

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE PARÂMETROS DE CANAIS
ASCENDENTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NA ESTAÇÃO DE
PESQUISAS DO MORRO DO CACHIMBO**

RENATO ZICA DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE PARÂMETROS DE CANAIS
ASCENDENTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NA ESTAÇÃO DE
PESQUISAS DO MORRO DO CACHIMBO**

RENATO ZICA DE OLIVEIRA

Dissertação de Mestrado a ser apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Engenharia de Potência
Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Prof. Silvério Visacro Filho
Coorientador: Prof. Peterson de Resende

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEE
CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – CPDEE
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG

BELO HORIZONTE

DEZEMBRO - 2007

AGRADECIMENTOS

Não foi fácil chegar ao final deste trabalho, mas aqui estamos. Depois de muito esforço e incansáveis horas de pesquisa, quero agradecer àqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta caminhada e para meu aprendizado, sempre me apoiando. A todos que estiveram ao meu lado, incentivando, tirando dúvidas, dando sugestões e até mesmo “puxões de orelha”, deixo o meu eterno reconhecimento.

Sem Deus, a lugar nenhum iríamos. É a Ele meu primeiro agradecimento.

Ao Prof. Silvério Visacro Filho, que me orientou, deu suporte técnico e financeiro e foi quem mais me incentivou neste desafio. Sem ele, nada disso seria possível. Muito obrigado pela paciência, por dividir comigo um pouco do seu conhecimento, ceder a mim muitas e muitas horas do seu tempo, em leituras, em demoradas reuniões e por nortear meu caminho até o fim.

Um agradecimento especial a Vladislav Mazur e Lothar Ruhnke, que foram os precursores na investigação e compartilharam conosco suas experiências, ensinando, orientando e mostrando-se grandes pesquisadores, além de ótimos parceiros.

A todos os companheiros do LRC: Cláudia Mesquita e Rosilene Dias, que contribuíram imensamente fornecendo informações para o trabalho, Alisson Ladeira, sempre pronto para ajudar, Guilherme Murici, Fuad Almeida, Fabrício Chaves, Alberto de Conti, Antônia Navarro, Adelino Pinheiro, Luiz Mariano, Werveson Rocha e Walmir, que caminharam ao meu lado, dividiram dúvidas e tropeçaram nas mesmas pedras.

A Fernando Silveira, Bruno Pinto, Roberto Ângelo, Rafael Bianchi, Marcelo Felipe, Adriano Campolina, Armando David, Graziela Volpato, Adriana Silva e ao pessoal da DF/Patos de Minas, simplesmente por serem meus grandes amigos. A presença de vocês é muito importante para mim.

Por último, agradeço aos meus pais, Adilson (*in memoriam*) e Vera Lúcia, e aos meus irmãos, Flávio e Rodrigo. Minha vida não teria sentido sem vocês. Devo-lhes tudo que sou e todas as minhas conquistas. Muito obrigado!

"When you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meager and unsatisfactory kind: it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely, in your thoughts, advanced to the stage of science."

Lord Kelvin - William Thomson (1824-1907)

Dedico este trabalho à minha
querida avó, Dona Lenita Alves,
à minha mãe, Vera Lúcia, e aos
meus irmãos, Flávio e Rodrigo.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA	1
1.2 OBJETIVO	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	3
2. ESTADO DA ARTE NO TEMA	5
2.1 INTRODUÇÃO.....	5
2.2 BREVE HISTÓRICO SOBRE AS PESQUISAS NO TEMA	6
2.3 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES SOBRE AS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	7
2.4 MECANISMO BÁSICO DE ESTABELECIMENTO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	9
2.5 O CANAL ASCENDENTE	12
2.5.1 Aplicação do Modelo Eletrostático	12
2.5.2 Formas de Surgimento do Canal Ascendente.....	16
2.5.3 Parâmetros Físicos do Canal Ascendente	17
2.6 PERFIS TÍPICOS DO CAMPO ELÉTRICO GERADO POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	22
3. O SISTEMA DE MEDIÇÃO	27
3.1 INTRODUÇÃO.....	27
3.2 A ESTAÇÃO DE PESQUISAS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DO MORRO DO CACHIMBO	28
3.2.1 A Torre.....	28
3.2.2 O Abrigo Principal.....	29
3.2.3 O Aterramento	30
3.3 O SISTEMA DE MEDIÇÃO	30
3.3.1 Elementos do Sistema.....	30
3.3.2 Medição da Variação Lenta do Campo Elétrico dE	40
3.3.3 Medição da Variação Rápida do Campo Elétrico dE/dt	44
3.3.4 Medição da Elevação de Potencial na Impedância de Aterramento da Torre.....	47

3.3.5	Medição da Corrente no Condutor de Descida da Torre.....	50
3.3.6	Medidores Eletrônicos de Campo Elétrico e Ajustes.....	51
3.3.7	Potencialidades e Limitações	54
3.3.8	Problemas Inerentes ao Sistema e Soluções Adotáveis para Compensação.....	56
3.3.9	Aspectos de Concepção.....	58
4.	RESULTADOS PRELIMINARES.....	60
4.1	INTRODUÇÃO.....	60
4.2	FORMA DE APRESENTAÇÃO DOS DADOS REGISTRADOS.....	61
4.3	REGISTROS SELECIONADOS	62
4.3.1	Primeiro Subconjunto	62
4.3.2	Segundo Subconjunto	78
4.4	COMPARAÇÃO ENTRE ALGUNS REGISTROS DE dE PROVENIENTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NUVEM-SOLO NEGATIVAS.....	86
4.5	COMENTÁRIOS FINAIS	88
5.	CONCLUSÕES	90
5.1	INTRODUÇÃO.....	90
5.2	ANÁLISE DA POTENCIALIDADE E DAS LIMITAÇÕES DO SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	91
5.2.1	Medições das Variações Lenta e Rápida do Campo Elétrico.....	91
5.2.2	Medições de Corrente na Torre.....	92
5.2.3	Medições de Tensão no Aterramento da Torre.....	93
5.3	CONCLUSÕES GERAIS	94
5.4	PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	96
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
	APÊNDICE	101

RESUMO

As descargas atmosféricas constituem a causa mais freqüente de desligamentos não programados nos sistemas de energia elétrica. O canal ascendente da descarga atmosférica é o elemento responsável pela definição do ponto de incidência desta. Alguns pesquisadores acreditam, ainda, que a corrente envolvida no processo de formação desse canal seja capaz de causar danos em dispositivos sensíveis, como equipamentos instalados em torres de telecomunicações, mesmo quando tal canal não evolui para uma descarga atmosférica. Tais fatos têm motivado pesquisas relacionadas ao estabelecimento do canal ascendente, visando a uma melhor caracterização desse processo.

Nesse contexto, insere-se o presente trabalho de mestrado que teve como objetivo desenvolver um sistema de medição para registro de campo elétrico, tensão e corrente, para fins de caracterização do processo. O sistema foi implementado na Estação de Pesquisas de Descargas Atmosféricas do Morro do Cachimbo, a 15 km de Belo Horizonte – Minas Gerais, para registro dos parâmetros de maior interesse na caracterização de canais ascendentes iniciados em estruturas elevadas. Acredita-se que, da evolução desta pesquisa, possam ser gerados elementos para o aprimoramento de filosofias de blindagem e proteção de sistemas de energia elétrica.

O sistema de medição é descrito no presente texto, e são apresentados os primeiros resultados obtidos por ele, bem como suas potencialidades e limitações. Os problemas e as dificuldades inerentes à implementação e à manutenção do sistema são comentados, na perspectiva de busca de seu aprimoramento.

ABSTRACT

Lightning is responsible for most of the non-schedule outages in the electric system. The upward leader defines the striking point location, and some researchers believe that the electric current during its initial stage is able to cause damages to sensitive equipments, as those ones installed in telecommunication towers, even if the physical process does not develop a lightning. These aspects have motivated investigations related to the upward leader initiation, aiming a better characterization of the associated process.

