuvem-solo e são constituídos quando um valor limiar de campo elétrico é atingido em um determinado volume da nuvem. Após sua constituição, existe a tendência de que as cargas se concentrem nas extremidades desde canal proporcionando novos passos à medida que a condição de campo elétrico na ponta do canal atinge o valor de ruptura. Caso o campo elétrico local seja intenso o suficiente para sustentar o canal recém criado, esse processo tende a se repetir em intervalos de tempo cada vez menores, evoluindo em muitos casos em direção do solo.

Estes passos produzidos no processo de descida de um *stepped leader* são detectados como variações rápidas de campo elétrico devido ao movimento de cargas do canal que se desloca para a parcela de canal recém ionizada. Pelo fato de que as cargas depositadas no canal (negativas no caso de uma descarga negativa) se aproximam cada vez mais do solo, o efeito gerado pelos passos sucessivos é um aumento gradual do campo elétrico vertical (campo mais positivo, segundo a convenção física). Este aumento vai acontecendo por passos e o campo elétrico de um canal precursor de descarga atmosférica confere um

formato conhecido como BIL, como indica a Figura 2.16. Este formato destaca as três etapas na ocorrência de um *stepped leader*. A primeira é denominada ruptura (do inglês, *breakdown*), a segunda é conhecida como intermediária e por fim a etapa do *leader*. As três etapas são detalhadas nas seções a seguir.

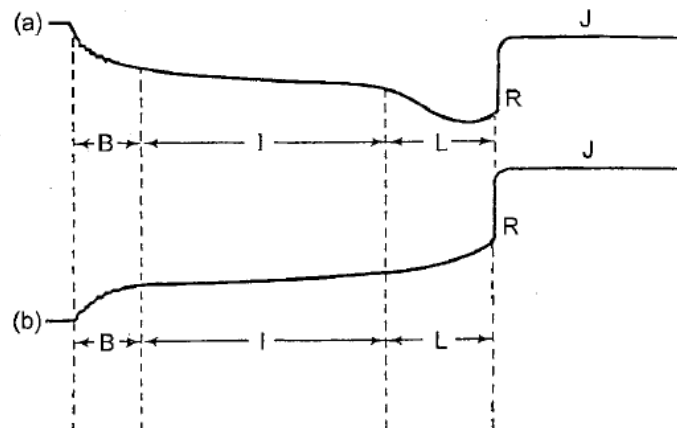


Figura 2.16 – Exemplos de campo elétrico vertical indicando o perfil de *stepped leaders*. (Convenção Atmosférica) (a) Medição realizada próxima à ocorrência da corrente de retorno (até 2 km aprox.) (b) Medição realizada a partir de 5 km. [8]

2.7.2.1 Ruptura inicial (*breakdown*)

A Ruptura Inicial (ou Ruptura Preliminar) é o processo que inicia ou leva ao início da formação do canal descendente precursor da descarga. Representa a fase em que o canal é formado no interior da nuvem. Nesta etapa, ocorre o desenvolvimento de um *leader* que pode se direcionar para o solo como descrito mais a frente. Este é um evento ainda pouco conhecido e documentado já que ocorre no interior da nuvem e existe intensa atividade elétrica na região que não é necessariamente relacionada com a descarga nuvem-solo a ser formada. Contudo, existem três fatores que fortalecem a idéia de que esse evento ocorre de maneira independente dos outros processos elétricos existentes no interior das nuvens:

- Luminosidade na nuvem centenas de milissegundos antes do aparecimento do canal precursor;
- Mudanças significativas no campo elétrico centenas de milissegundos antes do fluxo da corrente de retorno;
- O fato da duração total da formação do canal precursor não exceder algumas dezenas

de milissegundos;

A primeira abordagem para ruptura foi feita por Clarence e Malan [8]. Ela foi detalhada como uma ruptura vertical entre os centros de carga negativa e de positiva inferior da nuvem. Proctor et al. [9] considerou a ruptura apenas como o início da formação do canal precursor, não um evento isolado. Os estudos mais recentes indicam que a ruptura é uma seqüência de canais que partem do centro de carga da nuvem em direções aleatórias e um deles evolui para o canal precursor [4].

A ruptura inicial é associada a uma mudança lenta de campo elétrico caracterizada na Figura 2.16 pela letra B. Uma característica importante da assinatura de campo elétrico desta fase é a presença de um trem de pulsos (Figura 2.17). Esse trem de pulsos, cuja duração é da ordem de aproximadamente 1 ms, é considerado a marcação da transição entre a ruptura e a formação do canal precursor de descarga. Os pulsos de campo elétrico são bipolares, com polaridade inicial igual à do campo associado à corrente de retorno. A amplitude pode chegar a ser comparável ao pulso da descarga de retorno, mas na maioria das vezes é muito menor, chegando a ser desprezível. A duração individual do pulso tem média em torno de 4.8 μs , mas pode ser bem maior, até 40 μs e o intervalo entre pulsos é da ordem de 65 μs [4].

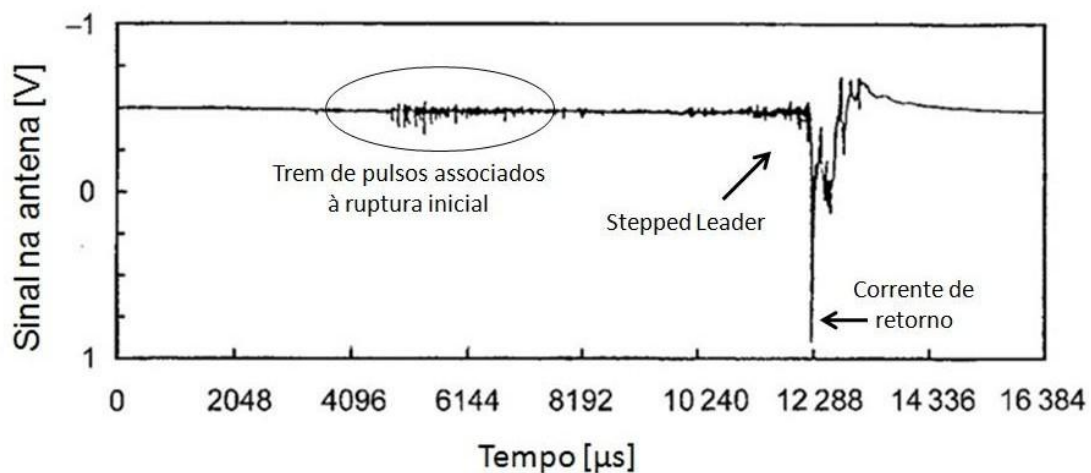


Figura 2.17 – Exemplo de medição de derivada de campo elétrico (dE/dt) vertical indicando as assinaturas da ruptura inicial. (Convenção Atmosférica) Adaptado de [4].

O trem de pulsos que marca a ruptura inicial antecedendo o canal precursor e a corrente de retorno são destacados no registro de derivada de campo elétrico, dE/dt , (Figura 2.17). Neste caso em específico, os pulsos preliminares foram menores que o pulso da corrente de retorno.

2.7.2.2 *Estágio intermediário*

A segunda etapa de formação de um *stepped leader*, denominada estágio intermediário pode ou não ocorrer [4]. Trata-se de um período de tempo em que não ocorre aparente crescimento do canal, sendo considerado por [8] como o tempo necessário para que o canal criado na fase “B” adquira cargas do ambiente próximo. Este intervalo de tempo pode durar até 400 ms, mas não é normalmente observado nos registros obtidos na Estação do Morro do Cachimbo.

2.7.2.3 *Canal precursor de descarga (leader)*

A terceira etapa, ‘L’ corresponde à evolução do *leader* propriamente dito. No caso de uma primeira corrente de retorno de uma descarga negativa descendente, o *leader* é a fase em que o canal ionizado vai se aproximando do solo por passos sucessivos. A cada novo passo, com o comprimento médio de 50m [1], o potencial da nuvem vai sendo aproximado do solo, proporcionando um aumento no campo elétrico vertical positivo (segundo a convenção física). O intervalo de tempo médio entre os passos é da ordem de 50 μ s, e vai decrescendo na medida em que o canal se aproxima do solo.

No começo dos estudos do canal precursor, ele foi classificado em duas categorias: tipo- α e tipo- β [4]. O canal tipo- α é um canal bem-comportado. Sua velocidade de descida é de 1×10^5 m/s, seus passos curtos, pouco brilhantes e com pouca ramificação. A grande maioria dos canais precursores é desse tipo. Já o canal tipo- β , apresenta dois estágios de evolução: O primeiro, mais próximo da nuvem, tem uma velocidade maior de descida, 1×10^6 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 .

Uma possibilidade levantada em estudos atuais [4] é que os canais tipo- α e tipo- β sejam exatamente o mesmo canal, porém o primeiro estágio, mais violento, do tipo- α , ocorre dentro da nuvem. As características do canal mais comum, tipo- α , são definidas a seguir.

A velocidade de descida do canal é próxima de 1×10^5 m/s quando este se encontra ainda longe do solo. Com sua aproximação, a velocidade sobe para aproximadamente 1×10^6 m/s. A duração típica da formação de todo o canal descendente é de algumas dezenas de milissegundos. A carga total acumulada no canal é considerada próxima ao valor neutralizado pela primeira corrente de retorno, em torno de 5 C. A corrente que flui pelo canal tem valores muito diferentes para momentos e canais distintos. Esse valor varia entre 50 e 5000 A, de acordo com a literatura [4].

O perfil do campo elétrico associado ao canal precursor é observado com o detalhamento da derivada de campo elétrico, denominada dE/dt . Nota-se a presença de pulsos que são diferentes dos pulsos associados à ruptura preliminar, como pode ser observado na Figura 2.18.

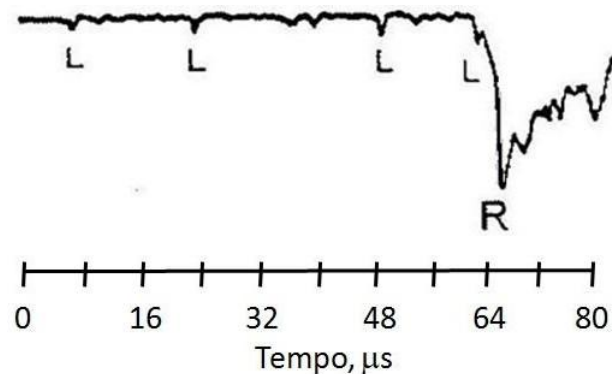


Figura 2.18 – Exemplo de medição de derivada de campo elétrico vertical, dE/dt . Adaptado de [4] (Convenção atmosférica)

Os pulsos presentes no registro de campo elétrico na Figura 2.18 estão associados à formação e propagação do canal precursor de descargas (*leader*). Portanto as variações de campo elétrico assinaladas na figura com a letra L e o posterior crescimento até a letra R englobam a fase de desenvolvimento do *leader*. Repare que os pulsos da ruptura inicial diferem dos pulsos “L” originados dos pulsos de corrente a cada passo na formação do canal precursor. Os pulsos associados ao canal precursor são unipolares e com variações

suaves, enquanto a ruptura inicial produz pulsos bipolares e com variações abruptas. Além disso, a duração individual média dos pulsos do *leader* varia de 1 a 2 μs , com um tempo de frente da ordem de 0,1 μs , aparentemente mais rápido que na ruptura inicial. O intervalo entre pulsos também é menor, com variações entre 15 e 25 μs .

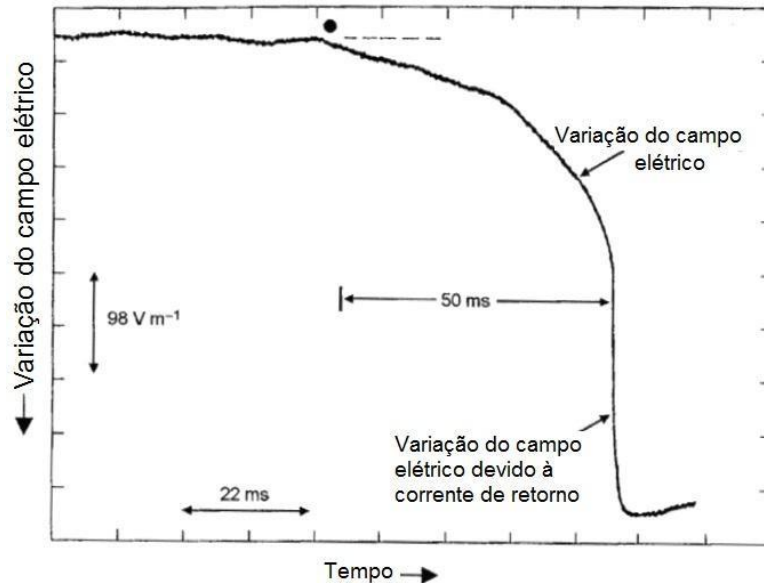


Figura 2.19 – Exemplo de medição de campo elétrico vertical. Este tipo de registro de campo elétrico é conhecido como dE e ilustra variação eletrostática. Adaptado de [4]. (Convenção física)

A forma de onda de campo elétrico, denominado dE, ilustrada na Figura 2.19 apresenta formato bem definido para o *leader*, uma variação lenta e contínua que dura por toda a formação do canal, antecedendo a variação rápida associada ao fluxo da corrente de retorno. Com a aproximação do canal do solo, a inclinação da onda tem seu módulo aumentado. A polaridade da variação depende da distância horizontal entre o ponto de medição do campo e o ponto de incidência da descarga, como discutido a seguir.

O formato da Figura 2.19 pode ser mais bem compreendido se a seguinte situação for imaginada: Uma pessoa está no nível do solo com um medidor de campo elétrico e um canal precursor começa a se propagar em sua direção, aproximando-se do solo. Considerando que o medidor de campo elétrico utilizado foi calibrado para medir a parcela eletrostática do campo elétrico (isto é possível se acrescentamos um filtro passa-baixas na entrada do medidor, por exemplo), o observador irá perceber um crescimento no módulo do campo elétrico vertical à medida que o canal se aproxima trazendo o potencial

da nuvem para alturas cada vez menores. Como a diferença de potencial entre a nuvem e o solo vai sendo “aplicada” em camadas cada vez menores da atmosfera, o medidor vai mostrar valores de campo elétrico cada vez maiores, em módulo, até que a corrente de retorno aconteça.

O mesmo fenômeno pode ser visto na Figura 2.16, onde se vê que a aproximação do canal resulta em um crescimento do campo elétrico vertical medido no nível do solo. Portanto, a variação de campo elétrico nomeada de ‘L’ naquela figura representa o efeito de pequenos acréscimos no campo vertical devido à aproximação do canal por passos separados de aproximadamente 50 μ s.

Agora, imagine que existam dois medidores de campo elétrico, um deles relativamente próximo ao canal de descarga, cerca de 1 km de distância e outro localizado um pouco mais distante, cerca de 5 km. De acordo com o que foi mostrado na seção 2.4, nas Figuras 2.6, 2.8 e 2.12, e considerando que o canal precursor de descarga se propague para baixo e abaixo dos centros de carga, sabe-se que para cada distância horizontal dos centros de cargas existe um centro específico que irá contribuir com maior influência no campo resultante. Assim, se existem diferentes observadores a diferentes distâncias do canal descendente, o efeito da propagação do canal será percebido com intensidades diferentes. E mais do que isso, dependendo da distância horizontal do canal, e conseqüentemente do centro de cargas mais influente naquela região, o efeito produzido pelo canal no campo resultante pode contribuir positivamente ou negativamente para o campo resultante, como pode ser observado na Figura 2.11.

Por exemplo, quando o observador está próximo do canal descendente, o centro de cargas que mais influencia o campo elétrico vertical naquele local é o centro negativo. Como o centro de cargas negativo contribui positivamente para o campo resultante, segundo a convenção física, e a aproximação do canal também contribui positivamente, a variação de campo elétrico vertical da fase ‘L’ será positiva, segundo a convenção física. Já para distâncias intermediárias, cerca de 5 km, a maior influência no campo resultante é causada pelo centro de cargas positivo que contribui negativamente para a somatória. Assim, como

a aproximação do canal descendente contribui negativamente, ocorrerá a uma distância de 5 km uma variação negativa do campo elétrico segundo a notação física.

Exemplos de medição ilustradas no capítulo 4 ilustram o comportamento descrito acima, caso as variações de campo elétrico produzidas pelo *leader* ainda não estejam claras para o leitor.

2.7.3 Corrente de Retorno

As variações de campo elétrico vertical associadas às correntes de retorno podem ser separadas em duas partes:

- Diferença de campo elétrico entre os instantes anterior e posterior à passagem da corrente (remoção de carga da nuvem);
- Curva transitória de campo elétrico associada à propagação dos campos eletromagnéticos provenientes do fluxo de corrente.

Ambas as variações podem ser visualizadas na Figura 2.20. A variação rápida do campo elétrico pode ser vista na parte inferior como pulsos que, quando ampliados, revelam uma forma de onda que possui uma forte relação com a corrente de retorno [4]. Já o oscilograma superior ilustra como o campo elétrico estático cresce (convenção atmosférica) por degraus. Cada degrau de campo elétrico (ΔE) é o registro da remoção de carga da nuvem produzido pelas diversas correntes de retorno.

A Figura 2.20 ilustra a forma geral de variação do campo elétrico devido à ocorrência de correntes de retorno. Formas de onda semelhantes são mostradas nos capítulos posteriores em exemplos de dados adquiridos na Estação do Morro do Cachimbo. Porém, antes de comentar os resultados experimentais, convém analisar as variações de campo elétrico ilustradas na Figura 2.20 de acordo com o modelo do tripolo.

Os degraus de campo elétrico retratados possuem amplitudes maiores na medida em que a corrente de retorno se aproxima do ponto de medição. Para ilustrar este fato, a Figura

2.21 retrata a variação do campo dE na situação hipotética em que centro de cargas negativo da nuvem (Q_N) é completamente removido.

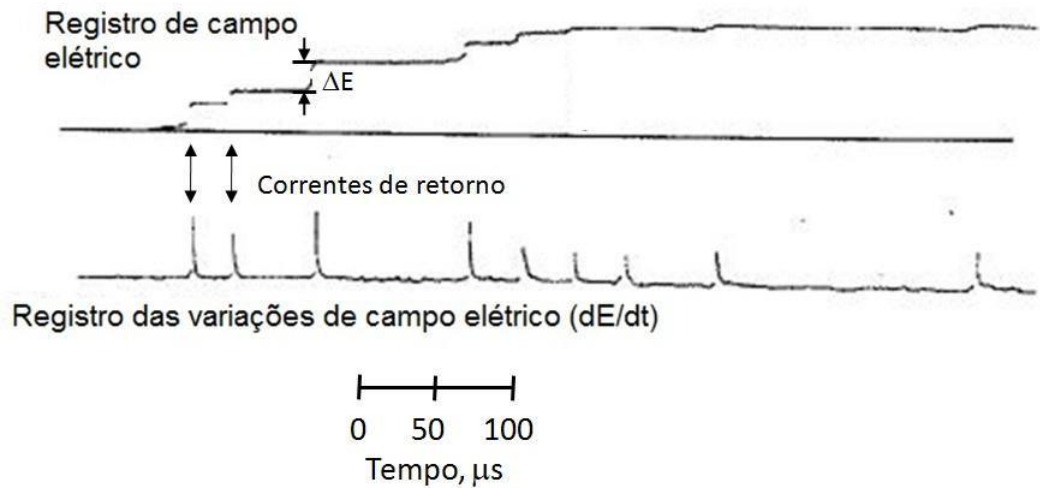


Figura 2.20 – Oscilograma de campo elétrico vertical indicando as assinaturas de campo para um conjunto de correntes de retorno de um *flash* (Convenção atmosférica) Adaptado de [4].

Note que a variação é negativa para todas as distâncias (convenção física), conforme o esperado. Este resultado simulado poderia representar fisicamente uma descarga nuvem-solo negativa de grandes proporções. Outra característica esperada, reside no fato das medições de campo elétrico próximas produzirem um ΔE maior, já que a contribuição inicial daquelas cargas para o campo também era maior.

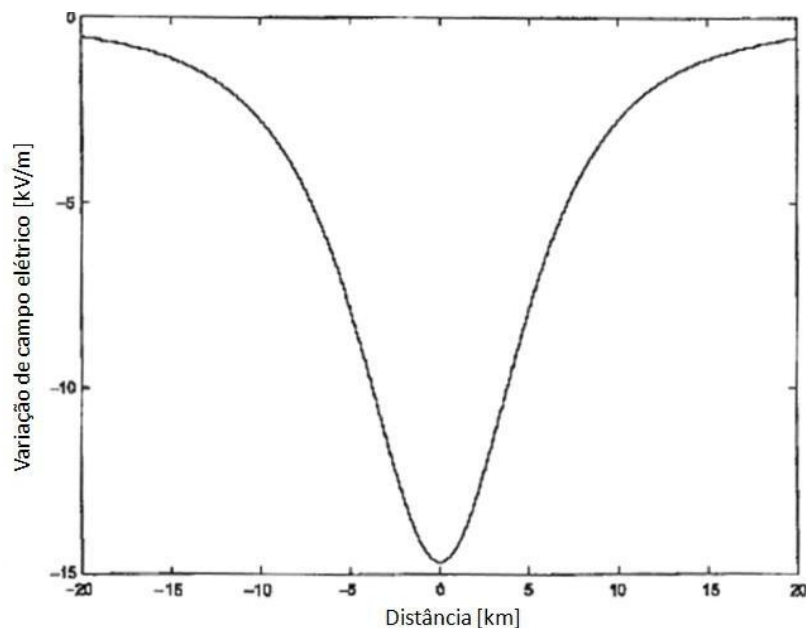


Figura 2.21 – Variação de campo elétrico vertical no nível do solo devido à remoção do centro de cargas negativo de uma nuvem (Convenção Física). Adaptado de [4].

Outra simulação de neutralização de cargas é ilustrada na Figura 2.22. Diferente da Figura 2.21, que ilustrou o ΔE devido à remoção do centro de cargas negativo, a Figura 2.22 mostra a variação de campo elétrico vertical no nível do solo devida à remoção de toda a carga presente em uma nuvem. Esta situação poderia ser fisicamente representada por uma grande descarga intra-nuvem que neutralizaria ambos os centros de carga, conferindo carga nula ao sistema.

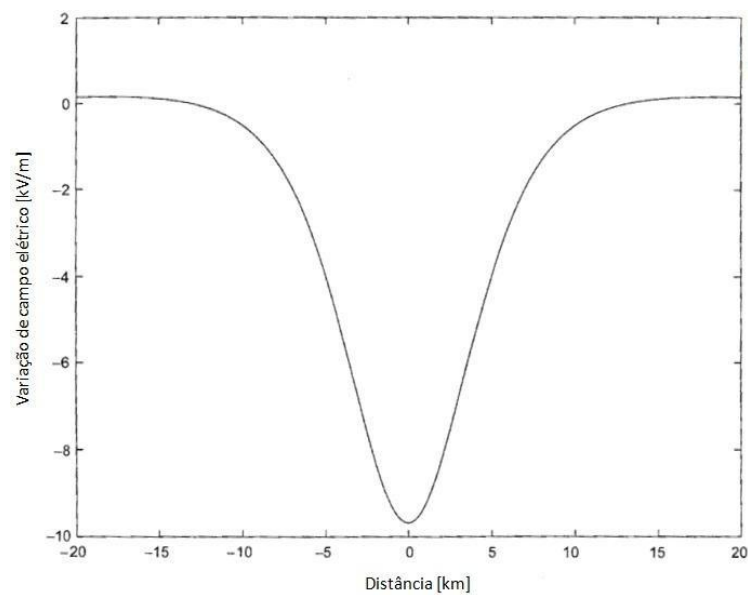


Figura 2.22 – Variação de campo elétrico vertical no nível do solo devida à remoção de ambos os centros de carga de uma nuvem (Convenção Física). Adaptado de [4].