This context justifies the presented work, whose objective was developing a measuring system able to register the electric field, the voltage drop and the current associated with upward leader. The system was implemented in the Morro do Cachimbo Station, situated 15 km to Belo Horizonte – Minas Gerais State, Brazil, to measure the major interesting parameters to the characterization of upward leaders from tall structures. There is a expectation that developments following this research may contribute to improve shielding and protection techniques.

The measuring system is described in this text and the first results obtained from its application are considered, as well its potentialities and limitations. The problems and difficulties inherent to its implementation and maintenance are commented in the perspective of allowing the system improvement in a close future.

1 Introdução

1.1 Relevância do Tema

Há muitos anos, tem se verificado o contínuo e crescente consumo de energia elétrica pela sociedade. O avanço tecnológico tem incorporado equipamentos e componentes sensíveis às cargas alimentadas pelos sistemas elétricos, sobretudo àquelas altamente digitalizadas. Tais equipamentos requerem o fornecimento de energia de melhor qualidade, pois interrupções no fornecimento de energia e distúrbios na forma de onda da tensão provocam, muitas vezes, queima desses equipamentos e paradas na produção industrial, o que gera prejuízos e encarece os produtos desse processo.

As descargas atmosféricas constituem a causa mais freqüente de desligamentos não programados nos sistemas de energia elétrica. Segundo a CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais – 70% das interrupções no fornecimento ocorridas em Minas Gerais são devidas às descargas atmosféricas que incidem diretamente no sistema ou que nele induzem sobretensões (VISACRO, 2005a).

Tradicionalmente, os parâmetros de descargas atmosféricas coletados nas diversas investigações sobre o fenômeno estão associados ao estágio da descarga posterior à conexão dos canais descendente e ascendente (*attachment*), do qual decorre o fluxo da corrente de retorno.

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 o surgimento do canal ascendente, embora seu princípio seja bem relatado.

O conhecimento sobre o surgimento e a evolução do canal ascendente é importante pela influência que este exerce na definição do ponto de incidência da descarga atmosférica. Considerando-se a evolução de uma descarga negativa descendente, evento de maior interesse por corresponder a aproximadamente 90% das descargas nuvem-solo, o canal descendente define a macro região de incidência, pois ele evolui até a proximidade do solo praticamente sem a influência deste. Entretanto, é o canal ascendente resultante dos campos elétricos muito intensos no solo, cujas distribuições são fortemente influenciadas pelo relevo e estruturas terrestres, que define o ponto de incidência exato, após sua conexão com o canal descendente. É desse fato que decorre a adoção de medidas de proteção baseadas na instalação de captosres, constituição de corpos elevados ou estruturas reticuladas que formem pontos preferenciais de surgimento de canais ascendentes, dando origem a práticas de blindagem.

Assim, na perspectiva da Engenharia de Proteção, interessa sobremaneira caracterizar os parâmetros relativos ao surgimento e evolução do canal ascendente. A literatura reporta a possibilidade de se caracterizar tais parâmetros por meio de medição de campo elétrico, de corrente e de elevação de potencial. Comenta também a estimativa de níveis muito elevados de corrente associados à formação dos canais ascendentes. Alguns autores reportam que, mesmo na fase de estabelecimento do canal ascendente, correntes muito rápidas, que vão de dezenas a milhares de *ampères* (UMAN, 1994) (WADA, 2002), podem ter efeitos destrutivos no sistema elétrico, tais quais os promovidos pela fase impulsiva das descargas atmosféricas.

O presente trabalho objetiva constituir meios fundamentais para o desenvolvimento de uma investigação para caracterização dos parâmetros dos canais ascendentes que se iniciam em estruturas elevadas, na perspectiva da engenharia de aplicação. Tem-se a expectativa de que, no futuro, o conhecimento decorrente dessa investigação possibilite a

adoção de técnicas mais eficientes de blindagem, para aprimoramento das práticas de proteção contra as Descargas Atmosféricas.

Esta dissertação de mestrado constitui o primeiro trabalho de pós-graduação desenvolvido no LRC¹, envolvendo a medição e a detecção de campos elétricos gerados por descargas atmosféricas. Nesta perspectiva, são comentados no texto os aspectos básicos referentes a esses campos elétricos, não apenas aqueles ligados à evolução do canal ascendente, mas aqueles ligados às descargas atmosféricas em geral.

O desenvolvimento desta investigação decorreu da cooperação entre o LRC e o *National Severe Storm Laboratory* dos Estados Unidos. A contribuição de dois pesquisadores, Vladislav Mazur e Lothar Ruhnke, foi essencial para a realização desse trabalho.

1.2 Objetivo

O objetivo fundamental desta dissertação consistiu no desenvolvimento e implementação de um sistema de medição baseado na detecção e registro de campos elétricos, para fins de caracterização de parâmetros de canais ascendentes de descargas atmosféricas nuvem-solo, bem como a apresentação dos primeiros resultados da aplicação deste sistema.

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 Descarga Atmosférica. Tais trabalhos, que tratam de 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 6 capítulos, incluindo este capítulo introdutório, e um apêndice.

¹ LRC: *Lightning Research Center* – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas, constituído por meio de convênio firmado entre a CEMIG e a UFMG.

No **Capítulo 2**, é apresentado o estado da arte no tema, destacando-se os pontos de interesse para o trabalho a partir de resultados obtidos por outros pesquisadores.

O **Capítulo 3** apresenta o Sistema de Medição, incluindo detalhes de implementação, suas principais características, potencialidades e limitações.

No **Capítulo 4**, são mostrados os primeiros resultados obtidos pelo Sistema de Medição em questão, bem como o perfil do campo elétrico medido e alguns registros com peculiaridades interessantes.

O **Capítulo 5** apresenta uma discussão preliminar sobre os resultados obtidos, a qual se funde com uma análise das potencialidades e limitações do sistema. As conclusões finais desta dissertação de mestrado e os possíveis desdobramentos relativos às propostas de continuidade também se encontram neste capítulo.

Finalmente, no **Capítulo 6**, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas ao longo deste texto, seguidas do Apêndice, onde se encontram diagramas de circuitos pertencentes ao Sistema de Medição.

2 Estado da Arte no Tema

2.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é situar o leitor quanto ao tema desta dissertação. Inicialmente, é apresentado um breve comentário sobre a pesquisa das descargas atmosféricas no mundo e no Brasil, ao longo da história. Mais adiante, são considerados aspectos essenciais sobre o fenômeno e, particularmente, sobre o mecanismo básico de formação de uma descarga atmosférica para introdução da investigação do canal ascendente, à qual se destina a aplicação do sistema de medição, cujo desenvolvimento constituiu o objeto principal da presente dissertação. Em seguida, aprofunda-se no tema específico Canal Ascendente. Por fim, fechando o capítulo, é apresentada uma discussão introdutória sobre o perfil dos campos elétricos gerados pelas descargas atmosféricas e alguns aspectos físicos associados.

2.2 Breve Histórico Sobre as Pesquisas no Tema

Há cerca de 200 anos, Benjamim Franklin provou que os raios tinham natureza elétrica e mediu o sinal das cargas nas nuvens que os provocavam. Pesquisas modernas sobre a física das descargas atmosféricas começaram no início do século XX, com os trabalhos de C.T.R. Wilson¹. Este, por meio de medições e análises remotas de campos elétricos de nuvens de tempestade, foi o primeiro a sugerir a estrutura da nuvem de tempestade e a quantidade de cargas envolvidas na descarga atmosférica.

A partir da década de 30, as pesquisas sobre o fenômeno aumentaram, motivadas principalmente pela necessidade de se reduzir os efeitos das descargas nos sistemas elétricos de energia e pelo desejo de compreensão dos processos envolvidos no fenômeno. A partir da introdução da aplicação de dispositivos eletrônicos em larga escala na década de 60, houve um novo fator de interesse para maior evolução da área, em função da vulnerabilidade destes dispositivos a sobretensões induzidas por descargas atmosféricas. Os acidentes envolvendo aviões e veículos espaciais² também incentivaram as pesquisas (UMAN, 1994) sobre descargas.

No Brasil, as pesquisas, dedicadas sobretudo à caracterização dos parâmetros da corrente de retorno da descarga, tiveram início em meados da década de 80 pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e, posteriormente, envolveram o Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), através do LRC.

Ainda hoje, o tratamento do tema Descargas Atmosféricas não se constitui em uma tarefa técnica trivial. Parte dos fenômenos associados tem metodologias aproximadas razoavelmente corretas, as quais permitem o ajuste dos parâmetros de projeto para assegurar um desempenho satisfatório em termos da proteção de sistemas e da vida frente às descargas. Contudo, é prudente observar que alguns aspectos das descargas não foram, ainda, suficientemente estudados e, freqüentemente, encontram-se na literatura erros grosseiros quanto aos aspectos físicos fundamentais e em relação à interpretação e à análise dos efeitos da incidência de descargas atmosféricas (VISACRO, 2005a).

¹ Enciclopédia Britânica (<http://www.britannica.com/eb/article-9077118>).

² Em 1963, um Boeing 707 foi atingido por uma descarga atmosférica e explodiu. Em 1969, foi a vez da *Apollo 12*, durante sua decolagem. Outro veículo espacial, o AC167, foi atingido pouco depois de ser lançado, resultando em sua destruição.

2.3 Considerações Preliminares Sobre as Descargas Atmosféricas

Antes de uma abordagem técnica do assunto e para se evitar confusão em relação aos termos e expressões empregados no texto, é bom que se comente sobre a nomenclatura aqui adotada. Por questões práticas e de padronização dos trabalhos desenvolvidos no LRC, como é o caso desta dissertação de mestrado, convencionou-se o emprego dos termos definidos em (VISACRO, 2005a). Nesta referência, podem ser encontrados os termos utilizados, sua tradução para o inglês e sua definição do ponto de vista físico.

A fonte mais comum das descargas atmosféricas é a separação de cargas nas tradicionais “nuvens de tempestade”, também chamadas de *cumulonimbus*. O modelo clássico da estrutura de uma nuvem de tempestade, assumido na literatura na forma de um tripolo elétrico, é mostrado na Figura 2.1.

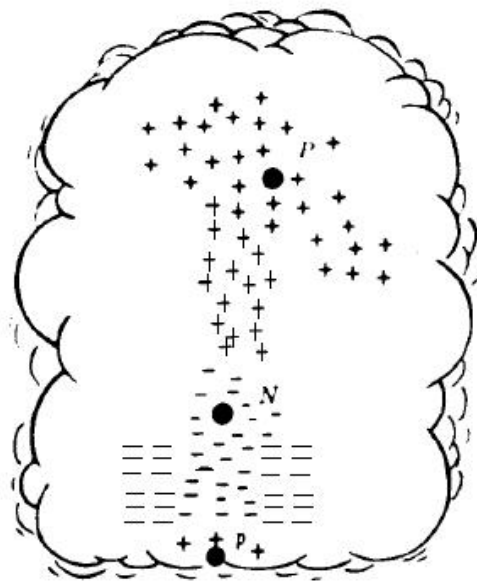


Figura 2.1 – Estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade típica. Adaptada de (UMAN, 1984).

Há quatro tipos distintos de descargas atmosféricas entre nuvem e solo. Por ser esse um assunto bastante trabalhado na literatura técnica, far-se-á apenas uma citação de cada um dos tipos, a título de ilustração. A partir da polaridade da carga efetivamente transferida ao solo e pela direção de propagação do canal inicial, fica caracterizado o tipo

da descarga atmosférica. A Figura 2.2 os ilustra, quais sejam: (a) descarga descendente negativa, (b) descarga ascendente negativa, (c) descarga descendente positiva, (d) descarga ascendente positiva. Em todos eles, há transferência de cargas da nuvem para o solo, podendo haver ou não a existência de um canal ascendente. Na maioria dos casos, há este canal.

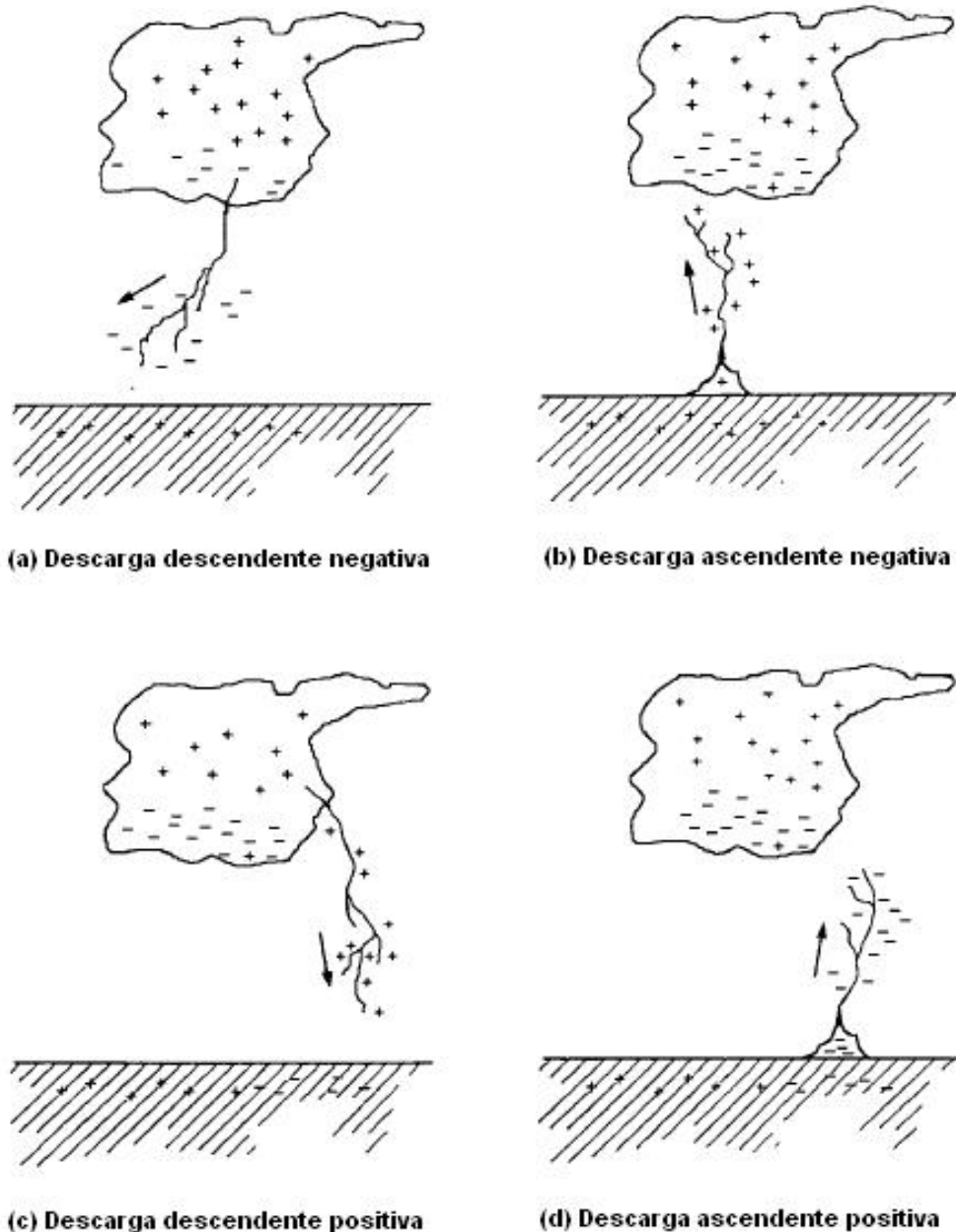


Figura 2.2 – Tipos de descargas atmosféricas nuvem-solo. Só estão sendo representados os canais iniciais em cada caso. Adaptada de (RAKOV, 2003).

Estima-se que 90% (ou mais) das descargas atmosféricas entre nuvem e solo são descendentes negativas (RAKOV, 2003). Aproximadamente, o mesmo percentual foi

encontrado em medições no Brasil, por meio de medições diretas (VISACRO, 2005a). Os 10% restantes (ou menos) são dos demais tipos.