Neste caso, o ΔE continua negativo nas proximidades dos centros de carga, com uma amplitude menor, porém, para distâncias maiores, a variação é positiva indicando que a influência do centro de cargas positivo Q_P é maior como mostrado e discutido anteriormente. Fica claro que o ΔE de um mesmo evento pode possuir polaridades diferentes dependendo da distância de observação, efeito semelhante ao que acontece com o canal precursor de descargas, o *stepped leader*.

Uma das figuras de variações de campo elétrico que ilustra muito bem o perfil de campo vertical à medida que uma nuvem se movimenta ou que o observador se desloca é a Figura 2.23. Aqui, tem-se um exemplo de medição [4] que durou cerca de uma hora e meia e registrou a passagem de uma nuvem de tempestade sobre o instrumento de medição de campo. Ao longo do tempo o campo lento (estático) vai sofrendo alterações graduais e a

partir das 12h40min, instante indicado com um traço vertical na figura, a polaridade do campo muda devido à influência do centro de cargas negativo da nuvem.

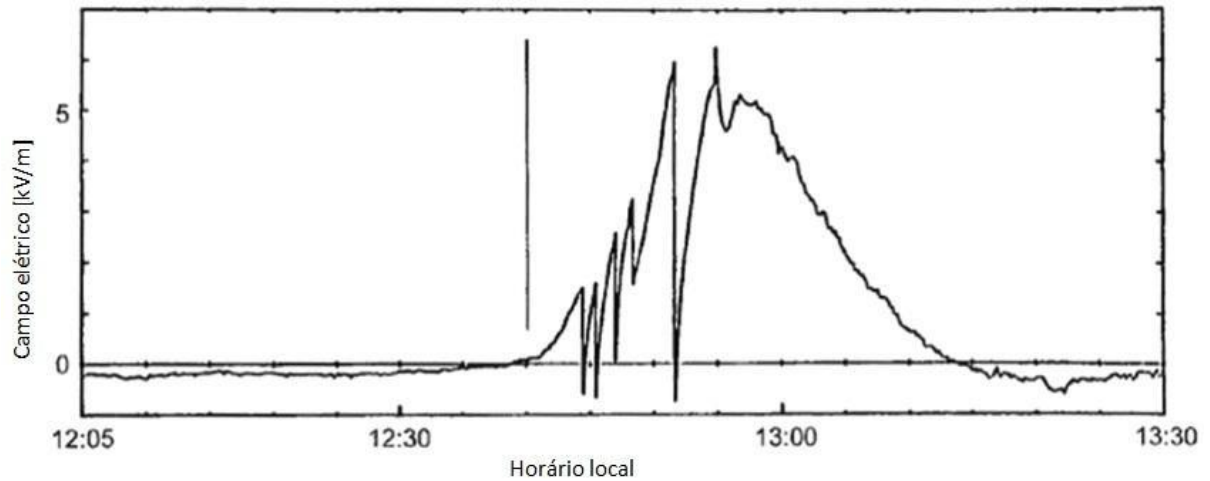


Figura 2.23 – Forma de onda de campo elétrico ilustrando a evolução de uma tempestade e a ocorrência de descargas atmosféricas. (Convenção física). Adaptado de [4].

A partir deste instante, o campo cresce em módulo rapidamente durante a chegada da nuvem sobre o local de medição até que várias descargas atmosféricas negativas nuvem-solo acontecem. O efeito imediato da descarga atmosférica é a redução do campo positivo como mostrado na figura. À medida que o tempo passa, o campo atinge um máximo que provavelmente coincide com o momento em que a região central da nuvem, do ponto de vista elétrico, passa sobre a estação de medição. Note que o efeito da descarga que ocorreu por volta de 12h51min foi muito mais pronunciado supostamente devido à pequena distância que separam o ponto de incidência e o ponto de medição.

O campo elétrico, a partir deste instante, começa a reduzir seu valor até aproximadamente 13h15min, horário que marca o final da tempestade e da influência do campo elétrico da nuvem sobre o instrumento de medição. O formato de sino da curva ao longo do tempo é comparável à Figura 2.6. Ambas apresentam formatos semelhantes apesar da última ser uma simulação enquanto a Figura 2.23 foi obtida em campo. A diferença entre estas figuras é simples: em uma ilustração o campo foi calculado para diversas distâncias, como se um observador caminhasse embaixo de uma nuvem registrando o campo e montando o perfil. Já no segundo caso, o observador (instrumento de medição) permaneceu imóvel enquanto a nuvem se deslocou sobre o observador, permitindo que o perfil fosse traçado ao longo do

tempo, além do registro das correntes de retorno.

2.7.4 Dart Leader

O processo de recarregamento do canal de descarga inicia a seqüência de uma ou mais descargas subseqüentes. Segundo relatos contidos na literatura, os canais precursoros de descargas subseqüentes podem ser classificados de três maneiras:

- Desenvolvimento contínuo por todo o canal, sem a presença de passos (Dart Leader);
- Desenvolvimento com a presença de passos regulares na parte inferior do canal (Dart-stepped Leader);
- Desenvolvimento com a presença de passos irregulares na parte inferior do canal (Chaotic Leader).

Considerando que o *Dart-stepped Leader* envolve passos, é natural que as formas de onda geradas por este processo se assemelhem àquelas analisadas anteriormente na seção do canal precursor de descargas. Desta forma, foi reservada para esta seção a descrição do *Dart Leader* e o do *Chaotic Leader*.

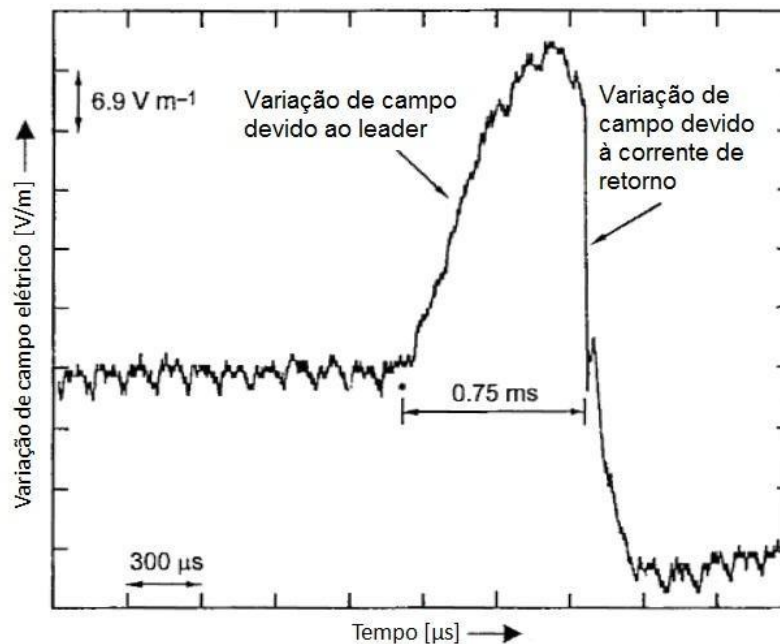


Figura 2.24 – Forma de onda de campo elétrico de um canal precursor de descarga subseqüente. Este registro foi obtido a partir da quinta corrente de retorno de um flash que ocorreu a 7.6 km do ponto de medição.

Adaptado de [4]. (Convenção física)

A Figura 2.24 retrata, segundo a convenção física, a forma de onda considerada padrão [4] para os canais precursores de descargas subseqüentes. O formato de ‘gancho’ é semelhante à parcela ‘L’ do padrão BIL analisado na seção 2.7.2, porém ocorre em intervalos de tempo da ordem de 10 a 100 vezes menores do que os envolvidos nos *stepped leaders* devido às maiores velocidades associadas e ao fato de que o canal é estabelecido de maneira contínua. De maneira análoga aos canais precursores de descargas, o módulo do campo cresce à medida que o canal se aproxima do solo e sofre uma variação repentina com o fluxo da corrente de retorno.

Já o termo Chaotic Leader, criado por Weidman [10], se refere aos eventos em que o leader ocorre com velocidades e amplitudes acima da média. Estes casos estão normalmente associados a grandes correntes de retorno subseqüentes e apresentam ramificações e comportamento caótico na parte inferior do canal. Por se tratar de um evento raro, ainda faltam informações e dados experimentais que justifiquem sua classificação e descrevam melhor este tipo de desenvolvimento de canal.

2.7.5 Componente contínua

A componente contínua é usualmente definida como uma corrente de amplitude relativamente baixa com valores típicos variando entre algumas dezenas a algumas centenas de ampères, que sucede imediatamente a corrente de retorno utilizando o mesmo canal e possui duração de algumas dezenas a centenas de milissegundos [4].

Apesar de possuir baixa amplitude, as componentes contínuas costumam causar danos severos devido às grandes quantidades de carga transferidas durante sua ocorrência. Portanto, trata-se de um processo de grande importância para os novos desenvolvimentos e melhorias dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas adotados em linhas de transmissão [11].

A Figura 2.25 retrata de forma bem ilustrativa as variações de campo elétrico associadas às diversas etapas de ocorrência de uma descarga atmosférica plena. A escala de tempo utilizada para esta forma de onda destaca a duração de uma componente contínua, porém

não permite a visualização dos canais precursor de descargas subseqüentes.

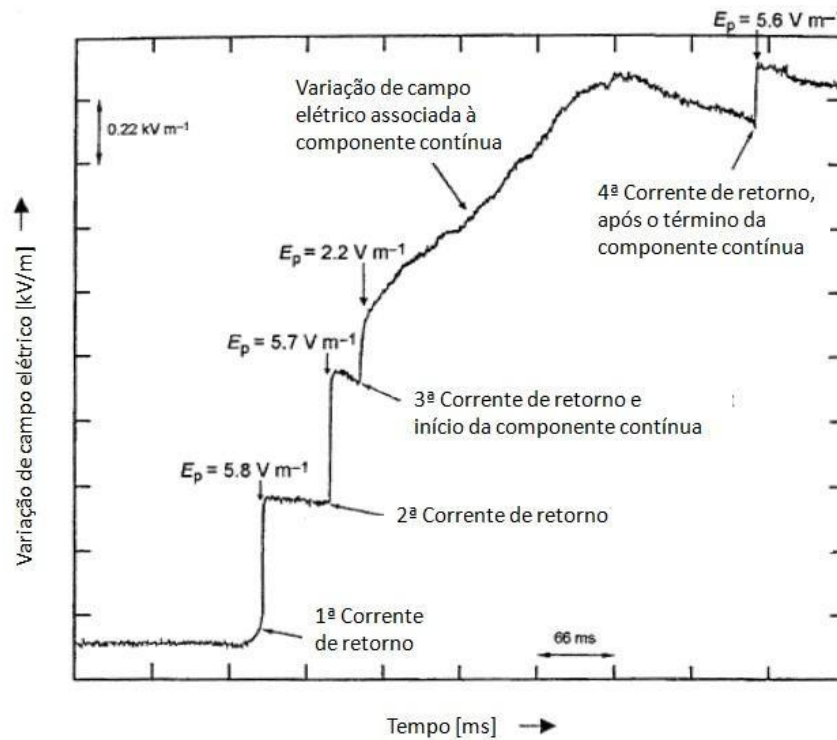


Figura 2.25 – Forma de onda de campo elétrico de uma descarga atmosférica negativa plena em que a componente contínua foi registrada entre a 3ª e 4ª correntes de retorno. Adaptado de [4]. (Convenção atmosférica)

Inicialmente, um pequeno “joelho” pode ser notado nos instantes que antecedem a primeira corrente de retorno. Esta curva caracteriza o canal precursor de descarga ou *leader*, a fase ‘L’ do padrão “BIL” discutido na seção 2.7.2. Em seguida, ocorrem os ΔE associados à primeira, a segunda e a terceira correntes de retorno. Pelo mesmo motivo que ocorre uma variação positiva, segundo a convenção atmosférica, quando ocorrem correntes de retorno, a componente contínua também contribui para o descarregamento do centro de carga negativo da nuvem e, portanto aumenta o módulo do campo positivo.

É importante lembrar que o evento ilustrado na Figura 2.25 foi uma descarga plena negativa, daí o formato de onda da componente contínua registrado possuir a mesma polaridade da variação de campo produzida pela corrente de retorno. Outro ponto de destaque é a grande variação na amplitude do campo elétrico associada à componente contínua. Esta é comparável ao ΔE de todas as correntes de retorno juntas devido ao fato mencionado anteriormente, de que as componentes contínuas são responsáveis pela

transferência de grandes quantidades de carga.

No capítulo 4, são analisadas formas de onda obtidas na estação do Morro do Cachimbo semelhantes à figura analisada. A seguir, o campo elétrico produzido pelos processos J e K é brevemente abordado.

2.7.6 Processos J e K

Os processos J e K são fenômenos que ocorrem nos intervalos entre as correntes de retorno e estão provavelmente associados à conexão de novos centros de carga a uma parcela do canal ionizado que está se desenvolvendo novamente [4].

O processo J (Junction) ocorre nas nuvens e produz uma variação relativamente lenta do campo elétrico na escala de tempo de dezenas de milissegundos. A variação de campo pode ser de polaridade semelhante à corrente de retorno ou não e, diferentemente da componente contínua, tal variação não está relacionada com o fluxo de uma corrente para a terra.

Já os processos denominados K ocorrem sobrepostos ao processo J como uma rápida oscilação no campo elétrico com constantes de tempo associadas da ordem de alguns milissegundos a algumas dezenas de milissegundos. As variações causadas pelo processo K são geralmente positivas, segundo a convenção física, para descargas observadas até aproximadamente 5 km e podem ser tanto positivas quanto negativas para distâncias maiores [4].

A Figura 2.26 ilustra uma corrente de retorno subsequente que foi precedida pela ocorrência dos processos J e K. Como descrito anteriormente, o processo J é relativamente lento enquanto as variações de campo elétrico associadas aos processos K apresentam oscilações mais rápidas. As indicações M1, M2 e M3 se referem a processos que ocorrem no instante da componente contínua.

Existe divergência na literatura [4] com relação à classificação destes processos. Alguns autores questionam a distinção do processo J em relação às componentes contínuas e a dificuldade de atribuir eventos físicos ao processo K.

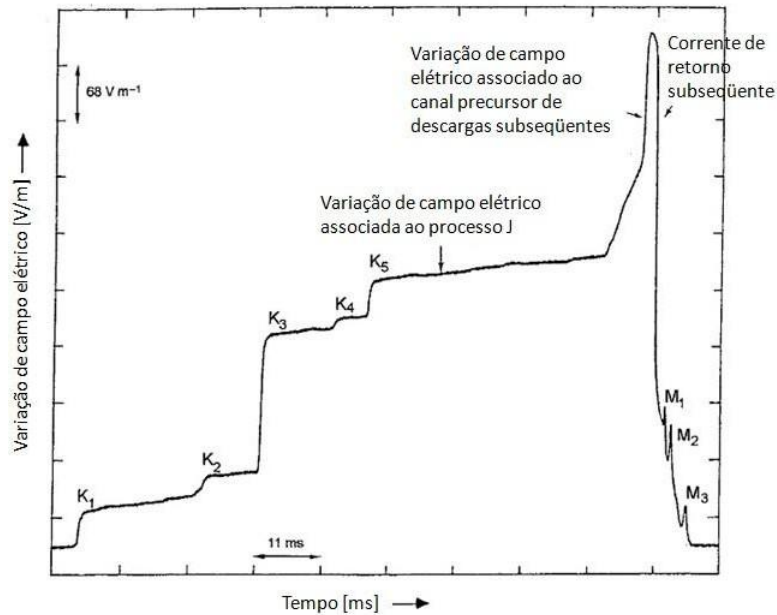


Figura 2.26 – Forma de onda de campo elétrico de uma descarga atmosférica subsequente antecedida por processos J e K.

Adaptado de [4]. (Convenção Física)

Estes processos encerram as variações de campo elétricos descritas neste capítulo. Foram brevemente analisados os mecanismos de eletrificação das nuvens, o modelo de carga do tripolo e as variações de campo elétrico associadas às diversas etapas de formação das descargas atmosféricas.

O próximo capítulo descreve o sistema de medição utilizado na Estação do Morro do Cachimbo para obter os registros das formas de onda de campo elétrico analisadas no Capítulo 4.

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DA ESTAÇÃO DO MORRO DO CACHIMBO

3.1 Introdução

Este capítulo apresenta os sistemas de medição e aquisição de dados utilizados pelo autor para a coleta dos dados experimentais na Estação do Morro do Cachimbo (MCS). Durante o trabalho, foram analisadas formas de onda de campo elétrico e de corrente, obtidas a partir de descargas atmosféricas que incidiram diretamente ou nas proximidades da torre instrumentada da Estação.

Inicialmente, uma breve introdução histórica sobre a estação é feita, apresentando-se os instrumentos utilizados e o funcionamento geral dos medidores. Em seguida, são detalhadas as modificações e melhorias realizadas ao longo deste trabalho para cada uma das grandezas mensuradas, descrevendo-se a configuração dos instrumentos até o estado atual.

3.1.1 Breve histórico da Estação de Pesquisas do Morro do Cachimbo

A construção da Estação de Pesquisas do Morro do Cachimbo (MCS) está inserida em um

contexto de pesquisa de descargas atmosféricas no estado de Minas Gerais realizada pela Companhia Energética do Estado de Minas Gerais (CEMIG). Durante as décadas de 1970 e 1980, vários estudos foram realizados como o levantamento de índices cerâmicos e de densidade de descargas obtidos através de uma rede de contadores de descargas [1]. Paralelamente, foram realizadas avaliações da distribuição de correntes de descargas em linhas de transmissão e seus respectivos equipamentos, revelando a necessidade de estabelecer os valores de referência para as descargas atmosféricas no Estado de Minas Gerais.

Desta forma, foi construída a primeira estação de pesquisa de raios da América Latina. Finalizada em 1985, a MCS foi projetada por ERIKSSON [12, 13, 14] e possuía o objetivo de medir as grandezas físicas associadas aos raios incidentes diretamente em um mastro captor de 60m, assim como os parâmetros das formas de onda de corrente importantes para a engenharia de proteção. Originalmente, a estação funcionou na configuração ilustrada na Figura 3.1.

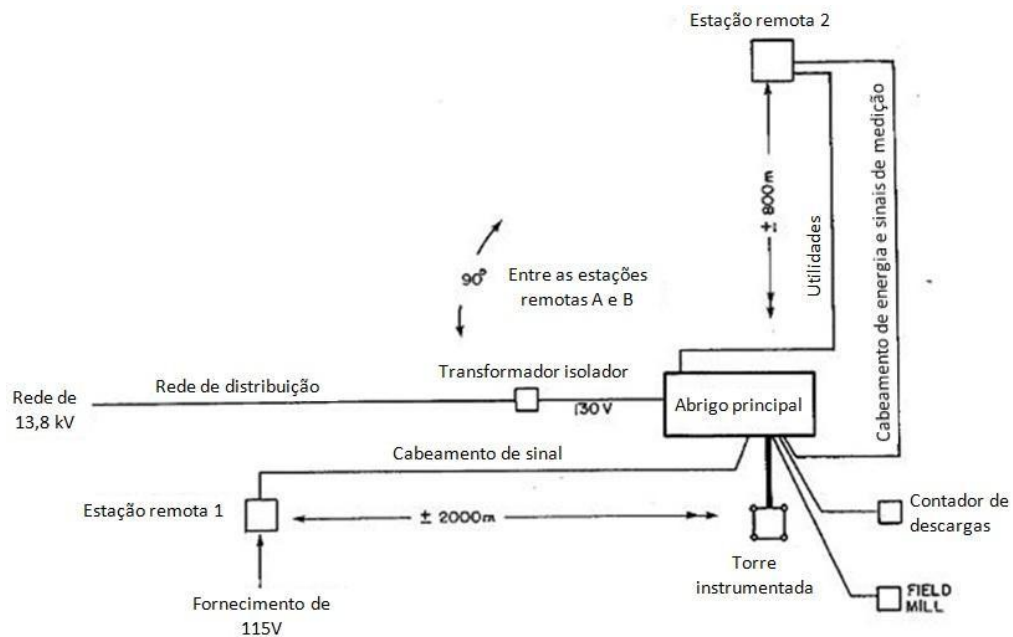


Figura 3.1 – Diagrama ilustrativo da concepção original da estação de pesquisas do Morro do Cachimbo. Adaptado de [13].

Nesta configuração, a estação contava com duas estações remotas de aquisição de imagens, um contador de descargas, um sensor eletrônico de campo elétrico, o *Field Mill* e o mastro captor que possuía dois transdutores de corrente em sua base. Os sinais obtidos na torre

eram levados ao abrigo principal onde os equipamentos de processamento dos sinais e de gravação estavam localizados.

O abrigo foi projetado para funcionar ininterruptamente. O contador de descargas e o Field Mill eram utilizados para detectar a ocorrência e proximidade dos eventos. Na medida em que as descargas atmosféricas se aproximavam da estação, os registradores eram automaticamente ligados e preparados para o modo de gravação. No caso de falta de energia, um banco de baterias localizadas no cômodo ao lado da sala de equipamentos supria a energia através de um conjunto retificador-inversor.

Ao longo de sua existência, a estação produziu um banco de dados que estabeleceu os padrões de descargas atmosféricas no estado de Minas Gerais [15]. Os resultados obtidos motivaram vários estudos provendo um conhecimento considerável sobre o fenômeno físico [23].

3.1.2 A estação amplia e aperfeiçoa seu conjunto de instrumentos

A partir do ano de 2001, novas perspectivas de pesquisa se tornaram disponíveis e uma nova fase se iniciou para a estação MCS com a instalação de novos sensores de corrente e posteriormente com a instalação de sensores de campo elétrico. Uma nova câmera também foi acrescentada a crescente instrumentação que permitiu novas análises e investigações.

Os novos sensores de campo elétrico foram instalados na MCS com a finalidade de estudar os canais ascendentes de descargas atmosféricas [16]. Na medida em que este estudo foi desenvolvido, percebeu-se que os dados obtidos permitiam análises de outras fases da formação e ocorrência dos raios além dos canais ascendentes. Foi percebido que a estação possui potencial para realizar estudos que abrangem os perfis de campo elétrico devidas às diversas fases da descarga atmosférica e a maneira como estes campos se propagam e se atenuam à medida que se distanciam do ponto de incidência. Assim, foi decidido que outros sensores de campo elétrico deveriam ser instalados nas proximidades da torre instrumentada, de forma a complementar os dados obtidos no local.

Neste cenário insere-se esta dissertação de mestrado, que possui o objetivo de analisar as formas de onda do campo elétrico originado por descargas que incidiram nas proximidades ou diretamente na torre instrumentada, incluindo alguns raros casos em que foi possível medir a corrente de retorno em sua base. A abordagem deste capítulo foi concentrada no detalhamento dos sistemas de medição instalados, modificados ou melhorados ao longo do trabalho desenvolvido nesta dissertação. Para melhor entendimento por parte do leitor, os sistemas de medição foram separados em relação às grandezas registradas:

1-) Sistemas de Medição de Corrente

2-) Sistemas de Medição de Campo Elétrico

As seções seguintes exploram os sensores utilizados em cada sistema, seu funcionamento e características elétricas e/ou técnicas, englobando os sistemas de aquisição de dados desde o hardware utilizado passando pelo cabeamento, condicionamentos de sinais e filtros.