2.4 Mecanismo Básico de Estabelecimento das Descargas Atmosféricas

A seguir é feita uma descrição sucinta e simplificada do mecanismo de estabelecimento das descargas atmosféricas, com o intuito de se introduzir a participação do canal ascendente no processo. É utilizada, como exemplo, uma descarga nuvem-solo descendente negativa, já que esse é o tipo predominante das descargas nuvem-solo no planeta. O texto apresentado abaixo foi basicamente extraído e adaptado de (VISACRO, 2005a).

Uma nuvem carregada com cargas elétricas negativas em sua base, com centros de carga da ordem de dezenas de *Coulombs*, induz no solo abaixo de sua sombra um acúmulo de cargas de sinal contrário, com o estabelecimento de uma enorme diferença de potencial entre sua base e a superfície do solo. O valor da diferença de potencial pode ser muito elevado, de ordem superior a uma centena de *megavolts*, e o campo elétrico correspondente, muito intenso, sobretudo junto à base da nuvem e à superfície do solo.

Em algumas condições, o campo elétrico em determinadas regiões internas na base da nuvem atinge valores superiores à rigidez dielétrica do ar local, provocando disrupções preliminares, as quais determinam a ocorrência de uma descarga elétrica intensa. Esta constitui um canal ionizado de plasma, cujo comprimento se estende por várias dezenas de metros. Nesse canal de características condutoras, acumula-se uma grande quantidade de cargas negativas provenientes da região circunvizinha à nuvem, ionizada negativamente. O acúmulo de cargas resulta no aumento do campo elétrico nas extremidades do canal, o que tende a gerar descargas consecutivas semelhantes à inicial, e configura uma longa coluna de plasma. Tal coluna tende a ser impelida para baixo, na região externa à nuvem, como mostra a Figura 2.3.

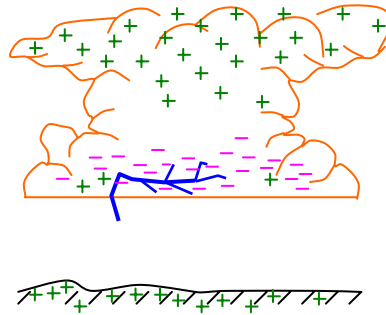


Figura 2.3 – O aparecimento do canal precursor de descarga na base da nuvem. Adaptada de (VISACRO, 2005a).

Novamente, ocorre o fluxo de cargas negativas provenientes da região ionizada na base da nuvem para o canal. Devido ao poder das pontas, o campo elétrico na extremidade inferior da coluna fica muito intenso e pode gerar uma nova descarga. Esta tem comprimento da ordem de dezenas de metros, e sua direção segue, aproximadamente, a orientação do campo elétrico local, cujo sentido prioritário aponta verticalmente do solo para a nuvem. No plasma do canal dessa nova descarga, repete-se o processo do acúmulo de cargas negativas providas pela região inferior da nuvem. Esse processo pode alimentar uma nova descarga com a mesma característica da anterior. Fica estabelecido o canal precursor de descarga descendente.

Se permanecerem as condições necessárias de intensidade de campo elétrico, esse canal pode evoluir por passos da ordem de 50 m, devido a novas descargas disruptivas consecutivas, a cada intervalo da ordem de 50 μ s. Em alguns casos, são constituídas ramificações nesse canal, como mostra a Figura 2.4.

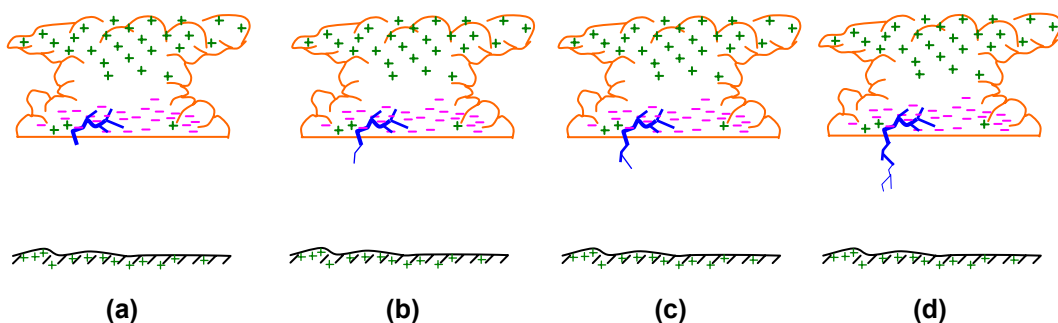


Figura 2.4 – A evolução por passos do canal precursor de descarga. Adaptada de (VISACRO, 2005a).

À medida que esse canal se aproxima do solo, na região abaixo dele, aumentam a densidade das cargas positivas induzidas na superfície do solo e o campo elétrico

associado. Quando o canal descendente alcança distâncias de poucas centenas de metros da superfície do solo, o campo elétrico nas extremidades de objetos no solo e em suas irregularidades torna-se tão intenso que pode dar origem a uma ou mais descargas elétricas ascendentes (poder das pontas). Estas podem ter extensão de várias dezenas de metros e seguem, aproximadamente, a direção do campo médio local, o qual aponta para cima. Num processo semelhante ao descrito anteriormente para a descarga descendente, o canal (ou canais) ascendente pode evoluir por passos por meio de descargas disruptivas consecutivas.

Caso o canal descendente e um dos canais ascendentes “concorrentes” atinjam uma distância crítica inferior a determinado limite (associado ao valor da carga acumulada no canal descendente), pode ocorrer uma descarga que os interliga por meio de um salto final. A Figura 2.5 ilustra tal situação.

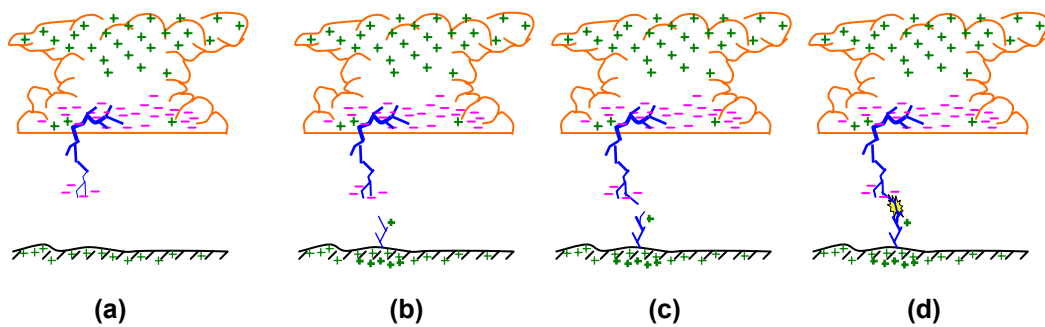


Figura 2.5 – O processo de conexão dos canais ascendente e descendente com o salto final. Adaptada de (VISACRO, 2005a).

No momento do encontro dos canais, a ponta do canal descendente é efetivamente conectada ao potencial do solo. Surge, então, a corrente de retorno, a qual basicamente neutraliza as cargas acumuladas no canal de descarga.

O processo descrito aqui pode ser enriquecido com uma série de considerações que não serão tratadas neste texto por já terem sido abordadas exaustivamente na literatura técnica. Entretanto, vale realçar o papel do canal ascendente no mecanismo de formação da descarga, o qual possui a maior relevância na engenharia de proteção: é ele que define o ponto exato da incidência. O canal descendente evolui sem influência do solo até alcançar uma determinada altura e, eventualmente, poderia se conectar ao solo numa grande área abaixo de sua extremidade. É o canal ascendente que se conecta ao descendente, definindo o ponto exato de incidência da descarga.

2.5 O Canal Ascendente

A compreensão do mecanismo de iniciação e propagação do canal ascendente é um dos problemas de maior interesse no entendimento do fenômeno Descarga Atmosférica e na proteção de estruturas elevadas e de partes dos sistemas elétricos.