3.2 Sistemas de medição de correntes

As medições de forma de onda de corrente foram originalmente projetadas por Ericksson para ser adquiridas por um conjunto de bobinas de Pearson [1]. O caminho percorrido pela corrente na torre instrumentada foi projetado de tal forma que as correntes de baixa amplitude são medidas em uma bobina que suporta menores amplitudes de corrente, mas também consegue medir com boa resolução ondas com tempos de subida mais rápidos. Esta bobina, modelo *Standard CT 3025* e denominada pela equipe de medições da MCS de bobina de baixas correntes era responsável pelo registro das formas de onda que antecedem a parte impulsiva da corrente de retorno podendo registrar formas de onda completas que possuam baixas amplitudes. O sistema funcionou nesta configuração em que as descargas atmosféricas de grande intensidade não eram registradas nesta bobina, já que um gap de ar com distância calculada era rompido no instante em que o valor de corrente ultrapassava o fundo de escala escolhido. Quando o sistema de medição de campo elétrico foi instalado na Estação, uma nova bobina de Pearson, modelo *Standard CT*

101 foi instalada pelos pesquisadores Lothar Ruhnke, Vladslav Mazur e pelo Engenheiro Renato Zica [16] e substituiu a antiga bobina de pequenas correntes. A nova bobina suporta até 50 kA de máximo valor de pico, segundo dados do fabricante, porém na prática valores de pico superiores foram medidos sem causar aparente dano ao transdutor. Esta maior robustez a valores de pico superiores aliada à maior banda passante, de 0,25 Hz até 4 MHz, em relação ao modelo anterior, permitiu sua instalação no condutor para Terra sem gap, em série com o outro transdutor de corrente.

A outra bobina, denominada bobina de grandes correntes, modelo *Standard CT 1080*, suporta maiores amplitudes de corrente, até 200 kA, porém não consegue reproduzir tempos de frente muito pequenos, devido à limitação de sua banda de passagem de altas frequências, de 3 Hz até 1.5 MHz.

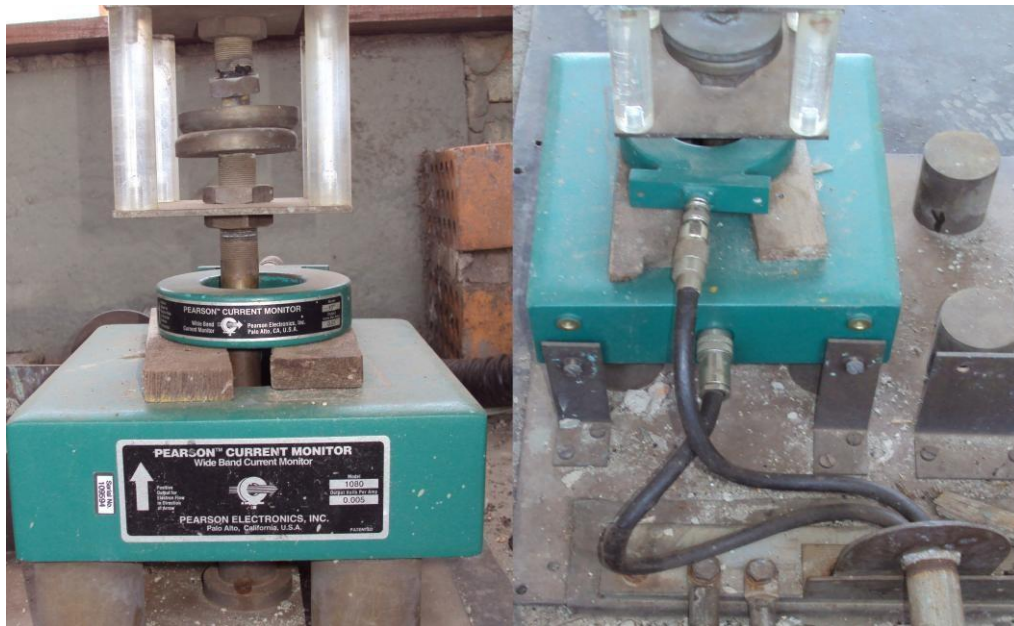


Figura 3.2 – Montagem das bobinas Pearson e conexão dos cabos coaxiais que levam os sinais para o abrigo da Estação do Morro do Cachimbo

As bobinas são conectadas separadamente à estação de medições através de cabos coaxiais RG-58, como ilustrado pela Figura 3.2. A base da torre é conectada em malha de aterramento e uma placa de metal é usada como caminho de baixa impedância entre a torre e a barra de terra da estação de medições. Na entrada do abrigo, todos os sinais passam por supressores de surto (GDTs) e seguem em direção aos divisores resistivos até

alcançarem por fim os instrumentos de aquisição e gravação.

A bobina de grandes correntes possui uma relação de transformação de 5 mV/A. Seu sinal é atenuado de 25 vezes em um divisor de impedâncias desenvolvido por Eriksson, de forma que em uma escala de 0 a 15 volts, o fundo de escala de medição é de 150 kA. Já a bobina de pequenas correntes possui relação de 10 mV/A, sendo seu sinal atenuado de 3 vezes, proporcionando um fundo de escala de 9 kA. Após passar pelo supressor de surto (GDT) localizado na entrada do abrigo, os sinais de corrente são submetidos a grampeadores de tensão (MOVs) na entrada do circuito de medição para garantir que as tensões máximas permitidas pelas placas de aquisição sejam respeitadas, como pode ser visualizado na Figura 3.3.

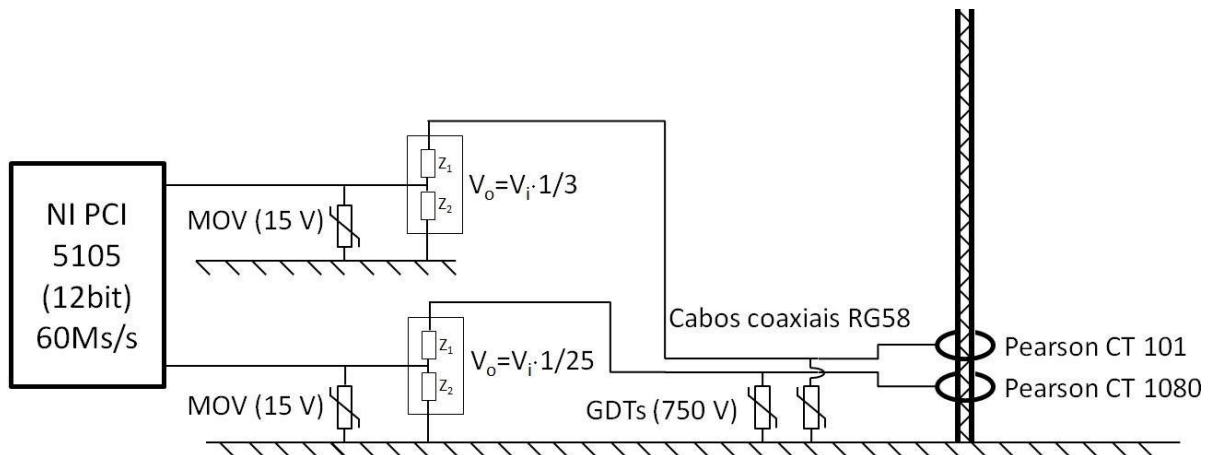


Figura 3.3 – Diagrama esquemático do sistema de medição de correntes de descargas.

Os sinais elétricos de corrente fornecidos pelas bobinas são conectados a um computador no abrigo da MCS que contém a instrumentação para a aquisição destes sinais. A conversão e armazenamento das formas de onda são feitas por uma placa de aquisição de dados da National Instruments, modelo NI PCI 5105, que contém conversores analógico-digitais instalados em uma placa PCI de oito canais de aquisição de 12 bits cada e que funciona com taxas de amostragem de até 60 Mega samples/s (Ms/s). Esta taxa de aquisição permite uma boa reconstrução das partes impulsivas das formas de onda.

Os recursos de hardware e software da placa de aquisição de dados são configurados de acordo com o tipo de medição realizada. Fundamentalmente, para os fins de aquisição de

grandezas elétricas associadas às descargas atmosféricas, utiliza-se o modo de aquisição conhecido como *pré-trigger*. Trata-se de um modo de armazenar digitalmente as tensões em que o evento para iniciar a gravação dos dados não necessariamente coincide com o início do registro. Ou seja, neste modo de aquisição, uma memória denominada buffer circular é constantemente preenchida com as tensões dos transdutores até o instante em que o evento para iniciar a gravação acontece. Neste instante, o controlador da placa de aquisição copia todo ou parte do conteúdo este buffer para o disco rígido, fornecendo dados dos transdutores relativos a instantes anteriores ao *trigger*. Isto possibilita que os processos físicos que antecedem o raio também possam ser gravados e analisados.

A placa de aquisição é programada através do software LabVIEW® no qual, blocos de aquisição, leitura e escrita na memória são configurados e ligados de acordo com as especificações de cada sistema de medição. Até o início desta dissertação, os sinais das bobinas de medição de correntes eram gravados em um sistema de armazenamento de dados composto por um par de osciloscópios Nicolet 2090 ligados a um controlador modular HP, modelo 9220 que comunicava com os osciloscópios via protocolo GPIO.



Figura 3.4 – Gabinete para blindagem do sistema de medições de corrente (Direita). Detalhe do computador e das conexões descritas na Figura 3.3 no interior do gabinete (Esquerda)

Com a substituição do antigo sistema de armazenamento de dados por um PC com a placa de aquisição de dados, o autor desta dissertação desenvolveu o software de aquisição em

LabVIEW® que grava os registros de corrente em arquivos *spreadsheet* (Figura 3.5). O sistema de aquisição funciona ininterruptamente, portanto este software utiliza o modo de aquisição contínua aguardando o instante em que a tensão de entrada ultrapasse o valor determinado de tensão (*trigger*). O valor escolhido corresponde a uma corrente de aproximadamente 100 A na bobina de pequenas correntes. No momento em que a corrente na torre ultrapassa esse limiar, um arquivo com os valores de corrente medida em ambas as bobinas começa a ser salvo no computador. Este arquivo abrange uma janela de tempo de 0.5 s e possui uma parcela de pré-trigger de 50 ms, ou seja, o início do arquivo registra os eventos que aconteceram 50 ms antes da corrente atingir o valor de 100 A. Para facilitar a identificação dos registros, cada arquivo armazenado possui em seu nome a hora (GMT) de ocorrência do evento de acordo com um relógio sincronizado por GPS.

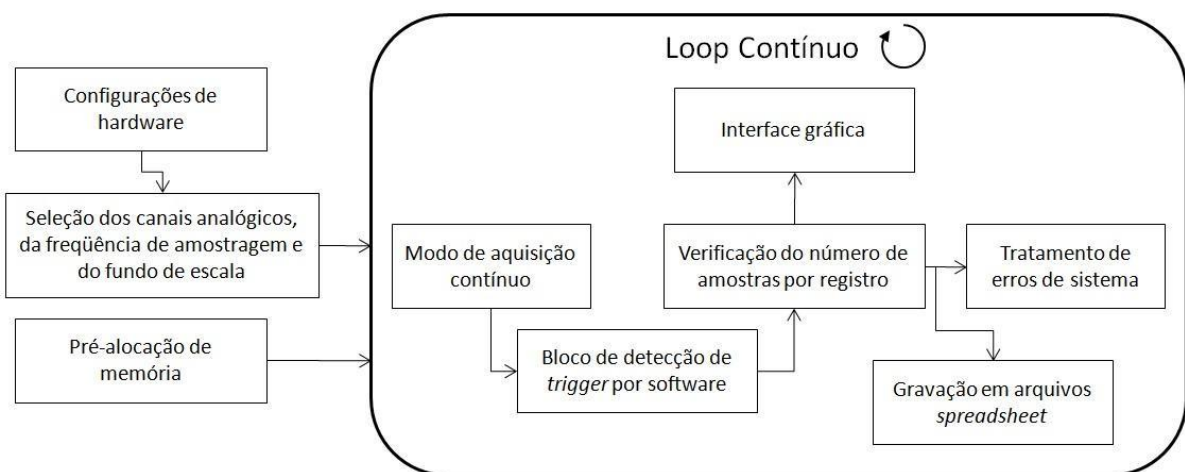


Figura 3.5 – Diagrama esquemático do software de medição de correntes de descargas.

A Figura 3.6 ilustra uma das formas de onda de corrente de descarga medidas na estação durante o desenvolvimento desta dissertação de mestrado. Esta forma de onda de descarga de retorno foi a primeira de uma seqüência de nove descargas consecutivas registradas no dia 31 de outubro de 2008, pertencentes a uma mesma descarga plena. A figura ilustra as formas de onda obtidas para a bobina de altas correntes (preto) e para a bobina de baixas correntes (azul). Como mencionado anteriormente, o fundo de escala de medição de baixas correntes é 9 kA, daí o motivo desta forma de onda grampeada próxima à amplitude de -10 kA. O objetivo da bobina de baixas correntes foi muito bem cumprido neste evento, registrando com boa resolução vertical os instantes que antecedem a

passagem da corrente pelo canal, como será visto no Capítulo 4.

No momento do fluxo da corrente de retorno, ambas as bobinas fornecem formas de onda de mesma amplitude até o instante em que a amplitude da corrente de descarga cresce para valores superiores a 9 kA. A partir deste momento, a bobina de altas correntes continua o registro da forma de onda enquanto a bobina de baixas correntes possui sua leitura limitada em 9 kA pelos grampeadores de tensão.

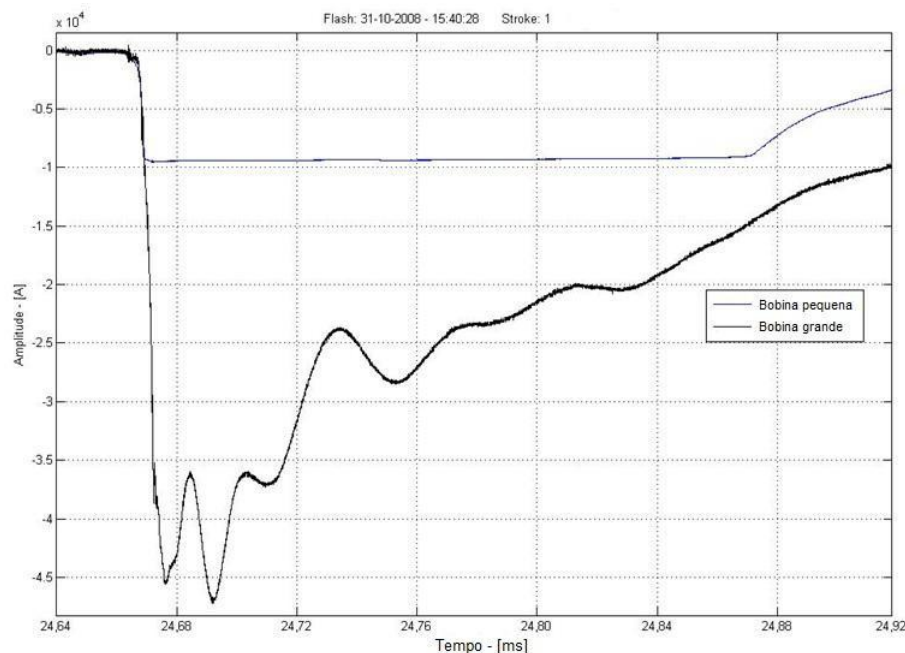


Figura 3.6 – Primeiro *stroke* de um *flash* com nove *strokes* registrados no dia 31/10/2008.

Esse foi um registro com valor de pico de 45 kA (primeiro pico) e tempo de subida de aproximadamente 10 μ s. Os detalhes desta e de outras formas de onda de corrente obtidos na MCS são analisados no capítulo 4 em conjunto com os dados adquiridos de campo elétrico. A seção seguinte detalha o sistema de medição utilizado para aquisição de campo elétrico na torre instrumentada.

3.3 Sistemas de medição de campo elétrico

3.3.1 Breve histórico sobre as medições de campo elétrico na estação de pesquisa do Morro do Cachimbo

As medições de campo elétrico realizadas na Estação do Morro do Cachimbo tiveram início em 2004, quando um novo sistema de medições de grandezas elétricas foi acrescentado à instrumentação original da Estação do Morro do Cachimbo com o objetivo de medir e estudar as formas de onda do campo elétrico associado a canais ascendentes desenvolvidos por descargas incidentes nas proximidades da estação [16].

Inicialmente, a idéia associada a este projeto era de avaliar a importância dos canais ascendentes na formação das descargas atmosféricas e, sobretudo, demonstrar que a corrente associada aos processos de estabelecimento dos passos do canal poderia causar efeitos destrutivos consideráveis, justificando a necessidade de atenção da comunidade científica em geral. Tais expectativas decorriam de relatos de casos de danos em torres de telecomunicações em que não houve a incidência direta de raios no local [16].

Essa necessidade de medir e melhor entender o comportamento dos canais ascendentes motivou a criação de um conjunto de estações de medição de campo elétrico em diversos pontos nos Estados Unidos e um ponto de medição no Brasil. Este conjunto de estações constituía-se de antenas de detecção de campo elétrico, de derivada de campo elétrico e de sensores de corrente.

Dentre os motivos que tornaram o Morro do Cachimbo atraente para as pesquisas de campo elétrico, pode-se destacar o seu grande potencial para o estudo dos efeitos da interação do leader com a torre em primeiras correntes de retorno, e dos efeitos indiretos causados por incidências muito próximas à torre. Em relação às formas de onda de corrente, vale lembrar que a grande maioria dos estudos realizados sobre as correntes de raios foi obtida por meio de raios produzidos por experimentos com foguetes, *triggered lightning* [1,4,5]. Sabe-se que a forma de onda de descargas iniciadas por foguetes se assemelha às correntes de retorno subsequentes e, portanto, a literatura carece de fontes de medição de corrente de primeiras descargas. Já em relação aos efeitos indiretos de incidência de raios, a estação MCS possui uma configuração única que permite avaliar correntes induzidas na torre quando descargas incidem em sua redondeza. Isso ocorre porque a torre possui um único caminho para a Terra e está localizada em um ponto com

elevada incidência de descargas atmosféricas.

Com a importante contribuição dos pesquisadores Lothar Ruhnke e Vladslav Mazur, foram instalados equipamentos no Morro do Cachimbo para medição de campos elétricos, operando em paralelo com os sistemas de medição originais de imagem e corrente. A estação passou a contar com uma nova configuração incluindo sensores e medidores como indica a Figura 3.7. A seção 3.3.2 descreve a configuração do sistema de medição implantada pelo autor deste trabalho. Em seguida, a seção 3.3.4 ilustra o sistema de medição original, implantado pelo Engenheiro Renato Zica e algumas das soluções encontradas pelo autor desta dissertação em conjunto com os pesquisadores mencionados acima para melhorar os níveis de ruído existentes nas medições dos anos de 2005 e 2006.

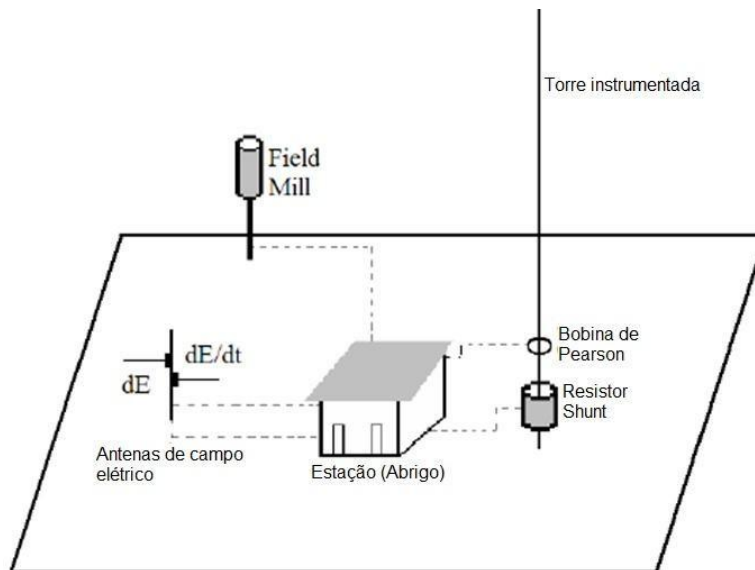


Figura 3.7 – Configuração dos sensores da estação para aquisição de correntes e de campo elétrico.

3.3.2 Descrição dos sensores e do condicionamento dos sinais

O sistema de medições de campo elétrico é composto por um computador com uma placa de aquisição de dados modelo *NI PCI 6250* que possui 16 canais analógicos de 16bits e que possibilita frequências de amostragem de até 1,25 Ms/s se apenas um canal for utilizado. São utilizadas duas antenas do tipo monopolo simples, modelo *CB Radio 21-989 Antenna*, que medem o campo elétrico (dE) e derivada de campo elétrico (dE/dt). Estas antenas receberam o nome de *whip antennas* pelos pesquisadores norte-americanos. Além das

antenas, é utilizado um sensor eletrônico de campo elétrico denominado Field Mill capaz de medir a amplitude de campo elétrico na faixa de ± 20 kV/m. O objetivo do Field Mill é fornecer a referência calibrada de campo estático para correção das amplitudes obtidas pelas antenas. Para garantir sua correta leitura, um segundo Field Mill calibrado de fábrica foi levado a Estação do Morro do Cachimbo para que os dois instrumentos apresentassem a mesma leitura. Este procedimento foi realizado pela primeira vez no início de 2006 e deveria ser repetido uma vez ao ano. Por fim, uma terceira bobina de Pearson, também modelo *Standard CT 10,1* é utilizada para medição de corrente na torre, independente do sistema de medição de correntes.

Os sinais das antenas, do Field Mill e da bobina são conectados ao computador por uma caixa eletricamente blindada que contém uma pequena placa de conexões elétricas em que é feito o condicionamento dos sinais para os níveis de tensão das placas de aquisição de 10V. (Figura 3.8) Esta é uma etapa de suma importância para a obtenção de registros de qualidade, pois o circuito eletrônico utilizado deve possuir larga faixa de passagem, alta impedância de entrada e baixa impedância de saída.

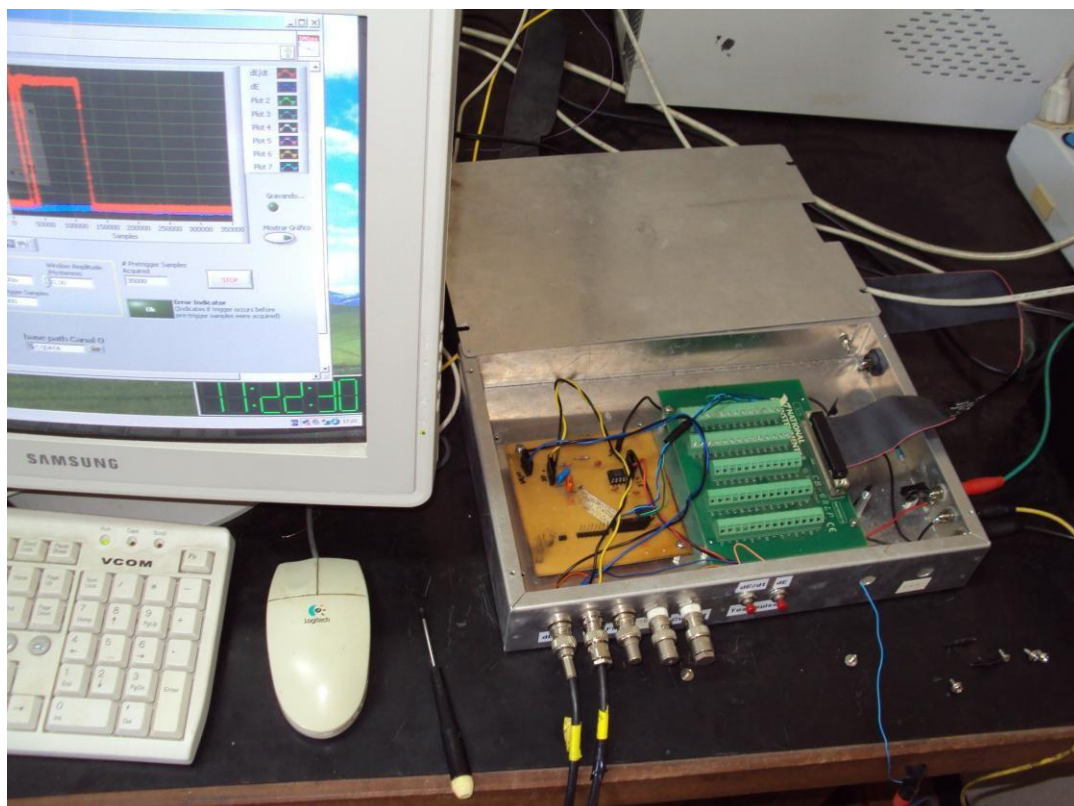


Figura 3.8 – Caixa de conexões elétricas para blindagem contra ruído e EMI

Algumas práticas de eletrônica foram levadas em consideração no manuseio e conexão dos condicionadores de sinal. Dentre elas, a utilização de buffers de sinais, com o amplificador de instrumentação LM6171 que possui baixa distorção de tensão e alto *slew rate* ($3600\text{V}/\mu\text{s}$). Outra prática necessária foi a correção das constantes de tempo das medições de campo elétrico devido à limitação da banda de passagem das antenas, como descrito em [16]. A Figura 3.9 ilustra como as antenas podem ser modeladas por uma fonte de tensão em série com uma pequena capacitância c_a . A impedância em paralelo com a fonte formada pela capacitância C em paralelo com a resistência R representa a capacitância do cabo coaxial e a resistência de entrada do circuito de medição, respectivamente.

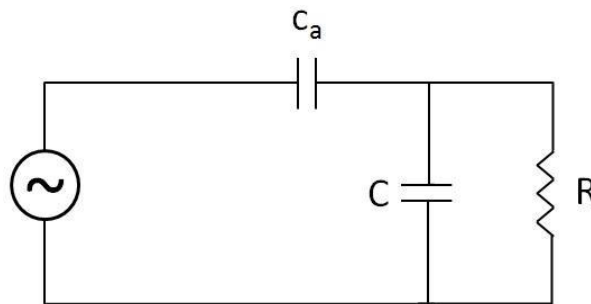


Figura 3.9 – Representação do circuito equivalente das antenas de campo elétrico.

São realizadas três medições de campo elétrico na estação: dE , dE/dt e Field Mill. Destes três registros, dois deles são realizados por antenas e um deles por um sensor eletrônico especialmente produzido para a medição de campo elétrico estático. Idealmente, o *Field Mill* e o dE devem apresentar resultados semelhantes. Ambos por sua vez, devem ser semelhantes à integral do sinal medido pela antena de dE/dt . A diferença entre cada um dos três sensores reside na banda de passagem de operação do instrumento medidor, como descrito em [16]. Para a medição de dE , utiliza-se um circuito RC com maior constante de tempo que permite manter a tensão medida nos terminais do resistor ilustrado na Figura 3.9 por maior tempo, adquirindo variações de campo elétrico mais lentas. A constante de tempo utilizada atualmente nas medições de dE é de 1,2 s em contraste com uma constante de tempo de $1\ \mu\text{s}$ para a antena de dE/dt . Adquirir o dE/dt nesta constante de tempo permite observar as variações rápidas no campo elétrico que são

associadas com o fluxo de corrente na formação dos canais e durante a corrente de retorno.

O medidor eletrônico de campo elétrico funciona como duas antenas de dE independentes que são constantemente submetidas a degraus de campo através de um bloqueador metálico giratório, o “moinho”. Isto é conseguido tampando e destampando um sensor de cada vez de forma que o sinal de saída somado dos dois sensores é igual ao campo elétrico estático. Devido ao fato de que a tensão de saída de um Field Mill é calibrada de fábrica, ele é utilizado para calibrar as medições realizadas pela antena de dE.

De forma geral, para reconstruir a forma de onda do campo elétrico bastariam as medições da antena de dE/dt , desde que fosse possível estabelecer a relação correta entre a tensão de saída e o campo elétrico local. No entanto, para oferecer redundância dos dados medidos e um referencial calibrado, são utilizadas as antenas de dE e o Field Mill.

As Figuras 3.10 e 3.11 ilustram o diagrama de cada um dos canais adquiridos, com suas respectivas correções de constante de tempo e tratamento de impedância de entrada e/ou saída com buffers de sinal, o amplificador LM6171, como detalhado anteriormente. Os canais de dE e dE/dt são amostrados com dois ganhos diferentes para assegurar que não ocorra saturação das medidas no caso de uma incidência direta na torre.

Para a medição de derivada de campo elétrico (Figura 3.4), dE/dt , são utilizados dois canais para aquisição: um com o sinal pleno gerado pela antena e outro com um divisor resistivo que oferece 9% do sinal total. Além disso, a banda de passagem da antena é compensada por um circuito RC com constante de tempo de $1\mu s$ para a frequência de amostragem de interesse [5].

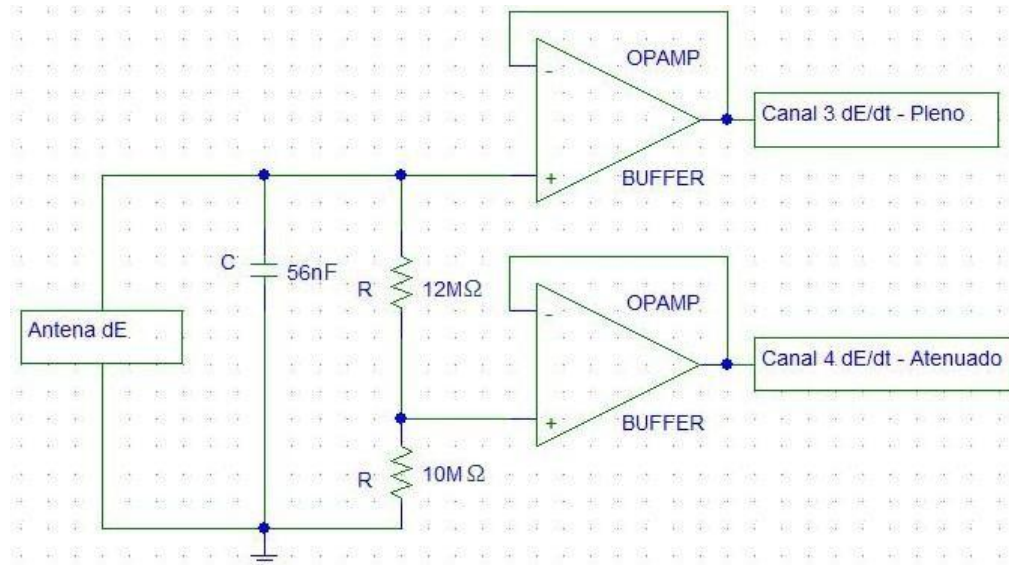


Figura 3.10 – Circuito para compensação de constante de tempo e atenuação de derivada do campo elétrico.

Já a medição de campo elétrico, dE , possui compensação com constante de tempo de 1,2 s (Figura 3.11). Como esta constante de tempo é relativamente lenta, a forma de onda obtida pela antena de dE se assemelha à obtida pelo Field Mill. Para atingir uma constante de tempo desta ordem de grandeza, são necessários resistores de alto valor, o que produziria o efeito de carga no sistema de aquisição de dados não fosse a presença dos buffers de sinal. A antena de dE é adquirida no nível pleno de sinal e em nível atenuado de 45% pelo mesmo motivo dos canais de dE/dt .

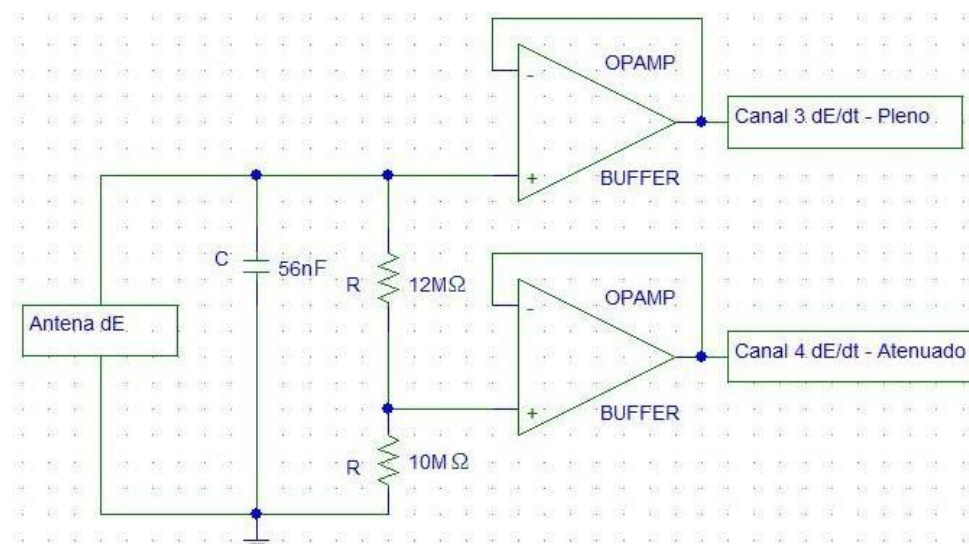


Figura 3.11 – Circuito para compensação de constante de tempo e atenuação de do campo elétrico.

Os outros dois canais de aquisição são ocupados pela medição do campo elétrico a partir

do sensor eletrônico e pela medição de corrente independente. Como o Field Mill já apresenta eletrônica embarcada, sua saída já possui as características corretas para conexão à placa com os conversores A/D. A medição de corrente, por sua vez necessita de uma terminação resistiva de 50Ω para casamento de impedância e é realizada no modo diferencial para evitar a inserção de ruídos não desejados (Figura 3.12).

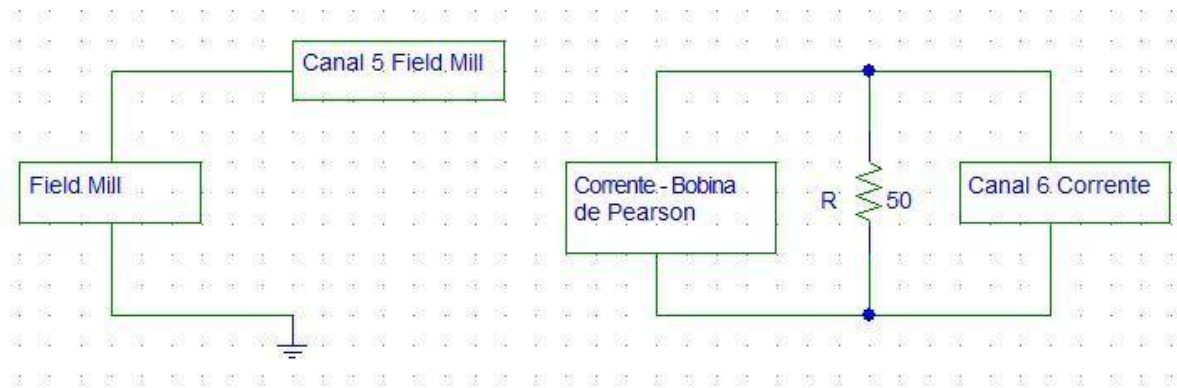


Figura 3.12 – Circuitos de aquisição do Field Mill e da medição independente de corrente.

Em conjunto com as formas de onda gravadas a cada registro, um software desenvolvido em LabVIEW® semelhante ao apresentado anteriormente na Figura 3.5 é responsável pela aquisição e armazenamento dos arquivos. A informação precisa de hora fornecida por um GPS é utilizada para identificar cada registro com o horário de sua ocorrência. Essa informação é posteriormente processada e avaliada em conjunto com o Sistema de Detecção e Localização de Descargas brasileiro [20]. Os registros salvos são comparados com as listas de raios e prováveis locais de incidência fornecidos pelo LLS, o que permite a confirmação de ocorrência dos registros e validade os dados para futura análise. No próximo capítulo, são ilustrados diversos exemplos de formas de onda de campo elétrico associados a *flashes* gravados no Morro do Cachimbo que foram confirmados pelo LLS. Em especial, eventos em que o mastro é atingido fornecem informações precisas sobre o local de incidência de raios e podem ser utilizados para verificação das indicações de amplitude e localização do LLS [21].

3.3.3 Modificações e melhorias realizadas

Inicialmente, na concepção do sistema de medições, em 2005, o sistema de medição contava também com a medição de elevação de potencial na base da torre, denominada *Loop Voltage*. Esta grandeza era medida com o objetivo de promover uma segunda fonte de informação de corrente na torre. A idéia consistia em medir a diferença de potencial entre o pé da torre e um terra remoto localizado a aproximadamente 100 m do mastro captor. A partir da medição de impedância de aterramento do solo próximo à torre, seria possível extrair a corrente injetada no solo. Contudo, a experiência de trabalho no morro do Cachimbo demonstrou que esta idéia é de difícil implantação. Foi percebida a dificuldade de levar o potencial de terra remoto sem influência de campos externos ou potenciais indesejados para dentro da estação.

A medição de elevação de potencial era realizada através de um cabo coaxial longo que funcionava como uma grande espira que induzia tensões indesejadas. No entanto, a partir do momento em que foi percebido que a direção de incidência dos raios produzia uma elevação de potencial positiva ou negativa, ficou claro que a tensão induzida nesta grande espira formada pelo cabo coaxial de medição era preponderante em relação à elevação de potencial da torre e esta medição foi abandonada. Outras idéias foram propostas, como furar um buraco e inserir um eletrodo isolado até uma determinada profundidade para se obter o terra remoto verticalmente distante da torre ao invés de horizontalmente, mas estas idéias não foram implantadas frente às grandes dificuldades técnicas e ferramentais de se furar um buraco no solo maciço rochoso do Morro do Cachimbo.

Durante os anos de 2004 e 2005, o sistema de medições funcionou com duas placas de aquisição de 10 kS/s e 100 kS/s, as duas antenas de dE e dE/dt, o Field Mill, um alicate de corrente e as medições de loop voltage. As duas placas de aquisição eram necessárias porque o campo elétrico lento “dE”, era adquirido tanto pelo Field Mill quanto pela antena lenta e estas grandezas eram armazenadas em janelas de 3 segundos de duração. Já as variações rápidas de campo elétrico eram adquiridas pela antena de dE/dt em uma janela de tempo de 300ms em conjunto com as medições de corrente e elevação de potencial.

Centenas de registros de campo elétrico foram adquiridos nesta configuração, como ilustra a Figura 3.13 e as primeiras melhorias e modificações foram executadas frente aos

resultados obtidos e à qualidade desejada. A partir da temporada de 2006, a medição de loop voltage foi abandonada e o alicate de corrente foi substituído por uma bobina de Pearson rápida, com capacidade para medir correntes impulsivas de até 50 kA. Em paralelo, o software de medição foi modificado para que todas as medições fossem realizadas apenas pela placa de aquisição de dados rápida, com maior frequência de amostragem.

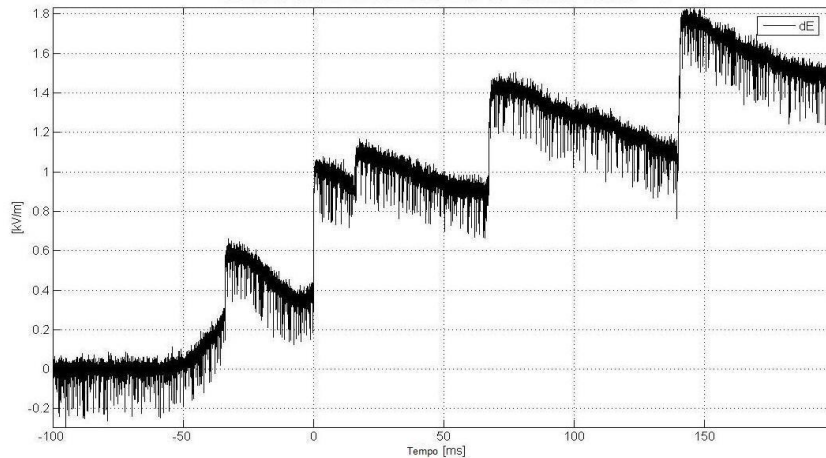


Figura 3.13 – Exemplo de forma de onda de campo elétrico ruidoso, dE , obtida a partir de um *flash* ocorrido em 31/07/06.

Assim, a temporada de 2006 e 2007 contou com a configuração de sensores descrita na seção 3.3.2 que produziu resultados de qualidade como o exemplo ilustrado pela Figura 3.14. Para alcançar baixos níveis de ruído e robustez do sistema de medição, foram realizadas modificações no aterramento do computador de medições e das placas de aquisição de dados. Estas modificações permitiram que o nível de comparação do sinal de trigger ficasse menor, permitindo a aquisição de raios mais distantes, como aquele demonstrado na Figura 3.14.

Segundo o sistema de localização de tempestades operante em Minas Gerais, os registros de raios mais distantes já obtidos no Morro do Cachimbo estavam a aproximadamente 12 km da torre. Além da distância, o outro fator que dita se um registro será ou não gravado pelo sistema de aquisições é a derivada de campo elétrico. Quanto maior for o pulso de dE/dt associado ao evento, maior a probabilidade de ser registrado mesmo estando muito distante.

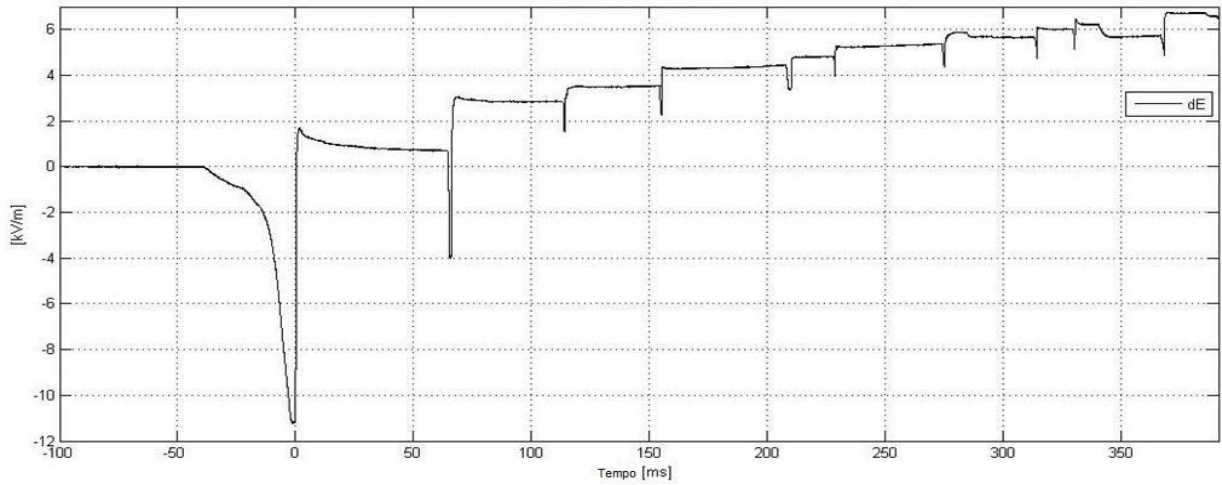


Figura 3.14 – Forma de onda de campo elétrico, dE, obtida a partir de um *flash* com mais de 10 *strokes* em 12/11/07.
(Convenção atmosférica)

A descrição dos sistemas de medição de campo elétrico encerra os detalhes dos sistemas de medição abordados neste capítulo. Foi abordado o histórico dos equipamentos utilizados para a realização das medições de campo elétrico, suas configurações de projeto, melhorias realizadas e atual momento de desenvolvimento, descrito na seção 3.3.2.

O próximo capítulo descreve em detalhes as formas de onda de campo elétrico e de corrente medidas e analisadas.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS DAS MEDIÇÕES DE CAMPO ELÉTRICO

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta as análises realizadas a partir dos registros obtidos durante as campanhas recentes de medição de campo elétrico e de correntes associadas a descargas atmosféricas na Estação do Morro do Cachimbo.

Inicialmente, apresenta-se um breve histórico das medições de campo elétrico realizadas na Estação, seguido de uma seção com uma análise sobre o comportamento do campo elétrico nas diversas fases de desenvolvimento e ocorrência das descargas atmosféricas, através de casos exemplos correspondentes a registros obtidos nas medições realizadas. Posteriormente, são apresentadas algumas curvas obtidas a partir da medição de corrente no mastro captor da estação. As grandezas medidas são analisadas em conjunto, na última sessão do capítulo, sob o ponto de vista do desenvolvimento do fenômeno físico a cada etapa.

4.1.1 Breve histórico das medições de campo elétrico na Estação de Pesquisas do Morro do Cachimbo

Um sistema específico para medição de campo elétrico foi instalado na Estação no final do ano de 2004, no contexto de um projeto de pesquisa desenvolvido em parceria entre o LRC-UFMG e o National Severe Storms Laboratory (NSSL) dos Estados Unidos. Naquele ano, dois pesquisadores radicados nos EUA, Lothar Ruhnke e Vladslav Mazur, trouxeram para o Brasil a instrumentação para realizar medições de campo elétrico, corrente e elevação de potencial na torre. Os pesquisadores montaram juntamente com os engenheiros Renato Zica e Marcelo Felipe [16] a configuração de medições que funcionou durante os anos de 2005 e 2006. Nesses dois anos foram desenvolvidas experiências necessárias para montar e calibrar os medidores, testar todo o sistema, incluindo questões relativas à preservação do nível de isolamento dos componentes frente à umidade. Além disso, foram realizados experimentos para minimizar o nível de ruído nos sinais e garantir os patamares aceitáveis de ruído e de frequência de amostragem.

Na época, o sistema funcionava com duas placas de aquisição de dados, uma com taxa de amostragem de 10 kS/s e outra de 100 kS/s, adquirindo dados de derivada de campo elétrico (dE/dt), de campo elétrico (dE e *Field Mill*), de elevação de potencial na torre, (*loop voltage*), e de corrente na base da torre. A placa de maior frequência de amostragem recebia todos os sinais, exceto dE e *Field Mill*, que eram amostrados na placa de menor frequência, como descrito no capítulo anterior.