Na literatura técnica não há investigações relevantes sobre canais ascendentes em descargas descendentes. Apesar da importância dos canais ascendentes na definição do ponto de incidência da descarga no solo, em descargas descendentes, esses canais têm comprimento reduzido (várias dezenas a poucas centenas de metros (VISACRO, 2005a)), quando comparados aos canais ascendentes de descargas ascendentes. O fato da corrente do canal ascendente não ser tão intensa³ e o curto intervalo de tempo de vida desse canal tornam seu estudo complicado. Outro agravante é a baixa probabilidade da incidência de uma descarga atmosférica em uma estrutura específica, instrumentada com medidores de corrente e de campo elétrico de alta resolução, bem como o número relativamente baixo de canais ascendentes induzidos⁴ por descargas atmosféricas próximas a essa estrutura, o que tornam escassas as medições diretas.

2.5.1 Aplicação do Modelo Eletrostático

No interesse de se reportarem aspectos relevantes associados ao surgimento e evolução dos canais ascendentes, descreve-se a seguir o processo de desenvolvimento desse canal no caso de uma descarga ascendente. Esta abordagem é feita pela carência na literatura de textos dedicados a tal assunto para descargas descendentes.

A abordagem é feita pela aplicação do modelo eletrostático de um canal condutivo em meio a um campo elétrico uniforme, perpendicular ao solo e com sentido solo-nuvem. A representação de um campo elétrico como este pode ser vista na Figura 2.6. A convenção adotada neste texto é que um campo elétrico como o descrito é negativo. Tal convenção pode ser escrita, matematicamente, como na equação (2.1).

³ Embora correntes de até 20 kA tenham sido registradas (WADA, 2002), nesta investigação, são adotados como padrão valores de cerca de 5 kA, conforme cita (MAZUR, 2006).

⁴ Na fase de concepção da investigação, acreditava-se em um elevado número de canais ascendentes induzidos na torre da estação em virtude de descargas atmosféricas próximas, mas uma conclusão decorrente da investigação é que esse número é relativamente baixo. Possivelmente, apenas descargas atmosféricas incidentes a 1 km de distância, ou menos, são capazes de induzir um canal ascendente que parte da estrutura.

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi \quad (2.1)$$

Na equação acima, \vec{E} é o campo elétrico e $-\vec{\nabla}\phi$, o gradiente do potencial atmosférico.

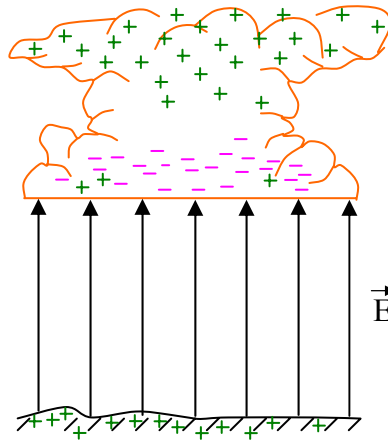


Figura 2.6 – Campo elétrico uniforme, perpendicular ao solo e com sentido solo-nuvem.

(KASEMIR, 1960) sugere que, pelo princípio da superposição, o potencial ϕ_C do canal condutivo é a soma do potencial atmosférico ϕ_N das cargas da nuvem com o potencial das cargas induzidas no canal ascendente, ϕ_Q , conforme a equação (2.2). O deslocamento de cargas no canal se dá somente por cargas negativas (elétrons livres) provenientes de ionizações por colisões no próprio canal.

$$\phi_C = \phi_N + \phi_Q \quad (2.2)$$

O canal condutivo ascendente tem o mesmo potencial do solo, ao qual está conectado. O valor assumido para tal potencial, como mostra a Figura 2.7(a), é constante e nulo em relação ao solo. Assim, $\phi_N = \phi_Q$. A carga por unidade de comprimento do canal é proporcional, mas de sinal oposto, ao potencial atmosférico, ϕ_N , ao mesmo nível, considerando que o diâmetro do canal permanece uniforme. Num campo E uniforme, a distribuição de cargas ao longo do canal é linear, com carga nula no nível do solo⁵. A Figura 2.7(b) ilustra tal distribuição, bem como o gradiente de potencial em função da altitude, além dos potenciais da nuvem e do canal.

⁵ Tal situação é aqui adotada a título de simplificação para uma melhor compreensão do processo. Porém, sabe-se que a distribuição de cargas não é linear ao longo do canal. Devido ao poder das pontas, há maior concentração de cargas na extremidade do canal. Além disso, considerar o diâmetro do canal constante é uma aproximação um pouco grosseira.

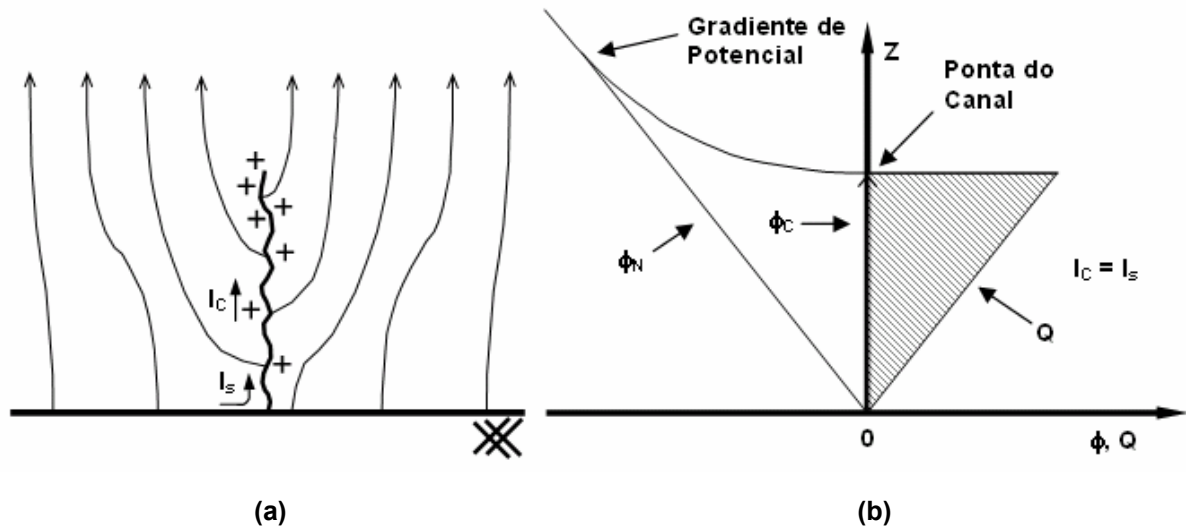


Figura 2.7 – Potencial da nuvem, corrente e distribuição de cargas no canal condutor conectado ao solo e imerso em um campo elétrico uniforme. (a) Distribuição de campo elétrico e corrente constante no canal ascendente vertical em expansão. (b) A distribuição de cargas induzidas (direita) é proporcional, mas é uma imagem invertida do potencial negativo da nuvem. Adaptada de (MAZUR, 2002).

Da ponta do canal, o potencial na direção de propagação rapidamente se aproxima do potencial da nuvem. O gradiente de potencial na ponta tende a prosseguir com as disrupções elétricas e, assim, a manter a propagação do canal ascendente.

Enquanto o canal se expande longitudinalmente, a variação nas cargas induzidas produz um fluxo de corrente. É assumido aqui que a velocidade de propagação do canal é pequena quando comparada com a velocidade da luz, tal que os efeitos eletromagnéticos possam ser desprezados. Por outro lado, o canal condutivo em expansão, imerso num campo elétrico E , comporta-se como uma “fonte de corrente”. (KASEMIR, 1960) mostrou que o potencial da nuvem, nesse caso, não é significativamente afetado pelo canal ascendente. Assim, pode-se assumir que a corrente I_s na base do canal é igual à corrente I_c em sua ponta, conforme a Figura 2.7. A propagação do canal e o fluxo de corrente cessam quando a ponta do canal atinge a região da nuvem onde o potencial é igual ao potencial do canal.