No final do ano de 2006, após o término do trabalho de dissertação de mestrado do engenheiro Renato Zica, o autor desta dissertação assumiu a responsabilidade de conduzir as medições de campo elétrico e dar continuidade ao trabalho já iniciado. A partir de então, foram realizadas modificações na placa de condicionamento de sinais e foram introduzidas novas práticas de aterramento das placas de aquisição, tirando proveito da experiência adquirida pelos pesquisadores americanos nas campanhas de medições realizadas em paralelo nos EUA.

A campanha de 2006-2007, envolvendo as estações de chuvas entre os meses de outubro de 2006 até abril de 2007, foi concluída com o registro de 190 arquivos de campo que foram confirmados pelo Sistema de Detecção e Localização de Tempestades (LLS) [20]. A estação

de chuvas se encerrou por volta do começo de abril, com a redução significativa do número de registros gravados. No período entre abril e setembro, a equipe de trabalho do LRC modificou o programa de aquisição desenvolvido originalmente pelos pesquisadores norte-americanos e criou uma versão dedicada ao sistema implantado na Estação do Morro do Cachimbo. Ao mesmo tempo, as medições de corrente sofreram melhorias com a substituição do medidor de corrente tipo alicate por uma bobina de Pearson dedicada à aquisição de correntes com tempos de subida de curta duração. A frequência de amostragem foi aumentada para 200 kS/s e todos os sinais passaram a ser adquiridos em uma única placa. As modificações resultaram em uma melhoria geral das medições e possibilitaram a gravação dos registros de melhor qualidade obtidos até então.

O sistema de medição funcionou plenamente na campanha de medições de 2007-2008 até que a placa de aquisição foi danificada pela ocasião de uma descarga direta na torre. Apesar do registro do evento ter sido realizado, constatou-se que quando descargas diretas incidem na torre o isolamento entre os canais de medição não era suficiente para impedir a propagação dos potenciais elétricos entre os canais de aquisição, havendo fluxo de correntes através do terra do sistema de medições. Como consequência, os melhores dados obtidos nesta campanha foram registrados até o mês de novembro de 2007 e totalizaram aproximadamente 470 eventos confirmados pelos relatórios do LLS em toda temporada de 2007-2008.

Durante o período de seca do ano de 2008, foram realizadas novas melhorias na estação de Pesquisas do Morro do Cachimbo com a instalação de novas bobinas de Pearson para a medição das correntes diretas na torre e com o estabelecimento de um link de comunicação com a internet, culminando no registro de aproximadamente 420 eventos confirmados pelo LLS ao longo da campanha de medições de 2008-2009.

A bobina de Pearson que fornecia os sinais de corrente para o sistema de medição de campo elétrico foi desconectada, passando a ser utilizada em um sistema de aquisição específico de correntes, como detalhado no capítulo 2. Verificou-se a necessidade de aumento da taxa de amostragem dos sinais para que fosse possível realizar análises dos

estágios de formação das descargas atmosféricas.

Finalmente, a campanha 2009/2010 foi realizada com a mesma instrumentação do ano anterior e gerou aproximadamente 260 registros de campo elétrico que foram confirmados pelo LLS.

4.2 Análises de registros de campo elétrico selecionados

Os resultados de campo elétrico obtidos no Morro do Cachimbo durante as campanhas de medição detalhadas anteriormente constituíram uma base de registros que podem ser utilizados para análise dos diversos eventos envolvidos na formação e ocorrência das descargas atmosféricas.

As próximas seções apresentam alguns registros selecionados para verificação das assinaturas dos eventos que caracterizam as descargas atmosféricas nas formas de onda de campo elétrico medidas e para relacionar o modelo do tripolo com as curvas reais obtidas nas medições realizadas na Estação. A abordagem dos tópicos está organizada nas análises dos registros dos eventos:

- a) Descargas únicas (*strokes*);
- b) Conjuntos de descargas (*flashes*);
- c) Evento com a presença de componente contínua;
- d) Campo elétrico e corrente correlatos.

4.2.1 Análises de registros de campo elétrico de descargas únicas

O primeiro exemplo de forma de onda escolhido para ilustração do campo elétrico associado a uma descarga única (*single stroke*) ocorreu no dia 18 de novembro de 2006. Trata-se de uma descarga negativa com distância muito próxima ao Morro do Cachimbo, como pode ser observado na Figura 4.1. Pode-se observar nitidamente neste registro a seqüência de formação das descargas atmosféricas discutida no capítulo 2. O módulo do

campo elétrico medido por meio da antena de dE é registrado inicialmente com valor próximo a 0 kV/m em um instante 100 ms anterior a ocorrência da corrente de retorno. É possível observar o desenvolvimento do *stepped leader* nos 50 ms que antecedem o fluxo da corrente de retorno, cuja ocorrência é indicada nesta figura pelo eixo zero na escala de tempo. O módulo do campo elétrico cresce continuamente à medida que o canal descendente se aproxima do solo, levando o potencial elétrico da nuvem, presente na extremidade do canal, a um ponto cada vez mais próximo ao potencial da Terra. A diferença de potencial entre a nuvem e a Terra é aplicada em parcelas de ar cada vez menores, resultando em um crescimento do módulo do campo elétrico medido até que no instante $t = 0$ ms, tem início a corrente de retorno, que torna aproximadamente nulo o valor do campo elétrico. É importante lembrar que esta forma de onda está ilustrada segundo a convenção meteorológica, na qual o campo elétrico que aponta para a nuvem é negativo.

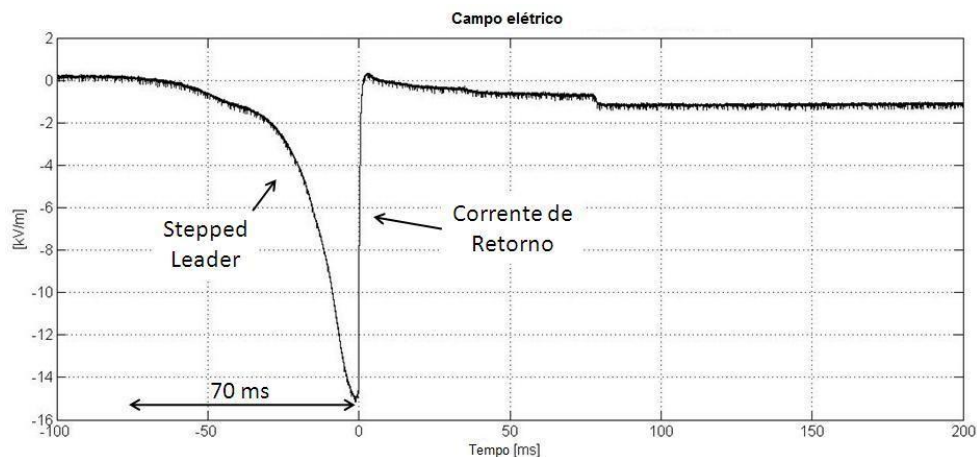


Figura 4.1 – Forma de onda de campo elétrico (dE) de uma única descarga atmosférica (stroke) ocorrida em 18/11/2006.
(Convenção atmosférica)

Um aspecto que diferencia a assinatura de campo elétrico associado à formação do *stepped leader* em relação à do *dart leader* é o maior tempo total requerido para formação do canal, que é da ordem de várias dezenas de milissegundos. No caso em análise, este tempo vale aproximadamente 70 ms. A partir do momento em que o canal ascendente encontra o canal descendente, o potencial da Terra é levado em direção à nuvem pela corrente de retorno. Esse processo neutraliza as cargas negativas depositadas ao longo do canal e resulta na redução do campo elétrico no nível do solo. No instante $t = 0$ ms, a forma de onda exibe uma brusca mudança no valor do módulo do campo elétrico devida à

ocorrência da corrente de retorno.

No início da descrição deste registro, foi mencionado que este se trata de uma “descarga negativa muito próxima ao Morro do Cachimbo”. Esta afirmação se baseia na análise de duas características da forma de onda discutidas na Figura 2.10, típicas dessa condição de proximidade:

- i) O stepped leader produz variação de campo elétrico (ΔE) no sentido contrário ao ΔE produzido pela corrente de retorno;
- ii) O módulo do campo elétrico após a corrente de retorno é maior do que o módulo do campo elétrico inicial, antes da formação do leader (ΔE positivo, para a convenção meteorológica);

A primeira característica pode ser observada com facilidade na Figura 4.1 quando se nota o aumento do módulo do campo negativo durante a fase de desenvolvimento do *leader* e a variação positiva brusca causada pela corrente de retorno. Contudo, a segunda característica é melhor visualizada no exemplo analisado mais a frente, na Figura 4.4.

A variação de campo elétrico brusca causada pela corrente de retorno ocorre num intervalo de tempo muito pequeno em comparação com a constante de tempo do sistema de medição de campo elétrico estático, o dE. A Figura 4.2 apresenta um detalhe da Figura 4.1 em torno do instante $t = 0$ ms, detalhando como o campo elétrico medido varia quando a corrente de retorno ocorre.

Como se vê, o sinal medido não mostra efetivamente a brusca variação do campo elétrico durante o fluxo da corrente de retorno, sendo fortemente influenciado pela constante de tempo do circuito de medição. Por este motivo, a constante de tempo e a frequência de amostragem do sistema de medição foram modificadas como descrito no Capítulo 3 para possibilitar a aquisição de formas de onda mais detalhadas como é ilustrado nos exemplos posteriores.

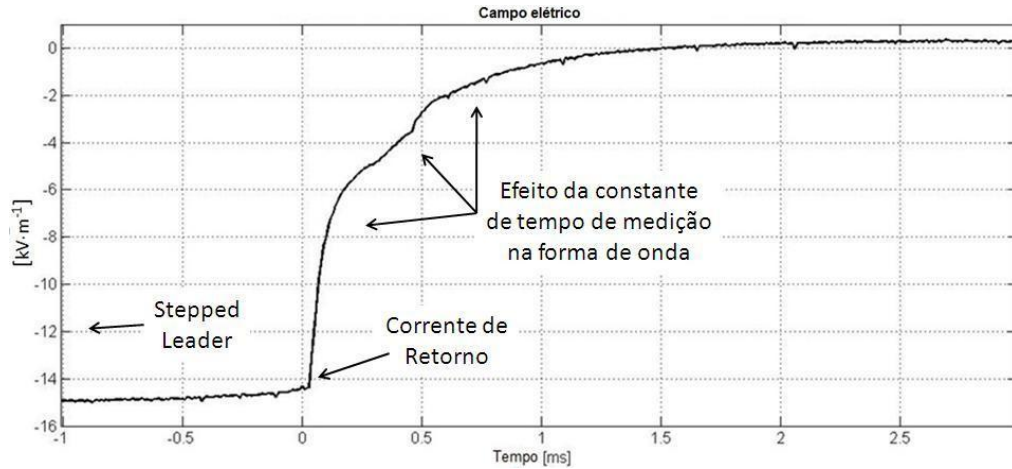


Fig. 4.2 – Detalhe da variação de campo elétrico no instante do fluxo da corrente de retorno.

A Figura 4.2 também demonstra porque o campo elétrico deve ser medido em dois canais com frequências de amostragem diferentes. A forma de onda ali ilustrada apresenta o lento carregamento do capacitor associado a esta medição que possui constante de tempo de 600ms. Para evidenciar a forma como o campo elétrico varia durante a corrente de retorno, é necessário observar a forma de onda da antena de dE/dt , ilustrada na Figura 4.3.

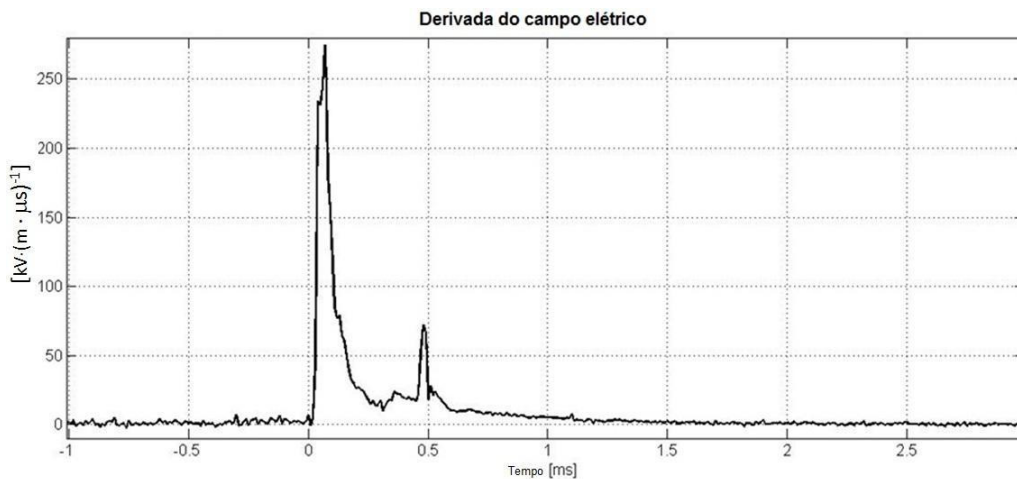


Fig. 4.3 – Registro da derivada de campo elétrico (dE/dt) no instante do fluxo da corrente de retorno.

A forma de onda obtida a partir da antena de dE/dt possui uma constante de tempo de 1 μs , pois seu objetivo é avaliar as variações transitórias do campo elétrico associadas com o fluxo da corrente de retorno. Pode-se dizer que a derivada do campo elétrico está associada à parcela irradiada do campo eletromagnético e pode ser comparada à forma de onda de corrente da descarga e corresponde [22].

Outro exemplo de forma de onda de campo elétrico de uma descarga única é o evento ilustrado na Figura 4.4, que aconteceu no dia 12 de novembro de 2007. Este caso possui a forma de onda do canal dE alinhada com a forma de onda do canal dE/dt e também ilustra uma descarga negativa próxima à torre. Algumas melhorias podem ser observadas em relação à Figura 4.1. Dentre elas, o menor nível de ruído e a maior resolução com que a curva foi adquirida. Esta qualidade é o resultado das etapas de modificação e melhoria realizadas no sistema de medição, como descrito no Capítulo 3.

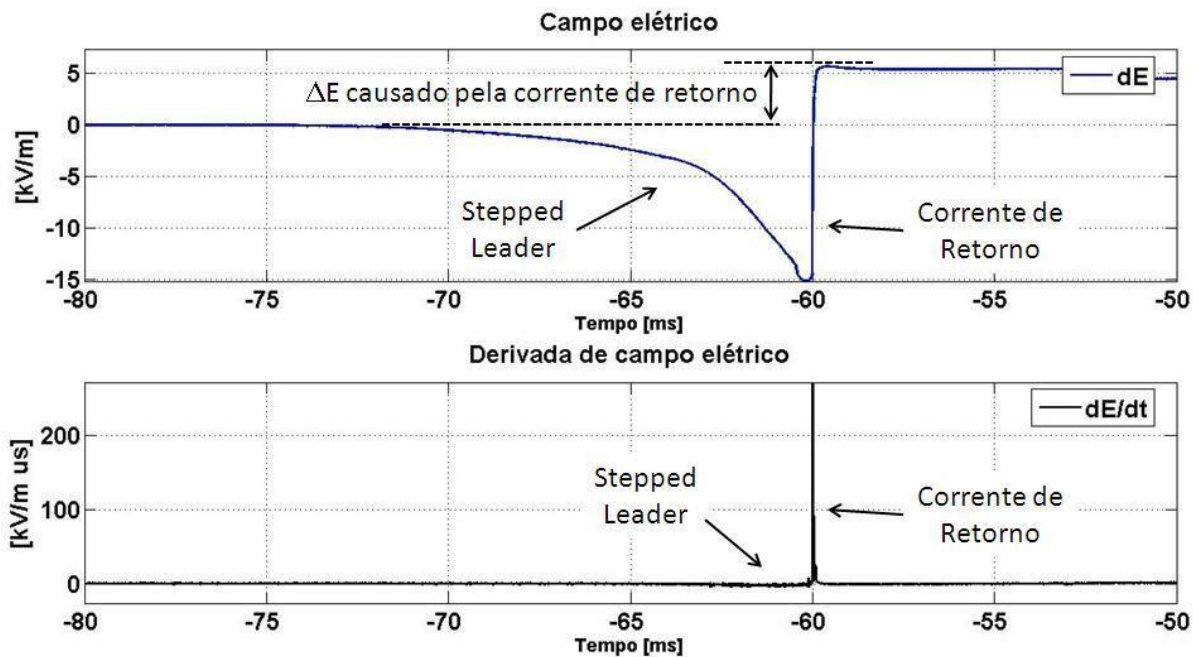


Fig. 4.4 – Registros de campo elétrico (dE) e derivada de campo elétrico (dE/dt) para uma descarga atmosférica negativa única.

A Figura 4.4 é um exemplo ilustrativo da segunda característica que permite afirmar que o registro refere-se a uma descarga atmosférica negativa próxima à torre instrumentada, como descrito anteriormente. Em termos físicos, este exemplo guarda semelhanças com aquele ilustrado na Figura 4.1. A diferença reside na variação do módulo do campo elétrico entre os instantes anterior e posterior ao fluxo da corrente de retorno, denominada ΔE . Esta variação está associada com a carga total transferida do canal de descarga para o solo e com a distância do evento em relação ao ponto de medição. Ao observar a Figura 4.4, nota-se que o ΔE associado à corrente de retorno é positivo e sensivelmente maior do que o primeiro exemplo. Segundo a convenção meteorológica, a descarga atmosférica é negativa

quando o ΔE é positivo, como detalhado no capítulo 2.

O maior valor de ΔE da Figura 4.4 em relação à Figura 4.1 pode significar tanto a maior proximidade da torre em relação ao ponto de incidência ou uma maior carga transferida no *stroke*. Segundo o LLS [20], este registro ocorreu a 1,4 km da torre instrumentada, resultado sustentado pela curvatura na forma de onda de campo elétrico do *stepped leader*.

Ao observar o instante de ocorrência da corrente de retorno em destaque na Figura 4.5, nota-se comportamento também semelhante ao apresentado na Figura 4.3. A derivada de campo elétrico apresenta uma forma de onda que está relacionada com a corrente de retorno e o campo elétrico lento varia bruscamente com a modificação da configuração de cargas eletrostáticas representadas pelo modelo do tripolo. A componente eletrostática do campo elétrico varia positivamente, segundo a notação meteorológica, com a remoção de cargas negativas da nuvem.

Como estes, centenas de exemplos de formas de onda de correntes de retorno associadas à descargas únicas foram obtidas na estação do Morro do Cachimbo durante as temporadas de tempestade em análise. Quanto mais próximo é o ponto de incidência da torre, mais detalhada é a forma de onda de derivada de campo elétrico registrada e maior é a amplitude de corrente induzida que possibilita a obtenção de formas de onda de corrente na base da torre. Na literatura são encontrados trabalhos que buscam relacionar ambas as formas de onda com o objetivo de estabelecer uma relação confiável entre o campo medido e a corrente de retorno [22, 4].

A forma de onda, ou assinatura, do campo elétrico associado ao *stepped leader* varia de acordo com a distância do ponto de incidência do raio para o ponto de medição, como analisado no capítulo 2.

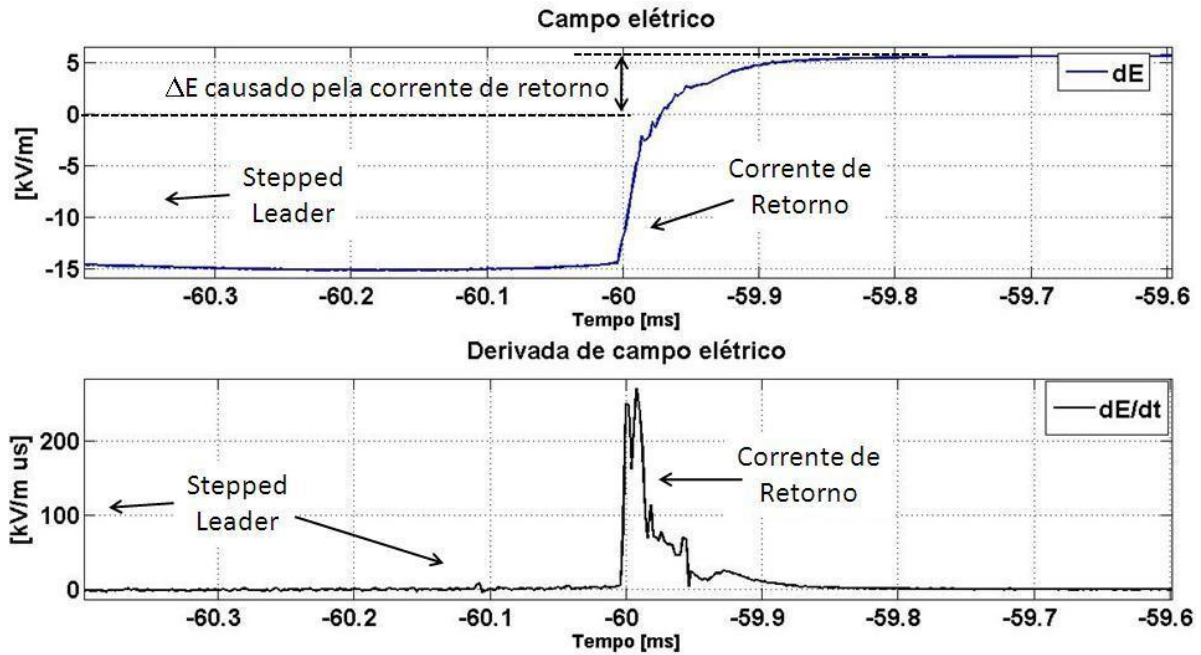
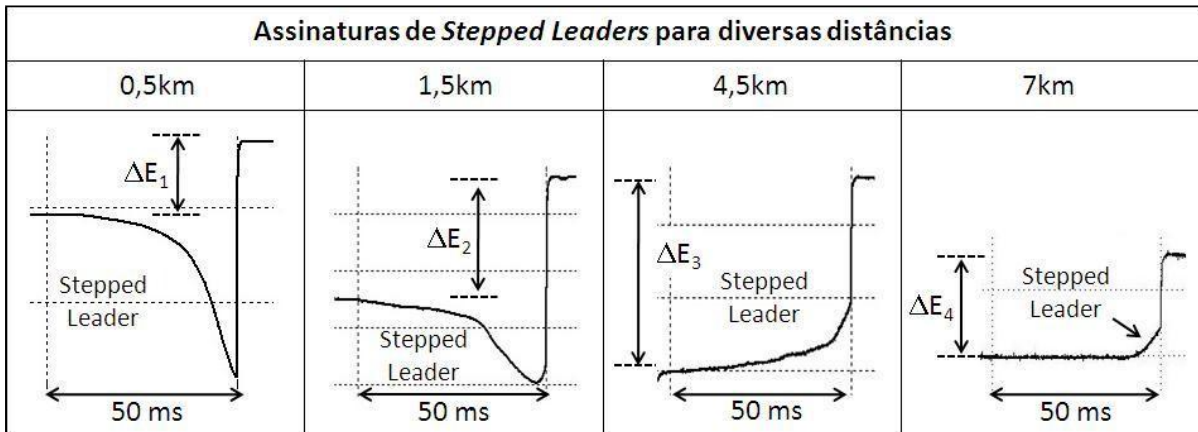


Figura 4.5 – Detalhe do instante da corrente de retorno, com destaque para a variação do campo elétrico rápido (dE/dt).