Assume-se que, a certa altitude, possivelmente uma região de máximo potencial da nuvem, a primeira camada ramificada se origina do canal principal, como mostra a Figura 2.8(a). Múltiplas ramificações irão, tais como um “guarda-chuva”, funcionar como um “sombreamento” para o campo elétrico do solo e, conseqüentemente, afetar a distribuição

de potencial nas proximidades do canal vertical, bem como a distribuição de cargas ao longo do canal. A redução do campo elétrico será notada no nível do solo. Contudo, a corrente na base do canal permanecerá a soma de todas as correntes ao longo dos ramos que se propagam. Mudanças nos perfis de carga do canal são mostradas na Figura 2.8(b).

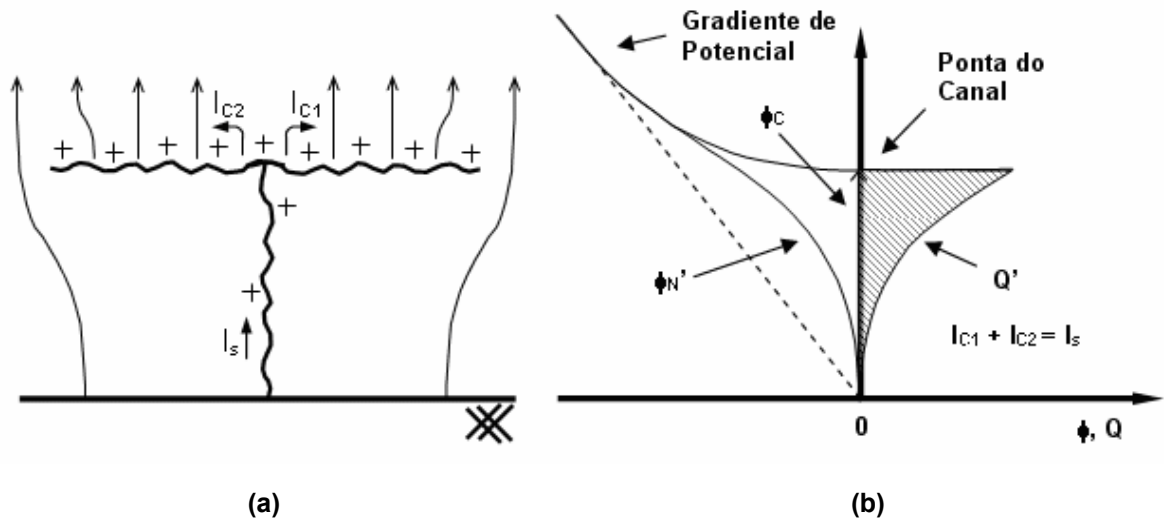


Figura 2.8 – Idem Figura 2.7, mas com o efeito do “sombreamento”. (a) Campo elétrico abaixo da ramificação do canal e corrente do solo igual à soma das correntes “geradas” pelas ramificações em expansão. (b) O efeito do “sombreamento” das ramificações horizontais diminui o potencial da nuvem na região logo abaixo. O canal vertical é ainda condutivo e seu potencial é nulo. A distribuição de cargas reflete numa mudança do perfil de potencial da nuvem. Adaptada de (MAZUR, 2002).

Assumindo agora uma segunda camada ramificada se originando acima da primeira, um aumento do “sombreamento” da camada ramificada inferior pela superior irá reduzir o potencial da nuvem nas proximidades dos ramos inferiores e irá cessar suas propagações, cessando ou mudando o sentido do fluxo de corrente nesses ramos. A Figura 2.9 ilustra a situação descrita.

Como resultados, (1) a soma das correntes das ramificações ascendentes superiores será a soma das correntes no canal principal (corrente vinda do solo) e nos ramos inferiores, $2I_C = I_s + 2I_R$, sendo I_R a corrente no ramo inferior; (2) a corrente I_R diminui e até mesmo muda de direção; e (3) a corrente vinda do solo, I_s , diminui. O avanço da ramificação superior continua enquanto as disrupções nas pontas das ramificações inferiores não cessarem (MAZUR, 2002).

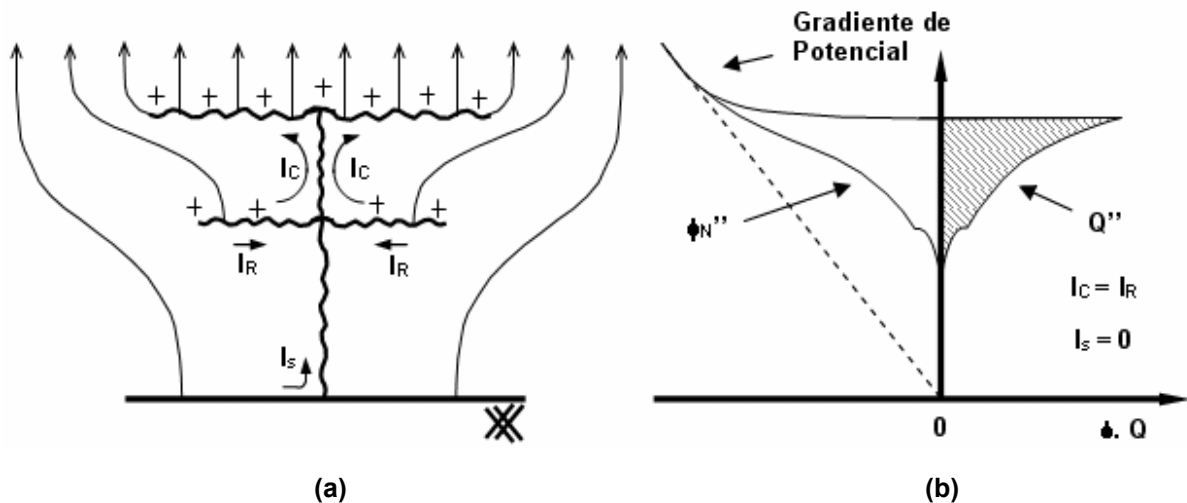


Figura 2.9 – Idem Figura 2.8, mas com uma ramificação secundária acima da primeira. (a) Corrente I_s é reduzida ao estágio de corte, como um resultado da distribuição de corrente (gerada pelo desenvolvimento da ramificação superior) entre as ramificações inferiores suprimidas e o canal que vem do solo. (b) Potencial da nuvem e distribuição de cargas no momento da corrente de corte no canal vertical conectado ao solo. Adaptada de (MAZUR, 2002).

Esse processo poderia ocasionar um corte na corrente vinda do canal principal ao ponto de ramificação. I_s seria igual a zero ou tão pequena que a condutividade do canal poderia não ser mantida. Isso ocorreria bem antes das ramificações superiores alcançarem a região cujo potencial é igual ao do solo. Com adicionais desenvolvimento e ramificação das pontas do canal, uma corrente de corte iria se propagar ao longo do canal a partir do primeiro ponto de ramificação. As contínuas rupturas na ponta do canal operam razoavelmente independentes do que acontece na base do canal ascendente. O fenômeno da corrente de corte é responsável por caracterizar o desenvolvimento de quaisquer ramificações no canal (MAZUR, 1993).

2.5.2 Formas de Surgimento do Canal Ascendente

Canais ascendentes em descargas descendentes surgem quando o campo elétrico ao nível do solo ou em uma estrutura elevada aterrada atinge o nível da rigidez dielétrica do ar e o campo médio em um percurso seja superior a 0,5 a 0,6 MV/m, em função da elevação do campo causada pela aproximação do canal descendente.

Para um canal ascendente de uma descarga ascendente que parte de uma estrutura fixa, o campo elétrico necessário para seu surgimento é provavelmente produzido por uma descarga entre nuvens posicionadas verticalmente sobre essa estrutura ou por

uma descarga em suas vizinhanças. Mas ele pode ser também iniciado na presença de campos elétricos estáticos no caso de estruturas muito elevadas (UMAN, 1987). Além disso, pode ser iniciado quando condutores aterrados com comprimentos da ordem de 100 m, para fora do solo, são rapidamente introduzidos em campos elétricos entre nuvens carregadas, produzindo uma forma de descarga artificial (UMAN, 1988).