A Tabela 4.1 retrata a diferença entre as assinaturas dos canais precursoros com exemplos de diferentes casos de descargas atmosféricas negativas medidas na Estação a diversas distâncias. Esta é uma das características das formas de onda de campo elétrico que permite inferir a distância de ocorrência do raio em relação ao ponto de medição de campo.

São ilustrados nesta tabela quatro exemplos de assinatura de campo elétrico produzido pelos *stepped leaders* ocorridos com estimativas de distâncias obtidas a partir de dados do LLS [20]. Os valores de ΔE variam de acordo com a distância do evento e com a quantidade de carga associada à descarga, como descrito no Capítulo 2. Foram destacados em cada um dos casos o ΔE correspondente.

Tabela 4.1 – Diferença entre as formas de onda de campo elétrico do *stepped leader* para medições realizadas em diferentes distâncias. (Convenção atmosférica)



No primeiro exemplo, com localização estimada de 0,5 km da estação do Morro do Cachimbo, percebe-se uma forma de onda semelhante à Figura 4.1. Este exemplo representa os registros que ocorrem muito próximos da torre. Nestes casos, a variação de campo elétrico produzida pelo *leader* é freqüentemente maior do que a variação ΔE e acontece de maneira acentuada, com derivadas de campo elétrico cada vez maiores na medida em que o canal condutor se aproxima do solo. Para raios muito próximos, a influência do desenvolvimento do canal condutor é preponderante no campo elétrico vertical resultante.

A segunda coluna da Tabela 4.1 apresenta um registro com localização estimada de 1,5 km e ilustra o denominado “formato padrão” das assinaturas de *stepped leaders* como discutido no capítulo 2 [4]. O formato de gancho no *leader* é medido nas distâncias intermediárias, entre 0,5 e 5 km aproximadamente. Para estas distâncias, a influência do desenvolvimento do canal ainda é preponderante no campo elétrico vertical resultante, porém a variação ΔE é aproximadamente da mesma ordem de grandeza da variação causada pelo desenvolvimento do canal.

Já para registros com estimativa de localização superior a 5km, a influência do *stepped leader* no campo elétrico vertical resultante passa a ser menor do que a influência da distribuição de cargas da nuvem e a forma de onda muda de polaridade, seguindo a mesma polaridade do ΔE . A partir desta distância, a influência do centro de cargas positivo é preponderante sobre o centro de cargas negativo e, portanto, o ΔE causado pela presença do *stepped leader* passa a possuir a mesma polaridade do ΔE causado pela corrente de

retorno. Os exemplos das colunas 3 e 4 ilustram a mudança que assinatura sofre com o aumento da distância, sendo que no último caso o leader mal pode ser observado, apresentando apenas uma pequena variação positiva antes da corrente de retorno.

Em seguida, são analisados exemplos de campo elétrico vertical no nível do solo para descargas atmosféricas com mais de uma corrente de retorno. Também são ilustradas as diferenças no formato de onda do *stepped leader* e do *dart leader*.

4.2.2 Análises de registros de campo elétrico de descargas múltiplas

Após os exemplos anteriores de campo elétrico associado às correntes de retorno únicas, são analisados a seguir casos de conjuntos de descargas atmosféricas (flashes). No primeiro deles, Figura 4.6, é possível observar o registro de um conjunto de 6 strokes que ocorreram a distâncias superiores a 5 km da estação do Morro do Cachimbo.

De forma semelhante aos exemplos analisados anteriormente, o *stepped leader* precede a ocorrência da primeira corrente de retorno. Neste caso, nota-se que o módulo do campo elétrico aumentou na presença do canal descendente, justificando a afirmação que este evento ocorreu à distâncias superiores a 5 km. Após o fluxo da primeira corrente de retorno, o patamar de campo elétrico é modificado de aproximadamente 0 kV/m para 0,75 kV/m aproximadamente, permanecendo neste patamar durante 40 ms até o aparecimento de um pequeno degrau de campo elétrico antes da segunda corrente de retorno. Este detalhe é analisado mais adiante em conjunto com os registros de componente contínua e processos J e K. A partir deste instante, outras correntes de retorno ocorrem utilizando o mesmo canal da descarga original nos instantes 45 ms, 80 ms, 115 ms, 145 ms e 190 ms. Note que a afirmação “utilizando o mesmo canal da descarga original” é feita devido ao fato de que a imagem ilustra a ocorrência de dart leaders e não de dart stepped leaders como discutido no capítulo 2.

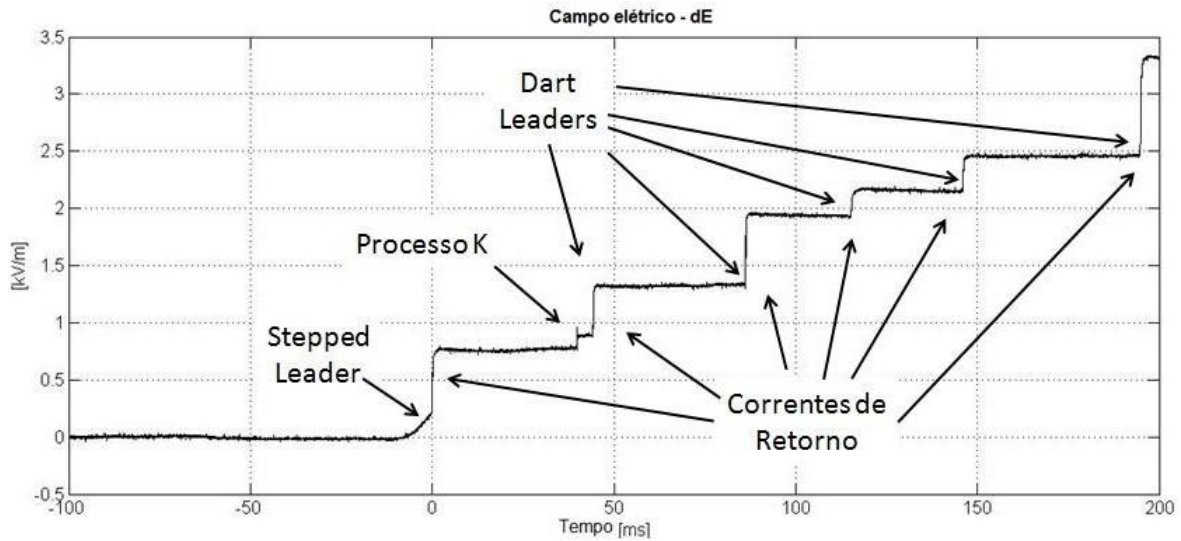


Figura 4.6 – Registro de campo elétrico (convenção meteorológica de sinais) de um flash com 6 strokes que ocorreu a 7,3 km da torre instrumentada segundo dados do sistema de detecção de tempestades (LLS).

O próximo exemplo de flash ilustrado na Figura 4.7, possui algumas características semelhantes ao anterior, porém ilustra bem a diferença entre o stepped leader e os dart leaders consecutivos. Neste caso, o stepped leader é longo e possui a duração aproximada de 20 ms. Contudo, as correntes de retorno posteriores apresentam dart leaders rápidos, imperceptíveis na escala de tempo utilizada para o gráfico. Mais à frente, na Figura 4.8, é possível observar os instantes que antecedem os ΔE associados a cada corrente de retorno em uma escala de tempo mais apropriada para cada um dos exemplos ilustrados.

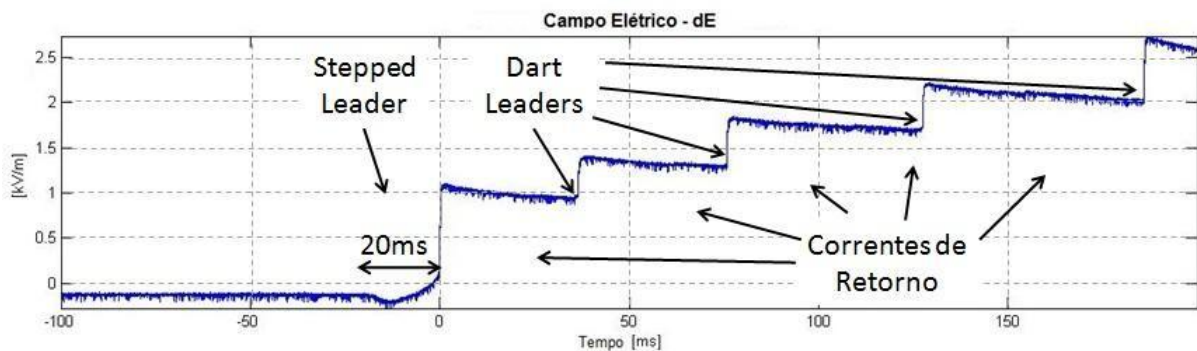


Figura 4.7 – Registro de campo elétrico (convenção meteorológica de sinais) de um flash com 5 strokes que ocorreu a 3,8km da torre segundo o LLS e que ilustra a diferença entre os dart leaders e dart stepped leaders.

Outra característica claramente visível no evento ilustrado na Figura 4.7 é a concavidade do campo elétrico associado ao *stepped leader* lembrando o formato de gancho discutido no capítulo 2. Este fato permite afirmar que o registro ocorreu a uma distância inferior a 5 km

da torre instrumentada, comprovando a localização fornecida pelo LLS.

O exemplo da Figura 4.8 retrata um caso em que a descarga subsequente utiliza um canal diferente da primeira descarga. No instante de tempo $t = 40$ ms, o ΔE associado à segunda corrente de retorno do *flash* é antecedida por um leader mais lento se comparado ao formato e duração convencional do *dart leader*. O formato registrado deste leader é relativamente semelhante ao formato associado ao *stepped leader*, porém em escala de tempo menor.

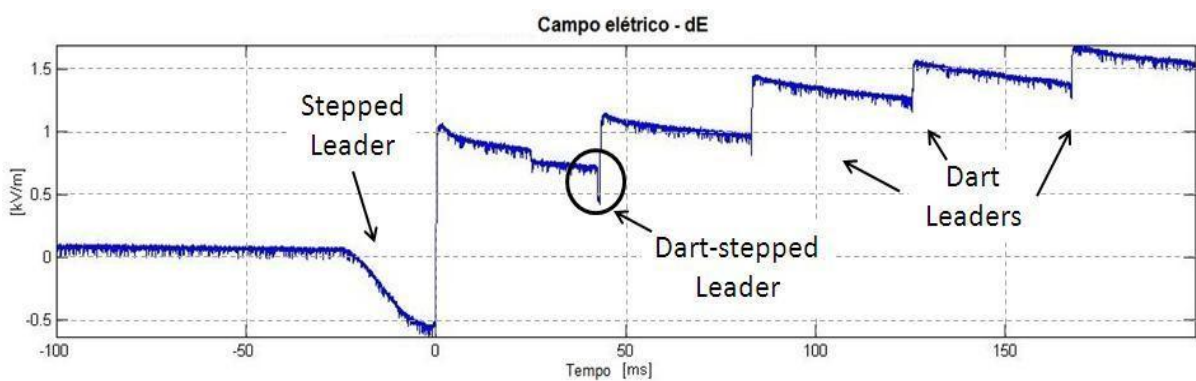
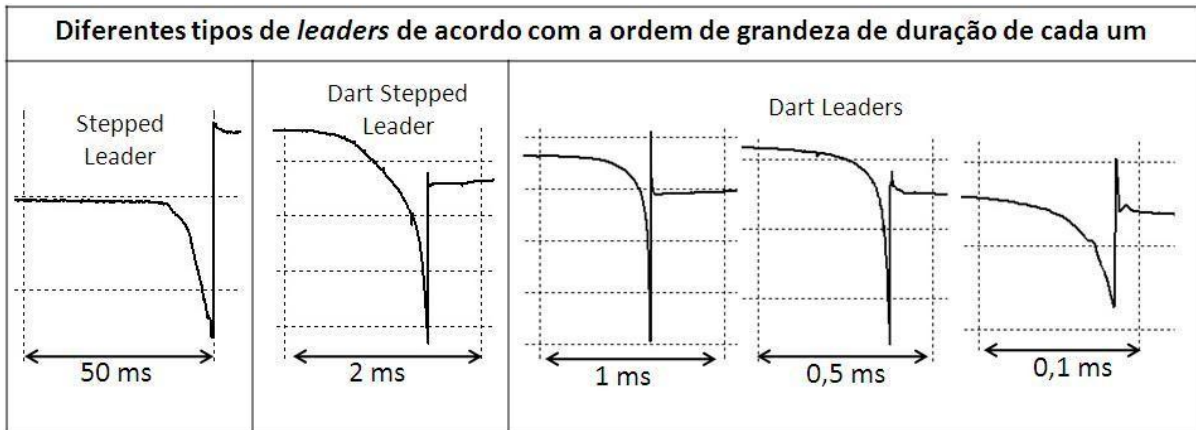


Figura 4.8 – Registro de campo elétrico (convenção meteorológica de sinais) de um *flash* com 5 *strokes* que ocorreu a 4,1 km da torre segundo o LLS e que ilustra um caso de descarga subsequente precedida por um *dart stepped leader*.

O registro da Figura 4.8 ocorreu nas proximidades da estação do Morro do Cachimbo de maneira semelhante ao exemplo ilustrado na Figura 4.7. Observando o registro de campo elétrico da segunda corrente de retorno deste exemplo com uma escala de tempo mais aberta, é possível observar a semelhança entre os formatos de onda associados aos *stepped leaders* e os *dart stepped leaders*. Como o nível de ruído da Figura 4.8 é elevado, foi criada a Tabela 4.2 que reúne os diferentes tipos de *leader* e possibilita a comparação das formas de onda características de cada tipo considerando as ordens de grandeza de duração de cada um dos eventos.

Tabela 4.2 – Comparação entre os diferentes tipos de *leader* em função de sua duração



A Tabela 4.2 permite a visualização das formas de onda de campo elétrico vertical no nível do solo semelhantes à do *stepped leader* porém com tempos associados cerca de dez vezes menores. Além da duração diferenciada para cada tipo de formação de canal condutor, nota-se que os dois primeiros tipos, por serem formados em passos, apresentam pequenas variações na forma de onda e freqüentemente iniciam com uma taxa de crescimento que é aumentada a partir de um momento de maneira perceptível. Já os *dart leaders* possuem duração associada menor e como são por definição processos contínuos, suas formas de onda possuem menos pulsos de dE/dt , o que corresponde a um registro de campo elétrico (dE) com menos oscilações.

Os conjuntos de descargas atmosféricas, os *flashes*, possuem formas de onda tipicamente semelhantes às descargas atmosféricas únicas para a primeira corrente de retorno. Depois, podem apresentar a re-utilização do canal ionizado ou não, configurando os *dart-leaders* ou *dart-stepped leaders*, como pôde ser visto nas figuras anteriores e descrito no capítulo 2 e nas referências [4,5]. O módulo do campo elétrico positivo segundo a notação meteorológica aumenta à medida que as correntes de retorno transferem carga negativa para o solo. Daí o formato de “escada” encontrado nas formas de onda anteriores.

4.2.3 Análises de registros de campo elétrico de componentes contínuas

As componentes contínuas são caracterizadas por um fluxo de corrente de baixo valor,

porém de longa duração, como descrito no capítulo 2. As formas de onda associadas a estes eventos são caracterizadas por um crescimento contínuo no módulo do campo elétrico positivo segundo a convenção atmosférica. De maneira semelhante à corrente de retorno, o efeito produzido pela componente contínua é medido com o mesmo sentido da remoção de cargas negativas da nuvem.

O primeiro exemplo de forma de onda escolhido foi um registro ocorrido no dia 12 de novembro de 2007. No instante $t = -60$ ms (Figura 4.9) ocorre uma corrente de retorno negativa relativamente próxima à torre instrumentada, como descrito e analisado nos exemplos apresentados anteriormente. No instante $t = -45$ ms, aproximadamente, ocorre um pulso bipolar (componente-M) na derivada de campo elétrico que marca o início de uma rampa de crescimento lento e contínuo no módulo do campo elétrico. O fluxo da corrente denominada componente contínua dura por cerca de 125 ms até que um segundo pulso bipolar (componente-M) na derivada do campo elétrico ocorre no instante aproximado de $t = 80$ ms.

A forma de onda de derivada de campo elétrico (dE/dt) apresenta durante toda a duração da componente contínua um valor não-nulo, próximo a $2,5$ kV/m- μ s aproximadamente como pode ser visto na Figura 4.9. Portanto, durante este intervalo de tempo, uma corrente de baixa intensidade fluiu através do canal ionizado pela primeira corrente de retorno, removendo cargas negativas da nuvem.

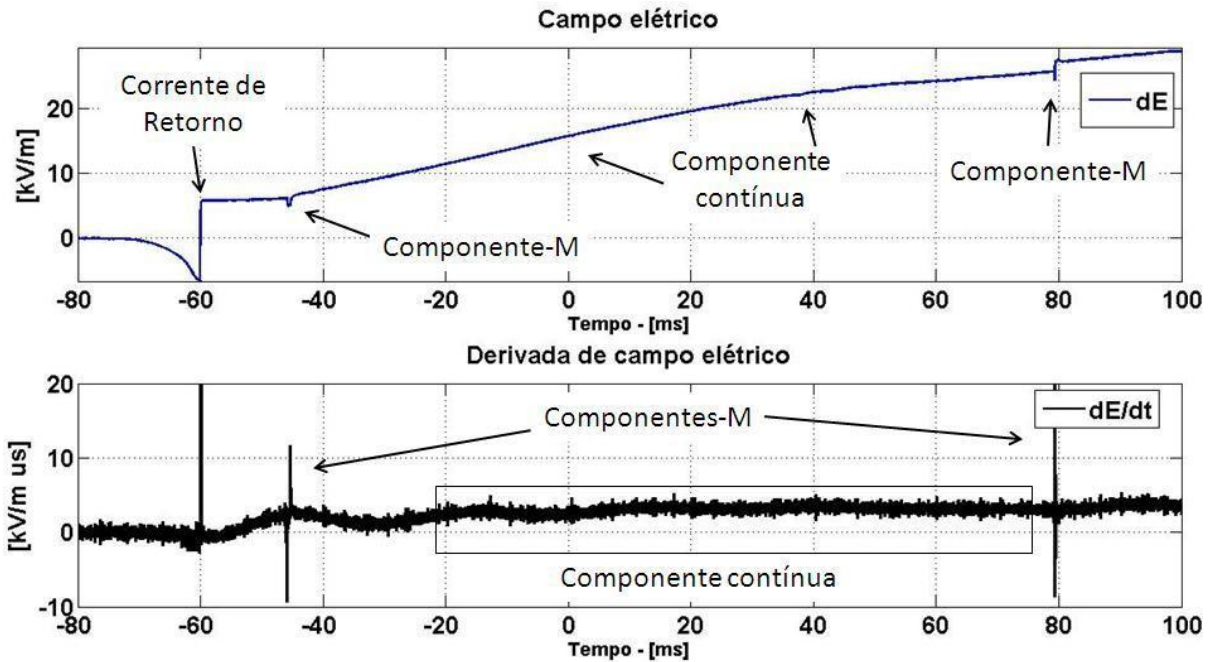


Fig. 4.9 – Registros de campo elétrico (dE) e derivada de campo elétrico (dE/dt) para uma descarga atmosférica negativa única seguida de componente contínua. Registro obtido em 12/11/2007.

As componentes contínuas apresentam valores de pico inferiores aos encontrados nas descargas atmosféricas, porém devido à sua longa duração acabam por transferir grandes quantidades de carga e são geralmente causadoras de danos físicos aos sistemas elétricos de potência. A dissertação de mestrado [11] apresenta um estudo em que foi proposto um sistema de medição montado em uma linha de transmissão experimental com o objetivo de medir a influência das componentes contínuas nas linhas de transmissão.

Outro exemplo de registro de componente contínua é o ilustrado na Figura 4.10. Esta forma de onda foi adquirida em durante uma tempestade no dia 19 de novembro de 2006 e ilustra uma descarga negativa seguida de uma descarga subsequente e então por uma componente contínua.

A primeira corrente de retorno acontece no instante $t = 8$ ms, aproximadamente, seguida da primeira descarga subsequente no instante aproximado $t = 45$ ms. Logo após a corrente de retorno subsequente, o campo elétrico inicia uma rampa de crescimento lenta e constante como apresentada na Figura 4.9. Nota-se que as correntes de retorno incidiram em pontos com distâncias superiores a 5 km em relação à torre instrumentada, porém a

forma de onda associada à componente contínua permaneceu semelhante à obtida no exemplo anterior.

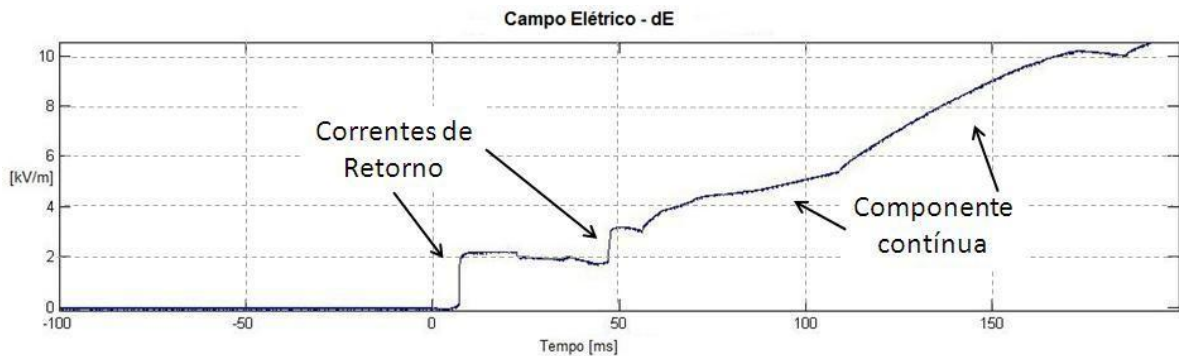


Figura 4.10 – Registros de campo elétrico (dE) para um *flash* seguido de componente contínua.

Este exemplo encerra as formas de onda de campo elétrico escolhidas para ilustração das diversas etapas de formação e ocorrência das descargas atmosféricas. A seção a seguir retrata as análises realizadas para os registros em que foram gravados dados de campo elétrico e de corrente na torre simultaneamente.

4.3 Análises de registros simultâneos de campo elétrico e corrente

Os primeiros exemplos de medição simultânea de campo elétrico e corrente de retorno ocorreram no dia 12 de novembro de 2007, quando foram registrados três *flashes* na torre instrumentada da Estação do Morro do Cachimbo. O segundo deles produziu as formas de onda de campo elétrico dE e dE/dt ilustradas na Figura 4.11.

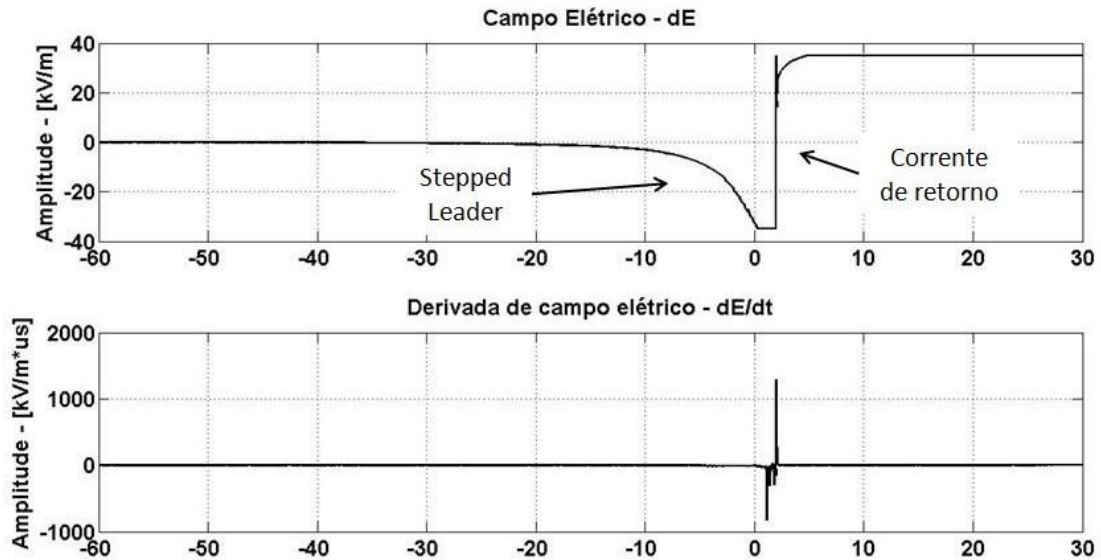


Figura 4.11 – Registro de campo elétrico (dE e dE/dt) para um *stroke* que incidiu na torre instrumentada.

A principal característica que inicialmente distingue este registro dos analisados anteriormente é a amplitude das medições. Devido à proximidade do canal e da corrente de retorno, os valores medidos são grandes o suficiente para causar a saturação da medição de campo dE nos instantes que antecedem a corrente de retorno.

A Figura 4.12 ilustra em maior detalhe as formas de onda de dE e dE/dt nos instantes imediatamente anteriores e imediatamente posteriores à descarga de retorno. Como mencionado anteriormente, este foi o primeiro registro em que campo e corrente foram medidos simultaneamente na estação do Morro do Cachimbo.

Ao observar em maior detalhe o momento do fluxo da corrente de retorno na figura 4.12, nota-se o detalhe da forma de onda de derivada de campo elétrico, dE/dt, que apresenta pulsos unipolares sobrepostos à uma pequena DC seguidos da corrente de retorno. Estes pulsos unipolares correspondem aos passos do canal condutor que está se desenvolvendo em direção ao ponto de conexão com o *leader* negativo.

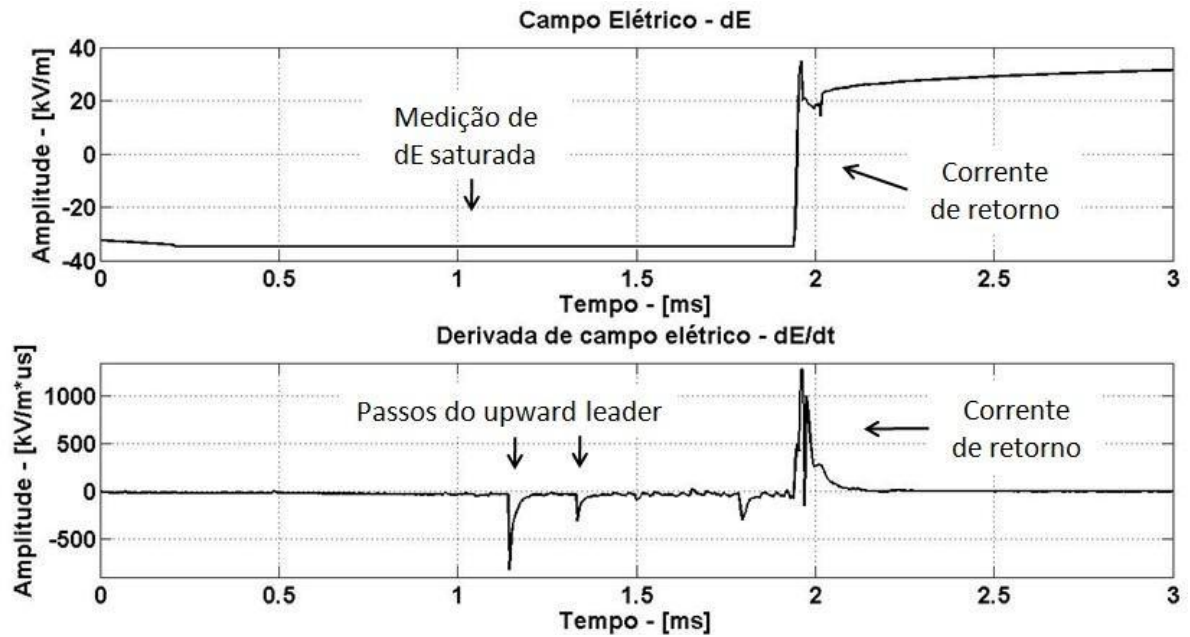


Figura 4.12 – Detalhe do registro de campo elétrico (dE e dE/dt) para o raio que incidiu na torre (MCS).

A corrente foi medida pela bobina Pearson que registra formas de onda de amplitudes até 9 kA e a Figura 4.13 retrata as medições relacionadas de campo elétrico (dE/dt) e corrente.

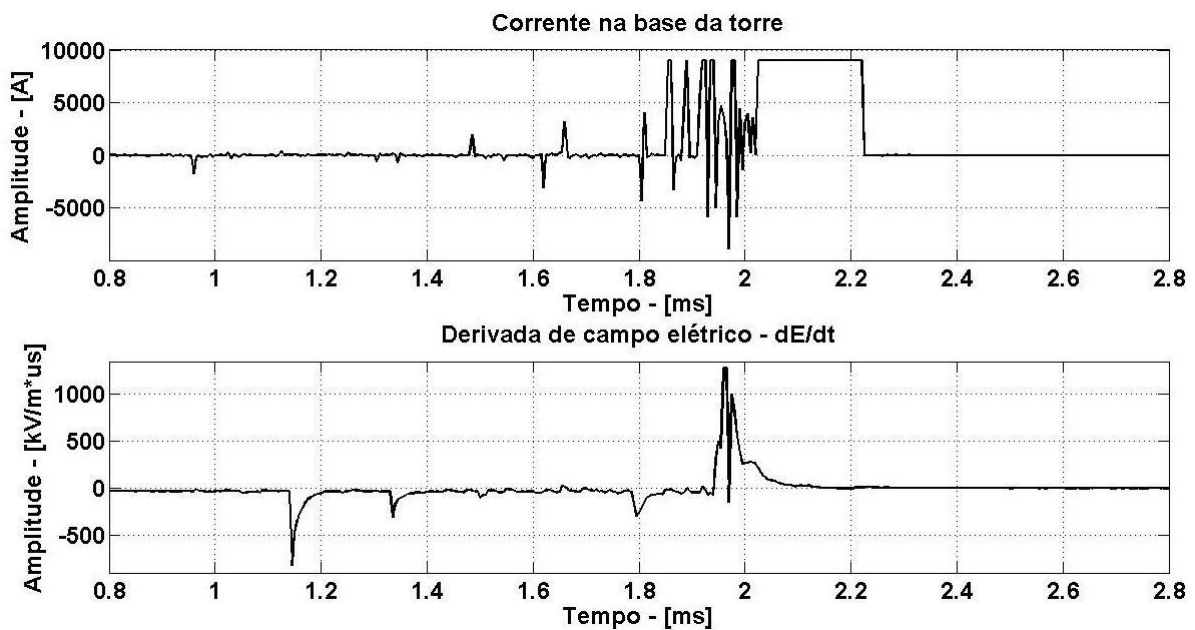


Figura 4.13 – Detalhe do registro de campo elétrico e corrente para o raio que incidiu na torre (MCS).

Ao contrário do que se esperava, para este exemplo as formas de onda de campo elétrico e de corrente aparentemente não apresentam correlação. Contudo, a seqüência de eventos ilustrada nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 acabou por revelar os melhores dados obtidos até a

época, mas também as deficiências do sistema de medição. Foram encontrados problemas com sinais fantasmas, ou seja, o isolamento entre os canais de medição foi rompido e a necessidade de aumentar a frequência de amostragem foi notada. A gravação dos 10 *strokes* envolvendo estes três flashes acabou por danificar a placa de aquisição rápida, como descrito no histórico das medições, seção 4.1.1.

Após um ano e um mês, no dia 31 de outubro de 2008, após as diversas modificações no sistema de medição relatadas no histórico de medições e no capítulo 3, o segundo exemplo de medição simultânea de campo elétrico e corrente foi registrado. O flash possuiu 9 *strokes* registrados nas bobinas de Pearson e o campo elétrico foi gravado em dois arquivos separados devido à uma falha técnica. No momento da aquisição, o registro de campo foi interrompido após a primeira corrente de retorno e voltou a ser gravado aproximadamente 700 ms depois. A Figura 4.14 ilustra uma forma de onda de dE com saturação da medição e as demais características de descarga muito próxima.

Ao observar em detalhe os instantes próximos à descarga de retorno, ilustrados na Figura 4.15, nota-se em primeiro lugar a melhoria na qualidade dos registros devida à melhor resolução de tempo das medições. Os pulsos de dE/dt nos instantes que antecedem a corrente de retorno também são registrados para a descarga em questão simultaneamente à saturação do canal de medição do dE. Como descrito no histórico, após a detecção desta limitação, foi adotada nova configuração de medidas como descrito nas figuras 3.4 e 3.5 para possibilitar a aquisição dos registros próximos em um canal atenuado ou os registros distantes.

Em segundo lugar, observa-se que a forma de onda de dE/dt possui uma componente contínua nos instantes que antecedem a corrente de retorno. Como analisado anteriormente, esta é a característica da componente de corrente contínua e neste caso ilustra o desenvolvimento do *upward leader* por passos e o conseqüente carregamento deste canal na medida em que se desenvolve em direção ao encontro com o canal descendente.

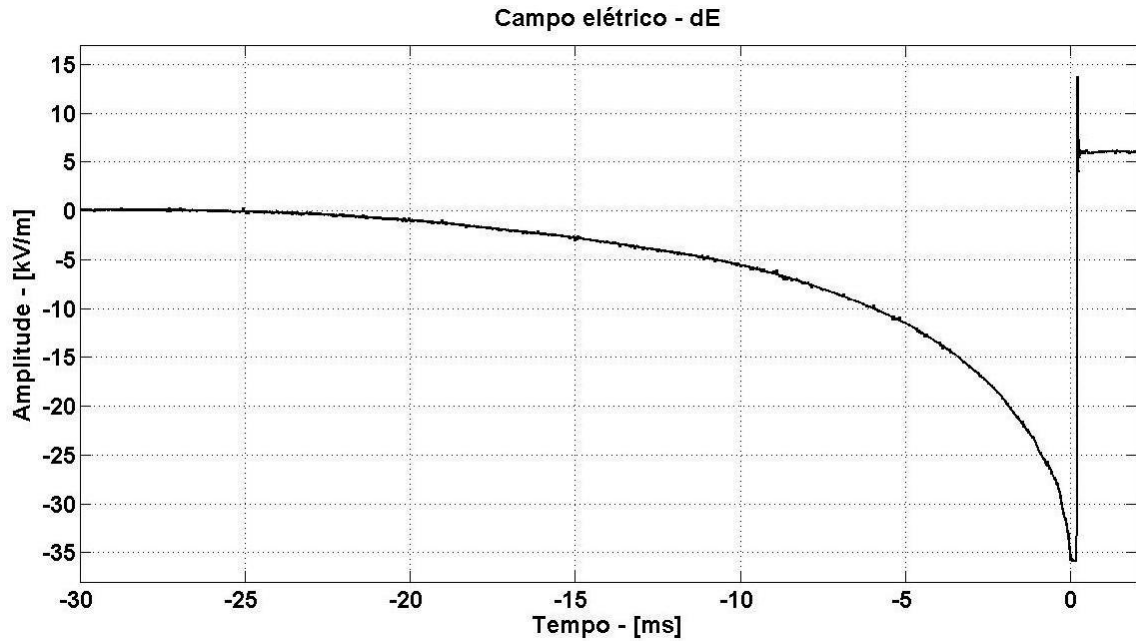


Figura 4.14 – Registro de campo elétrico para o raio que incidiu na torre (MCS) no dia 31/10/2008.

A forma de onda de corrente medida para a primeira descarga de retorno do flash foi registrada em ambas as bobinas de Pearson. Nesta época, a aquisição de correntes já era realizada com a frequência de 60 Ms/s em janelas de 0,5 s. Esta corrente de retorno possui o valor de pico de 45,2 kA para o primeiro pico e tempo de frente, t_{10} , de $5\mu\text{s}$ [1].

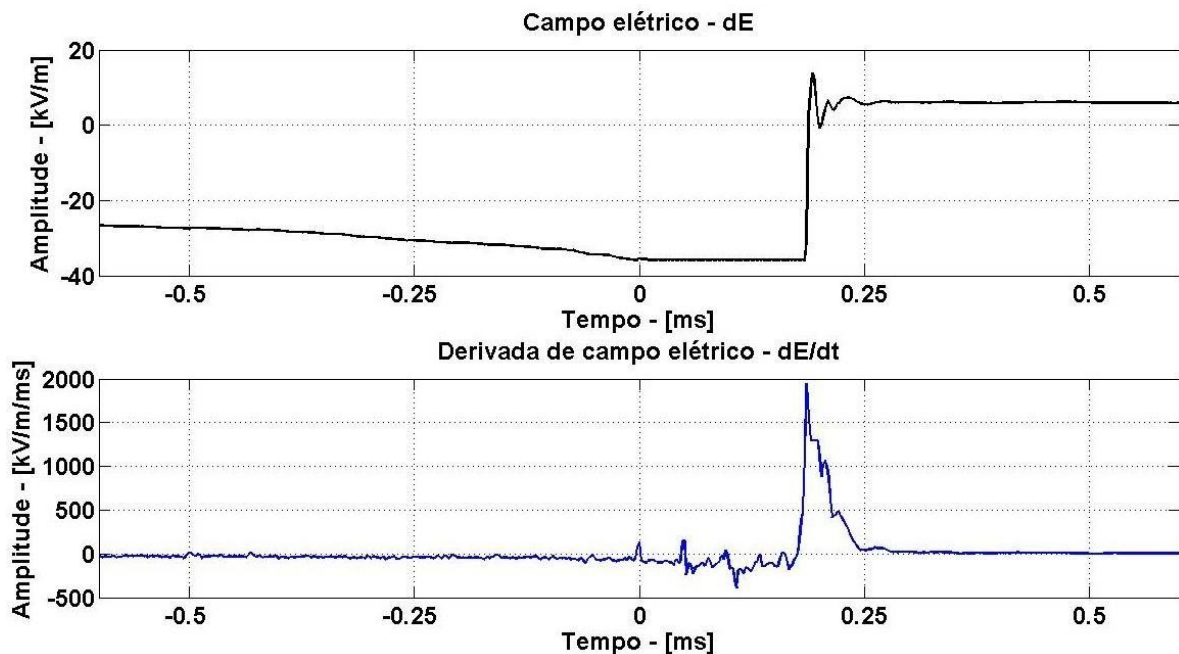


Figura 4.15 – Detalhe do campo elétrico (dE e dE/dt) do raio que incidiu na torre (MCS) no dia 31/10/2008.

A bobina denominada de baixas correntes registrou a forma de onda até o fundo de escala de 9 kA, momento no qual o dispositivo limitador de tensão entrou em operação ceifando a forma de onda e protegendo os canais de aquisição.

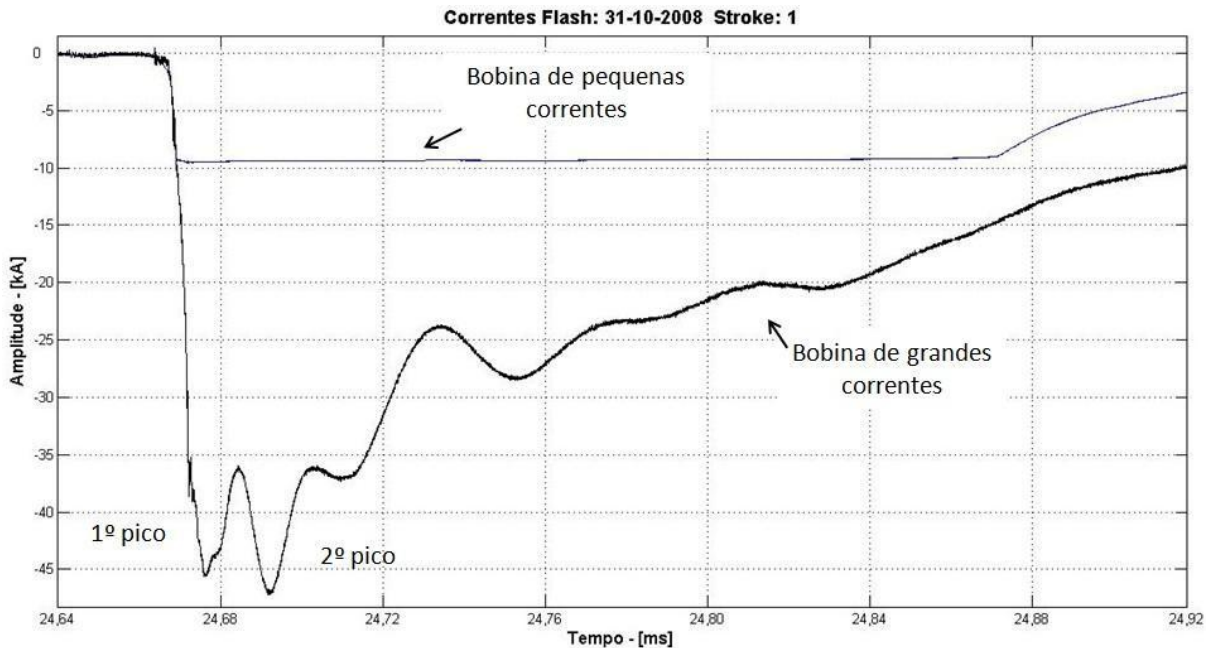


Figura 4.16 – Corrente de retorno do *flash* que incidiu na torre (MCS) no dia 31/10/2008.

Enquanto a frequência de amostragem da corrente na base da torre é realizada a 60 Ms/s, o campo elétrico é registrado com amostragens sensivelmente inferiores, mesmo após as modificações. Desta forma, não é possível avaliar a correlação das variações de campo elétrico durante o instante do fluxo da corrente de retorno. A interpretação física e os desdobramentos eletromagnéticos relacionados com a corrente de retorno extrapolam o escopo desta dissertação e requerem outra formulação além da eletrostática.

Porém, a correlação entre campo elétrico vertical e a corrente medidos simultaneamente pode ser feita nos instantes que antecedem a corrente de retorno, no final do período do *stepped leader*. A figura 4.17 ilustra ambas as formas de onda, com destaque para os passos do *upward leader* comprovados pela medição de corrente simultânea. Como pode ser visto tanto na forma de onda de corrente quanto na de dE/dt , os passos vão em intervalos de tempo cada vez menores até o instante em que uma corrente contínua começa a alimentar este canal condutor em desenvolvimento. O efeito do carregamento do *upward leader* é

percebido em ambas as formas de onda até o momento em que a corrente de retorno flui pelo canal condutor formado entre a nuvem e a terra no instante aproximado $t = 0,2$ ms. A partir deste instante, a bobina de Pearson possui sua forma de onda ceifada, não ilustrada na figura 4.16, devido à escala de corrente utilizada.

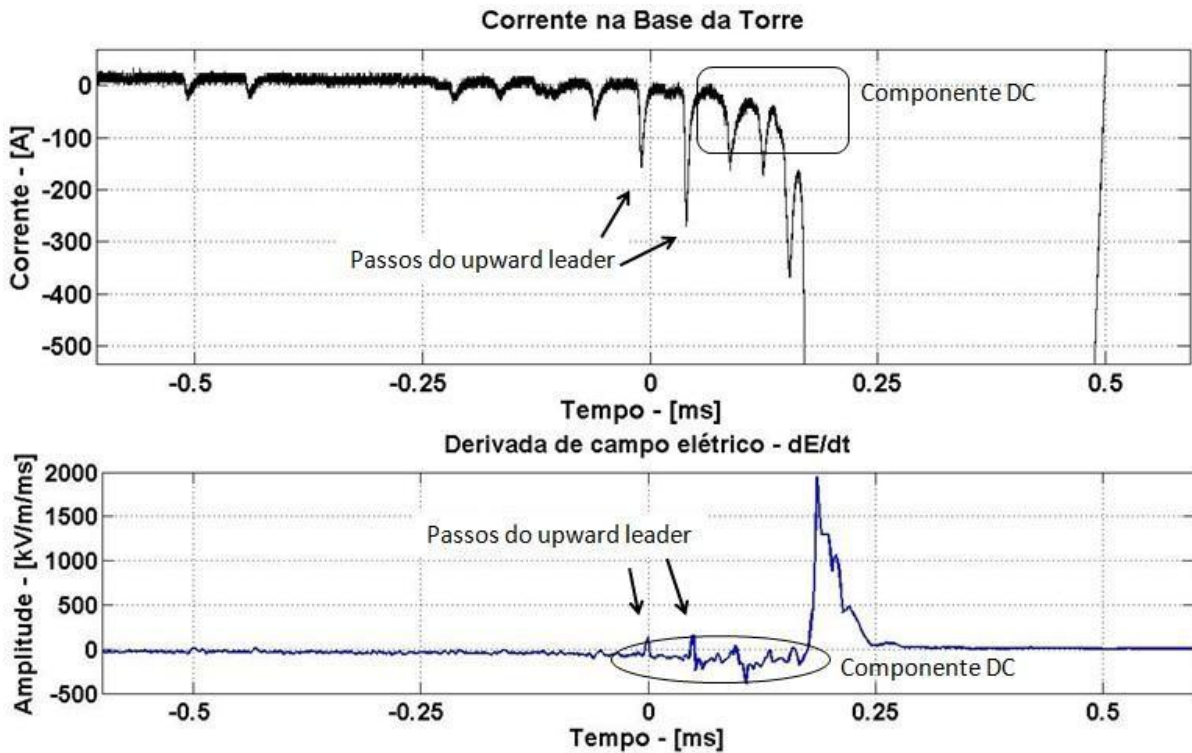


Figura 4.17 – Detalhe da correlação entre a derivada do campo elétrico e a corrente medida na base da torre. O melhor exemplo de análise simultânea de campo e corrente refere-se a outro *flash* também ocorrido no dia 31 de dezembro de 2008. Neste evento, uma das correntes de retorno da descarga atmosférica ocorreu consideravelmente próxima à torre instrumentada do Morro do Cachimbo a ponto de causar o desenvolvimento de um canal condutor, um *upward leader*, que não originou uma incidência direta de descarga atmosférica.

A Figura 4.18 revela a forma de onda de campo elétrico da seqüência de oito correntes de retorno. A descarga que ocorreu no instante aproximado $t = -55$ ms possui um *stepped leader* bem característico e uma grande variação de campo elétrico. Nos instantes imediatamente anteriores à corrente de retorno, a velocidade de crescimento do módulo do campo elétrico aumenta rapidamente até o instante de ocorrência da corrente de

retorno analisada em maior detalhe na figura 4.19.