2.5.3 Parâmetros Físicos do Canal Ascendente

Muito se encontra na literatura a respeito de canais ascendentes de (1) descargas ascendentes iniciadas em estruturas elevadas e de (2) descargas artificiais induzidas por foguetes. Muitos trabalhos apresentam formas de onda de corrente e de campo elétrico desse tipo de canal e aspectos relacionados à sua luminosidade. A seguir é feita uma apresentação, a partir de bons trabalhos existentes na literatura, dos parâmetros de maior interesse em Engenharia Elétrica.

Canais ascendentes de descargas ascendentes são geralmente positivos e apresentam uma luminosidade modulada contínua tais quais os canais descendentes positivos. Já os canais ascendentes carregados negativamente apresentam um comportamento por passos similares aos dos canais descendentes negativos (UMAN, 1988).

Neste item, as referências a “canal ascendente” são feitas especificamente em relação a uma descarga ascendente.

São vários os estudos sobre a velocidade de propagação de canais ascendentes. (WANG, 1999) encontrou um valor médio de, aproximadamente, 2×10^7 m/s. Tal valor é semelhante àqueles observados para canais precursores de descargas descendentes, cujo valor médio obtido foi de 3 a 4×10^7 m/s, na mesma referência.

Em estudos realizados numa chaminé de 200 m de altura no Japão, durante o inverno, o canal ascendente positivo apresentou velocidade média de $3,6 \times 10^5$ m/s sem um apreciável movimento por passos (WADA, 2003).

Com relação ao canal ascendente negativo, uma velocidade média de 6×10^6 m/s, com velocidade média para cada passo de 3×10^7 m/s, foi obtida por (WADA, 2004). Ele se propagou por passos mais fortes, como um canal precursor descendente de uma nuvem de tempestade de verão, no que se refere aos parâmetros velocidade média de propagação, intervalo de tempo entre passos e tamanho do passo. As correntes medidas, porém, são

maiores que as estimadas para os canais descendentes negativos. Interessante se ressaltar é que o tamanho dos passos, a velocidade e os picos de corrente aumentam à medida que o canal se desenvolve em direção à nuvem.

Frente ao comprimento do canal ascendente, Yokoyama *et al.* (1990) e Orville e Idone (1982), citados por (THOTTAPPILLIL, 2004), obtiveram, por meio de imagens óticas, comprimentos de canais ascendentes da ordem de 20 a 150 m, para as primeiras descargas de retorno, e velocidade média de propagação da ordem de 10^5 m/s. Experimentos com descargas induzidas mostram um comprimento de canal ascendente bem menor, da ordem de poucos metros a 20 m, mas apresentam grandes velocidades, da ordem de 10^7 m/s, segundo Idone (1990).

No que tange ao comprimento dos passos, o do canal ascendente positivo parece ser, em uma primeira análise, proporcional à intensidade da corrente de retorno e ao campo elétrico do canal precursor. Tal valor foi medido em descargas artificiais induzidas clássicas⁶. Passos ascendentes de comprimentos variando de 7 a 11 m foram medidos para uma corrente de retorno de 21 kA e campo elétrico de 56 kV/m. Para uma corrente de 12 kA e campo elétrico de 43 kV/m, foram medidos passos de 4 a 7 m. Em ambos os casos, o campo elétrico foi medido a 30 m da base de lançamento do foguete (WANG, 1999).

Segundo (WADA, 2002), no verão japonês, descargas atmosféricas são quase todas iniciadas por canais descendentes, mas, no inverno, descargas ascendentes são freqüentemente observadas em estruturas elevadas. Quando a ponta do canal ascendente negativo se propaga por passos, uma corrente que vai de 700 A a 20 kA flui pelo canal.

Há que se levar em consideração que as descargas produzidas nas tempestades de inverno na costa do Japão exibem certas características que não são observadas nas tempestades de verão deste país e em outras estações de outras localidades geográficas. Porém, no tocante a parâmetros de canais ascendentes, estes estão de acordo com o que é encontrado na literatura de um modo geral (RAKOV, 2003).

Canais ascendentes positivos freqüentemente entram na nuvem, produzindo no solo correntes contínuas que vão de 100 a 1000 A. Contudo, na metade dos casos, aproximadamente, a fase da corrente contínua é seguida por uma seqüência de canais

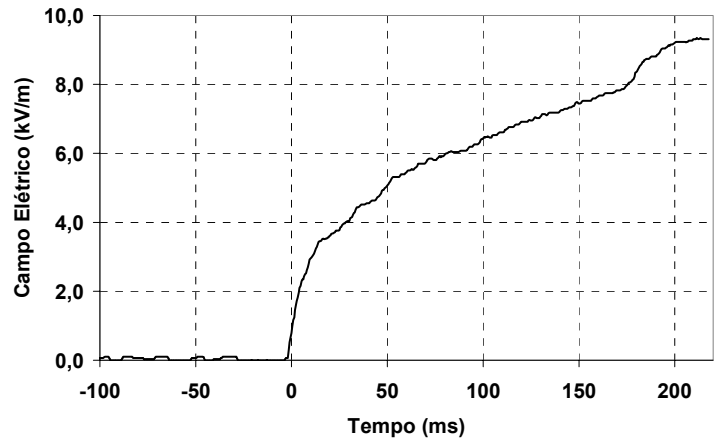
⁶ Maiores detalhes sobre essa técnica em (LALANDE, 1998) e (RAKOV, 2003).

precursores e descargas de retorno, seqüência similar ao que ocorre após a primeira descarga de retorno nas descargas nuvem-solo iniciadas por canais descendentes negativos. Algumas vezes, longos canais ascendentes negativos se fecham com canais descendentes positivos (UMAN, 1994).

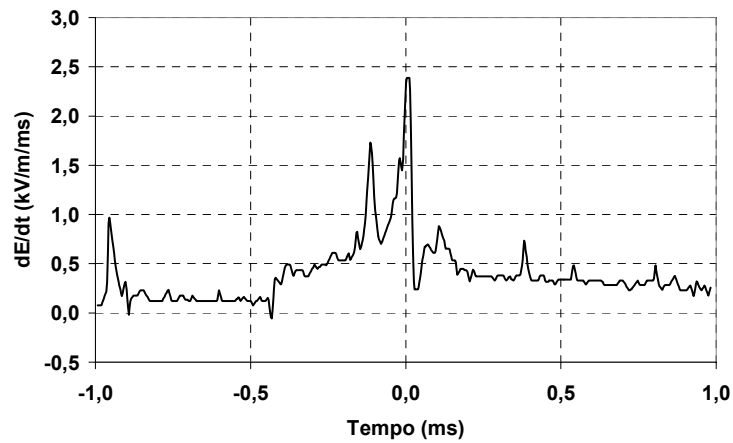
A Figura 2.10 apresenta registros de alguns parâmetros de um canal ascendente natural, de uma descarga descendente, surgido nas redondezas de uma torre instrumentada na Flórida, EUA. (MAZUR, 2006). No primeiro registro (a), está a medição da variação lenta do campo elétrico, dE , obtida por meio de uma “antena lenta”, cuja constante de tempo é da ordem de algumas centenas de milissegundos. O campo elétrico ao nível do solo atingiu aproximadamente 9,5 kV/m. Aparentemente, neste caso, não houve corrente de retorno, uma vez que o sistema de detecção e localização de raios local não apresenta registro de descarga naquele instante. Em (b), observa-se a variação rápida do campo elétrico, dE/dt , registrada por uma “antena rápida”, com constante de tempo de 10 μ s. A Figura 2.10(c), por sua vez, mostra a corrente induzida pelo canal ascendente em questão na torre instrumentada.

Ainda nessa figura, observa-se a maior variação do campo elétrico, ou seja, os pulsos de corrente na torre (c) e dE/dt (b) mais intensos, no estágio inicial do canal ascendente. Este momento pode ser caracterizado como aquele no qual a variação lenta do campo elétrico (dE) assume valor diferente de zero, desconsiderando-se, naturalmente, ruídos e demais interferências na medição. O tempo zero dos gráficos da Figura 2.10 é o início da propagação do canal ascendente.