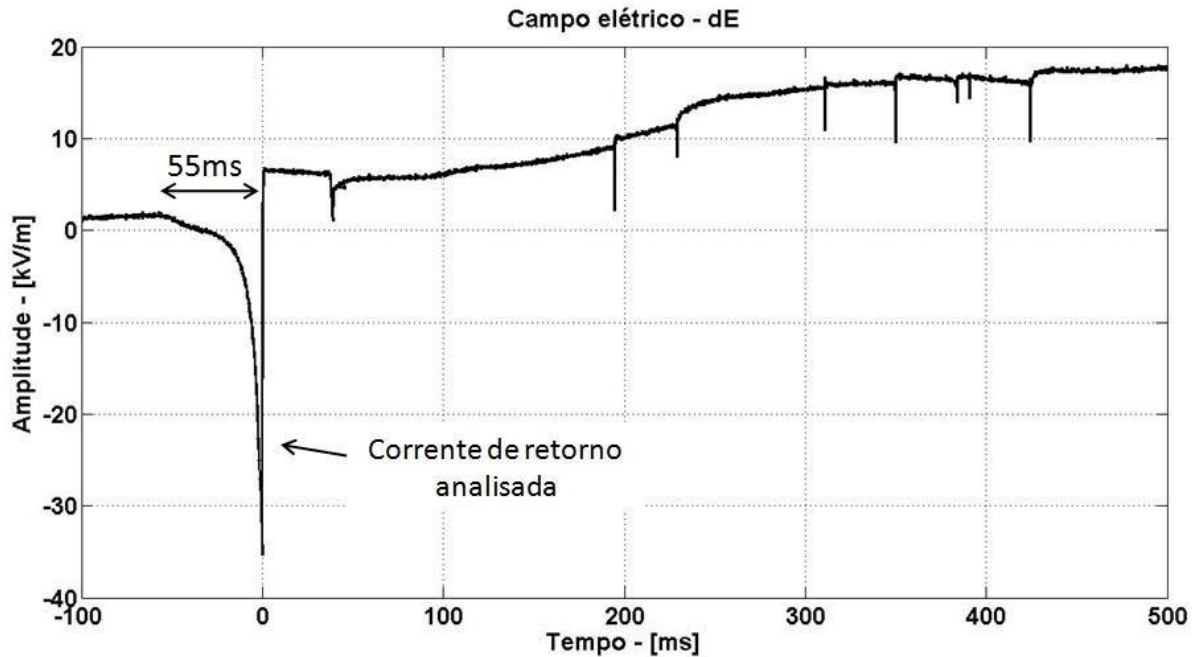


Figura 4.18 – Flash de 31 de outubro de 2010 que ocorreu próximo à estação MCS.

De maneira semelhante aos casos anteriores, devido à proximidade do registro em relação à estação MCS, ocorreu a saturação do campo dE. A figura 4.19 ilustra os instantes próximos à ocorrência da descarga de retorno, e a forma de onda de dE/dt apresenta características de *upward leader* como nas figuras 4.16 e 4.17. Os pulsos associados aos passos e a componente DC que acumula cargas ao longo do canal condutor podem ser observados na forma de onda de dE/dt .

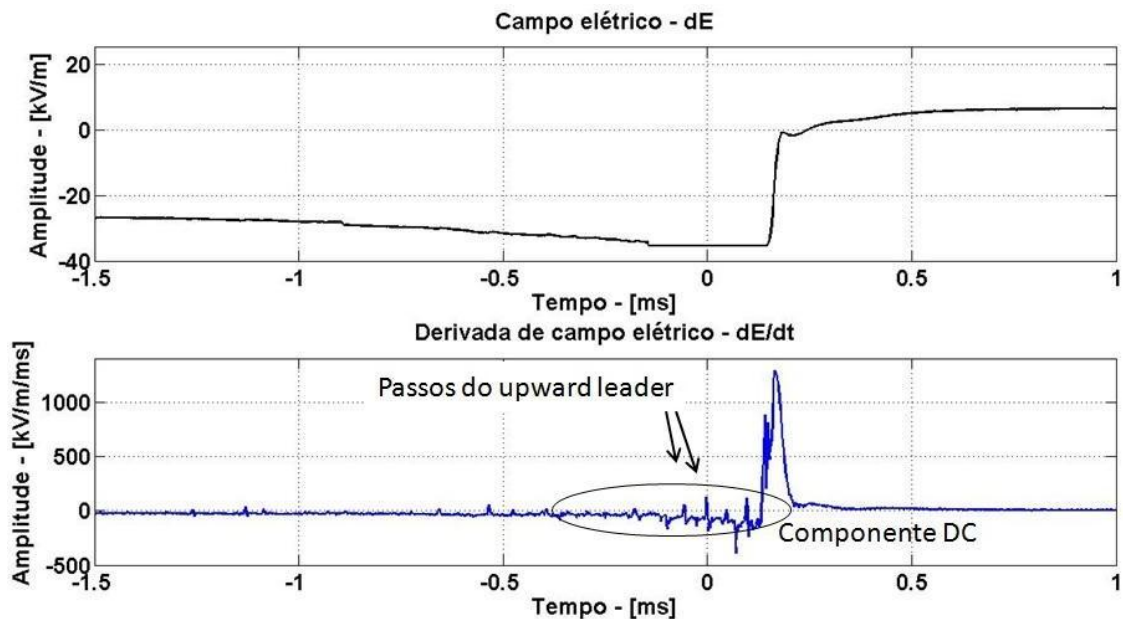


Figura 4.19 – Detalhe do campo elétrico (dE e dE/dt) do raio que ocorreu próximo à estação mas não incidu diretamente na torre.

As formas de onda de corrente e de dE/dt apresentam boa correlação na figura 4.20. O registro de corrente gerou apenas pulsos de corrente sem incidência direta de corrente de retorno na torre. Considerando a existência de corrente registrada, tanto nos pulsos anteriores à corrente de retorno quanto após, foi atribuído a este um caso de *attempted leader*, ou canal ascendente que não originou descarga de retorno.

Embora a resolução de medição de campo elétrico não seja tão grande quanto à de corrente, nota-se semelhança nas formas de onda. Os pulsos de corrente anteriores à conexão do canal descendente em outro canal ascendente são unipolares e negativos. Quando a corrente de retorno em análise ocorre, a forma de onda de corrente é positiva e representa fisicamente o retorno das cargas acumuladas no canal para o solo.

Este foi o melhor exemplo de correlação de corrente e campo porque não houve incidência direta na torre e conseqüentemente, não houve saturação do canal de medição de dE/dt . O mesmo não se pode dizer para o registro de campo elétrico, que apresentou saturação como pode ser observado na figura 4.19.

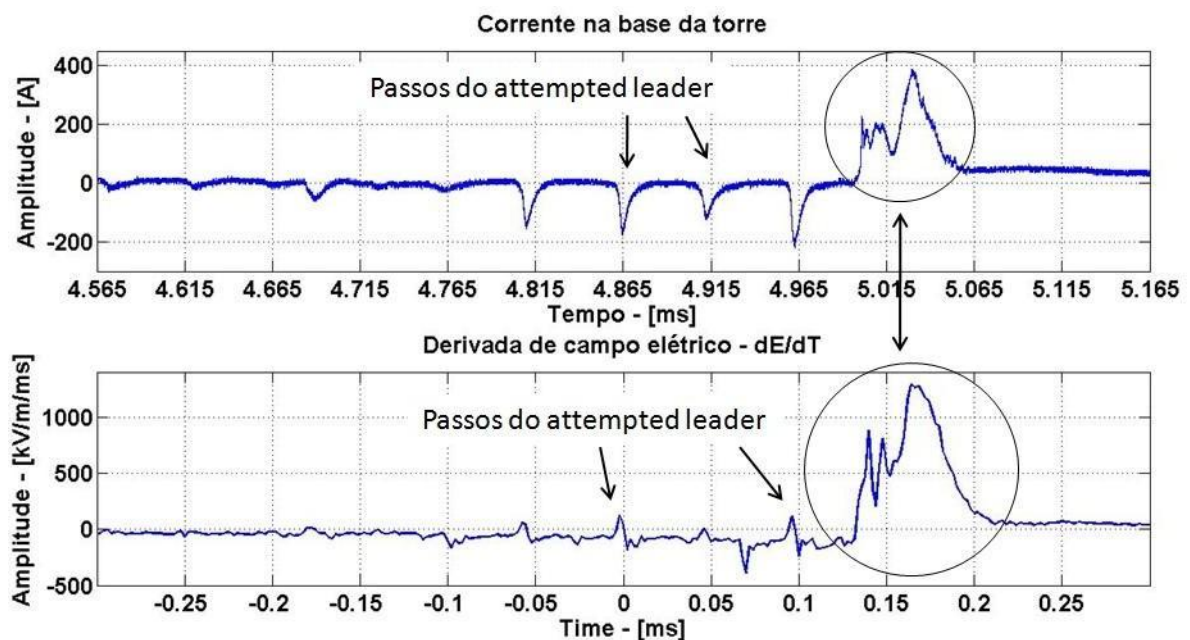


Figura 4.20 – Correlação entre corrente medida na base da torre e a derivada de campo elétrico de um canal

ascendente que não se conectou ao canal descendente.

Outros eventos de corrente e de campo já foram adquiridos, porém estes aqui apresentados foram considerados os mais representativos para ilustrar a evolução das medições, as diversas situações em que as medições não foram favorecidas, mas também os casos em que os registros foram obtidos com qualidade. Nota-se a importância da medição de campo e corrente em canais isolados e com aquisição simultânea como descrito nas últimas melhorias realizadas no sistema de medição. Infelizmente, até a conclusão desta dissertação ainda não foi registrada nenhuma forma de onda a partir da nova configuração que permitisse realizar uma análise mais detalhada.

Estes comentários encerram o capítulo de análise de registros de campo elétrico para as diversas assinaturas de forma de onda e para a aquisição simultânea de corrente e campo elétrico. O próximo capítulo apresenta as conclusões assim como as propostas de continuidade deste trabalho.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Considerações finais e conclusões

Inserido no contexto de pesquisa da Engenharia de Proteção, este trabalho foi realizado com o objetivo de contribuir para a compreensão das formas de onda de campo elétrico geradas pelas descargas atmosféricas e sua associação com as correntes dos canais precursores de descargas.

Após uma breve introdução, foram citados mecanismos de eletrificação das nuvens e a configuração típica de distribuição de cargas nas nuvens. Foi apresentada uma revisão bibliográfica do modelo de campo eletrostático atualmente utilizado pela comunidade científica [4] para equacionar e descrever as origens das variações de campo elétrico associadas às descargas atmosféricas. Este, o modelo do tripolo, foi então exposto e utilizado para equacionar e posteriormente ilustrar os perfis de campo elétrico associados às cargas das nuvens de tempestade. Em seguida, foi apresentada a convenção de sinais de campo elétrico usada pelos pesquisadores de meteorologia para registrar as formas de onda de campo elétrico vertical no nível do solo em cada uma das fases de desenvolvimento das descargas incluindo as correntes de retorno. As particularidades destas formas de onda foram em seguida identificadas.

Após a revisão bibliográfica, foram descritos os sistemas de medição utilizados, as

melhorias e os desenvolvimentos realizados na torre instrumentada do Morro do Cachimbo onde foram adquiridas simultaneamente as formas de onda de campo elétrico e corrente de descargas atmosféricas. Parte do trabalho desta dissertação foi a realização de melhorias nos sistemas de medição existentes. O restante do capítulo apresenta o detalhamento dos sistemas de medição de campo elétrico e de corrente.

Exemplos dos resultados das campanhas de medição realizadas entre os anos de 2006 e 2009 foram analisados no capítulo 4. Em primeiro lugar foi apresentado um breve histórico das configurações do sistema de medição seguido de exemplos de formas de onda analisadas de *descargas atmosféricas únicas*, com detalhamento para o comportamento da forma de onda de campo elétrico do canal precursor de descargas. As análises realizadas são condizentes com os resultados publicados por outros autores e demonstram a consistência da teoria apresentada no Capítulo 2. São também ilustrados exemplos de forma de onda de *múltiplas correntes de retorno (flash)* com destaque para a diferenciação nas formas de onda produzidas pelos diferentes tipos de canais precursores de descargas (*leaders*). Por fim, foram analisadas as formas de onda consideradas mais importantes em que foi possível medir simultaneamente o campo elétrico e a corrente na base da torre. Foram apresentados os indícios da relação entre a derivada de campo elétrico e a corrente em três casos distintos, sendo que particularmente para o caso em que o canal ascendente não foi o ponto de incidência do raio, o registro ilustra muito boa correlação entre as formas de onda medidas.

Considera-se que o principal resultado deste trabalho seja a contribuição para a constituição de meios de medição do campo elétrico de descargas atmosféricas nas diversas fases de formação e desenvolvimento do fenômeno na Estação do Morro do Cachimbo. Foram também importantes a agregação da experiência no desenvolvimento da instrumentação e metodologia de medição à equipe do LRC e, adicionalmente, a experiência transmitida relativa à identificação das assinaturas dos campos associadas aos diversos eventos e a análise física que as justifica.

Os resultados obtidos motivam a continuidade dos estudos com o objetivo de formular um

modelo matemático que relacione o campo elétrico medido com a corrente de retorno. Foi percebido ao longo dos desenvolvimentos que para alcançar tal finalidade seria necessário medir as formas de onda de campo elétrico em outros locais além das proximidades da torre instrumentada para que fosse possível avaliar os efeitos da propagação do campo elétrico e também como suas diversas componentes se comportam à medida em que a distância do ponto de incidência aumenta.

5.2 Proposta de continuidade e perspectivas futuras

Em complementação ao trabalho desenvolvido foi também realizada revisão bibliográfica que identificou os trabalhos realizados por LIN [2] e PAVANELLO [17], nos quais foram conduzidas medições de campo elétrico em múltiplas estações. Tendo em vista o potencial de se realizar medições de primeiras correntes de retorno na estação do Morro do Cachimbo, foi idealizada uma proposta de continuidade deste trabalho em que se pretende medir os campos elétricos simultâneos à corrente de retorno (obtida na base da torre) em 4 estações distintas com distâncias de 800m, 5km e 40km. Tal estudo permitiria uma análise abrangente do campo elétrico produzido pela descarga atmosférica, visto que a forma de onda de campo produzida é diferente para cada distância com que os observadores ou medidores se encontram.

Como mencionado nos capítulos 2 e 4, a variação de campo elétrico devida à ocorrência de uma descarga é diferente para cada distância medida a partir do ponto de incidência. Em outras palavras, para observadores mais próximos ao canal, o ΔE é maior e à medida que o observador se afasta do canal, a variação de campo observada é menor. Desta forma, se o mesmo evento é medido em três estações diferentes, cada uma a uma determinada distância, três registros distintos serão obtidos.

A Figura 5.1 ilustra as diferenças entre as medições, não apenas devido ao ΔE , mas também devido aos efeitos de propagação dos campos. Nota-se que cada um dos pontos de medição produz uma forma de onda diferente de acordo com a componente de campo elétrico medida. Resumidamente, existem três parcelas do campo elétrico que podem ser

separadas a partir das formas de onda do campo elétrico: A eletrostática, a induzida e a irradiada [19]. Como descrito e analisado no capítulo 2, a presença de cargas nas nuvens produz uma distribuição de campo elétrico espacial que é denominada de campo estático. Esta é a parcela do campo elétrico que foi equacionada e modelada a partir do modelo do tripolo. Contudo, existem outras duas parcelas de campo elétrico não mencionadas no capítulo anterior que são geradas pela movimentação das cargas no canal e pela variação temporal da corrente.

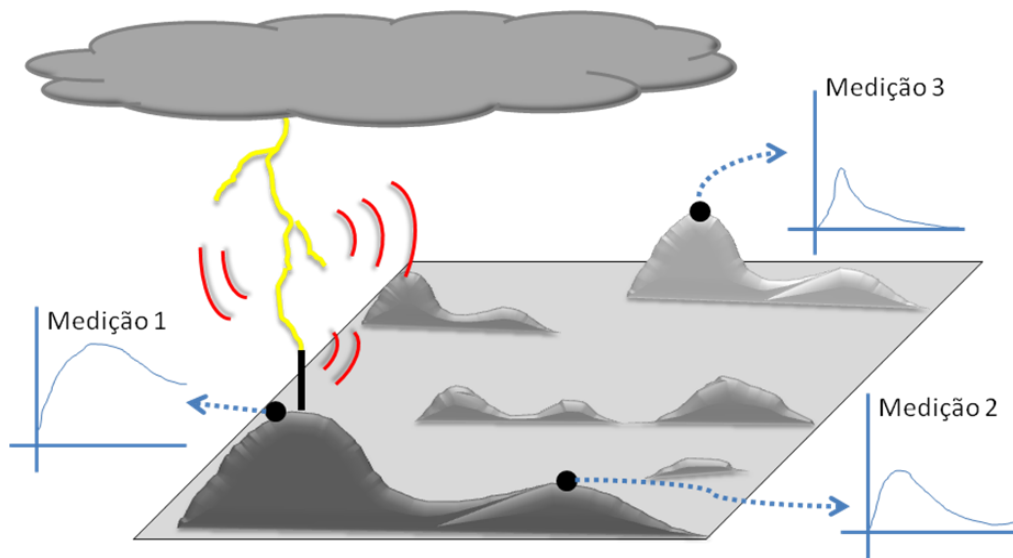


Figura 5.1 – Ilustração hipotética de formas de onda do campo elétrico medidas a diferentes distâncias de uma torre instrumentada. A medição 1 encontra-se a menos de 1 km da torre enquanto a medição 2 estaria distante aproximadamente 10 km da torre e a medição 3 na faixa de 50 km.

A existência destas diversas parcelas de campo elétrico justifica a necessidade de obtenção de múltiplos registros de campo elétrico associados ao mesmo evento. Além disso, para compreender a formação e ocorrência dos raios a partir das formas de onda de campo elétrico, é necessária a capacidade de analisar separadamente as diversas componentes do campo elétrico associadas às descargas atmosféricas [4].

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] VISACRO, S. *Descargas Atmosféricas: Uma abordagem de Engenharia*. São Paulo: ArtLiber, 2005. 276 p.

[2] LIN, Y. T; UMAN, M. A.; TILLER, J. A.; BRANTLEY, R. D.; BEASLEY, W. H; KRIDER, E. P. e WEIDMAN, C. D. **Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurements**. Journal of Geophysical Research, vol 84: 6307-14.

[3] PAVANELLO, D.; RACHIDI, F.; JANISCHEWSKY], W.; RUBINSTEIN, M.; HUSSEIN, E.; PETRACHE, E.; SHOSTAK, V.; BOEV, I.; NUCCI, C. A.; CHISHOLM, W. A.; NYFFELER, M.; CHANG, J. S. e JAQUIER, A. **On return stroke currents and remote electromagnetic fields associated with lightning strikes to tall structures: 2. Experiment and model validation**. Journal of Geophysical Research, vol. 112, D13122, doi: 10.1029/2006JD007959, 2007.

[4] RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. *Lightning: Physics and Effects*, Nova York: Cambridge University Press, 2004, 687p.

[5] UMAN, M. A. *Lightning*, Nova York: McGraw-Hill, 1969, 264p.

- [6] MOORE, C. B., VONNEGUT e HOLDEN, D. N. **Anomalous electric fields associated with clouds growing over a source of negative space charge.** *Journal of Geophysical Research*, vol. 94:13 127 – 34, 1989
- [7] CHAUZY, S. e SOULA, S. **Contribution of the ground corona ions to the convective charging mechanism.** *Atmospheric Research*. 51: 279-300, 1999.
- [8] CLARENCE, N. D. e MALAN, D. J. **Preliminary discharge processes in lightning flashes to ground.** *Q. J. R. Meteor Society* 83: 161-72, 1957.
- [9] PROCTOR, D. E., UYTENBOGGOARDT, R. e MEREDITH, B. M. **VHF radio pictures of lightning flashes to ground.** *Journal of Geophysical Research* vol. 93: 12 683-727, 1988.
- [10] WEIDMAN, C. D. **The sub microsecond structure of lightning radiation fields.** Tucson: University of Arizona. Tese de Doutorado, 1982.
- [11] TEIXEIRA, A. M. N. **Sistemas para Medição de Correntes de Descargas Atmosféricas: Desenvolvimentos e Resultados Preliminares.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, 2010.
- [12] ERIKSSON, A. J. **Choice and provisions of the CEMIG lightning research station site.** National electrical engineering research institute, South Africa, 1985.
- [13] KRÖNINGER, H. **CEMIG lightning research station system operation.** National electrical engineering research institute, South Africa, 1985.
- [14] GELDENHUYS, H. J. **CEMIG lightning parameter recording station: Installation manual.** National electrical engineering research institute, South Africa, 1985.
- [15] SCHOREDER, M. A. **Modelo Eletromagnético Para Descontaminação de Ondas e**
-

Corrente de Descarga Atmosférica: Aplicação Às Medições Da Estação do Morro do Cachimbo. Belo Horizonte: UFMG. Tese de Doutorado, 2001.

[16] OLIVEIRA, R. Z. **Sistema para medição de parâmetros de canais ascendentes de descargas atmosféricas na estação de pesquisas do Morro do Cachimbo.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

[17] PAVANELLO, D. **Electromagnetic Radiation from Lightning Return Stroke to tall Structures.** Lausanne: École polytechnique fédérale de Lausanne, Tese de Doutorado, 2007.

[18] CORREA, G. M., TEIXEIRA, A. M. N., VISACRO, S., MESQUITA, C. R., PEREIRA, L. C., ALMEIDA H. R. L., SENNA A. L., RUHNKE L. e MAZUR V., **“Improvements of the Facilities for Lightning Research at Morro do Cachimbo Station”** em *Proc. of 29th Int. Conf. on Lightning Protection*, 2008.

[19] THOTTAPPILLIL, R., RAKOV, V. A., UMAN, M. A. **Distribution of charge along the lightning channel: Relation to remote electric and magnetic fields and to return-stroke models.** *Journal of Geophysical Research* vol. 102: 6987-7006, 1997.

[20] MESQUITA, C. R. **Investigação de Sistemas de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, 2001.

[21] MESQUITA, C. R., DIAS, R. N., VISACRO, S., CORREA, G. M.; **Comparing Truth Reference Lightning Events in Morro do Cachimbo Station to Brazilian LLS Results.** *International Conference on Ground and Earthing & International Conference on Lightning Physics and Effects (Ground'2008 & 3rd LPE)*, Florianópolis, p.463 - 466, 2008.

[22] RUNHKE, L., MAZUR, V., ZICA, R, O, FELIPE, M, VISACRO, S. **“The response of towers and other structures to nearby lightning”** *International Conference on Ground and Earthing & International Conference on Lightning Physics and Effects (Ground'2006 &*

2rd LPE), Maceió, p.1 - 6, Novembro, 2008.

[23] MEIER, V. A., *Electric Power Systems – A conceptual Introduction*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 301p.

[24] MEWALDT, R. A.. "Cosmic Rays". California Institute of Technology. 2010.

Referências adicionais

CORRÊA G. M., VISACRO, S., TEIXEIRA, A. M. N., RUHNKE, L. e MAZUR V., **“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.

MAZUR V., **“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.

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

VISACRO, S., **“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.

VISACRO S., SCHROEDER, M. A. O., SOARES A., CHERCHIGLIA L. C. L. e SOUZA, V. J., **“Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station”**, *Jounal. of Geophysical Research*, 109, 2004.

VISACRO, S., VALE, M. H. M., CORRÊA, G. M. e TEIXEIRA A. M. N., **“The Early Phase Of Lightning Currents Measured In A Short Tower Associated With Direct And Nearby**

Lightning Strikes” em Journal of Geophysical Research, doi:10.1029/2010JD014097, in press, 2010.