É interessante comentar-se a respeito das descargas artificiais induzidas por foguetes. Seqüências canal-descarga de retorno em descargas artificiais obtidas pela técnica de foguetes conectados a fios são similares em muitos (mas não todos) aspectos às descargas naturais descendentes negativas subsequêntes. Os processos iniciais nas descargas artificiais induzidas são similares àqueles das descargas iniciadas em objetos no solo (descargas ascendentes) (RAKOV, 2003). Desta forma, muito do que é observado nos estudos com descargas artificiais é aplicado a este tipo de descargas.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.10 – Formas de ondas de variações lenta (a) e rápida (b) de campo elétrico e corrente induzida (c) por um canal ascendente natural em uma torre instrumentada na Flórida, EUA.

Adaptada de (MAZUR, 2006).

As descargas artificiais induzidas em altitude, conforme a Figura 2.11, reproduzem o que ocorre antes da primeira descarga de retorno em uma descarga natural, com a constituição de um canal bidirecional a partir do seu condutor não aterrado.

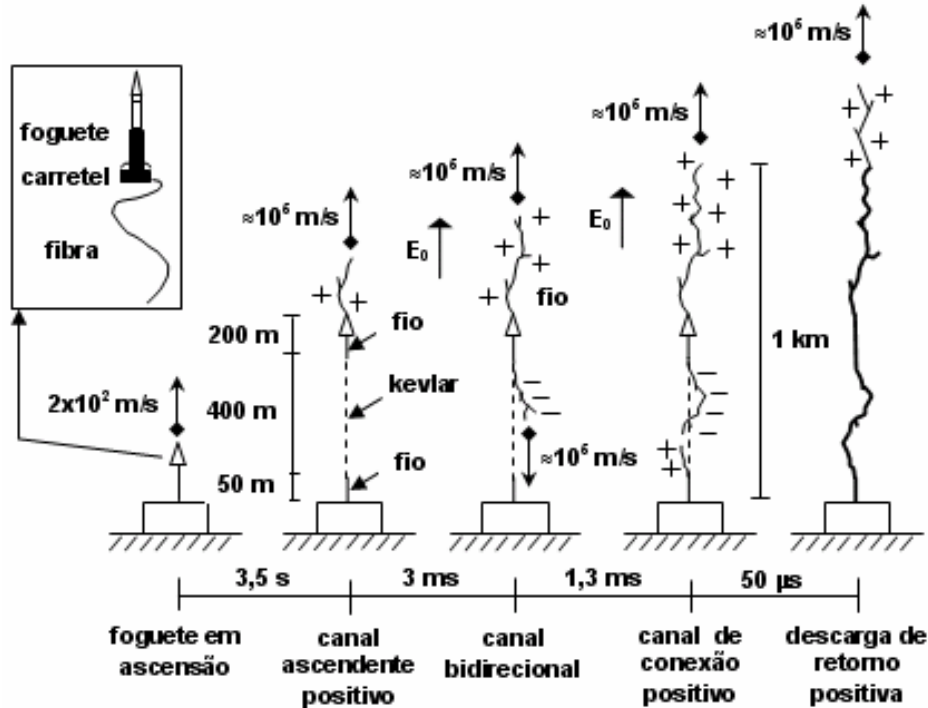


Figura 2.11 – Seqüência de eventos que ocorrem durante a formação da primeira descarga de retorno em uma descarga induzida em altitude. Adaptada de (LALANDE, 1998).

No fio aterrado de comprimento constante (50 m), a variação do campo elétrico produzida pelo canal descendente negativo que se aproxima dá origem ao surgimento e à propagação do canal ascendente positivo.

A Figura 2.12 mostra um exemplo de corrente, medida no solo, associada a um canal desse tipo que se propaga ascendentemente. No instante do início do canal ascendente, o campo elétrico no nível do solo alcança quase 10 kV/m, como mostra a Figura 2.13.

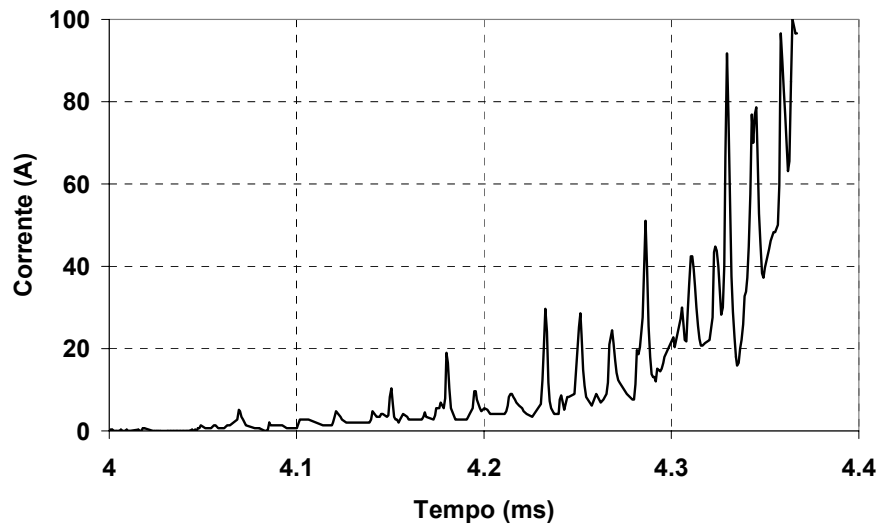


Figura 2.12 – Exemplo de corrente de canal ascendente, em propagação estável, de uma descarga artificial induzida em altitude. Adaptada de (LALANDE, 1998).

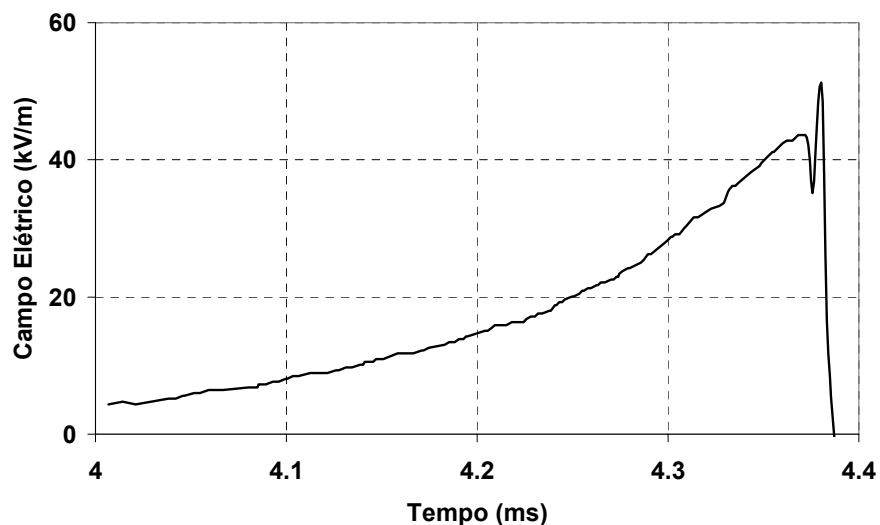


Figura 2.13 – Variação do campo elétrico, ao nível do solo, medido a 50 m de distância do canal ascendente da Figura 2.12. Adaptada de (LALANDE, 1998).

2.6 Perfis Típicos do Campo Elétrico Gerado por Descargas Atmosféricas

Interessa, na perspectiva acadêmica, considerar-se também o perfil do campo elétrico vertical gerado pela corrente de retorno de descargas próximas. Para situar o leitor, como será visto no próximo capítulo, uma boa definição para “descarga próxima”, no

contexto desta dissertação, seria aquela descarga incidente em um raio de até 20 km do ponto de medição, no caso, a Estação do Morro do Cachimbo.

A Figura 2.14 apresenta formas de onda e amplitudes típicas do campo elétrico vertical da primeira descarga de retorno e da subsequente em função da distância. Tais formas de onda são a principal referência quando o assunto são medições de campo elétrico e magnético associados às descargas atmosféricas.

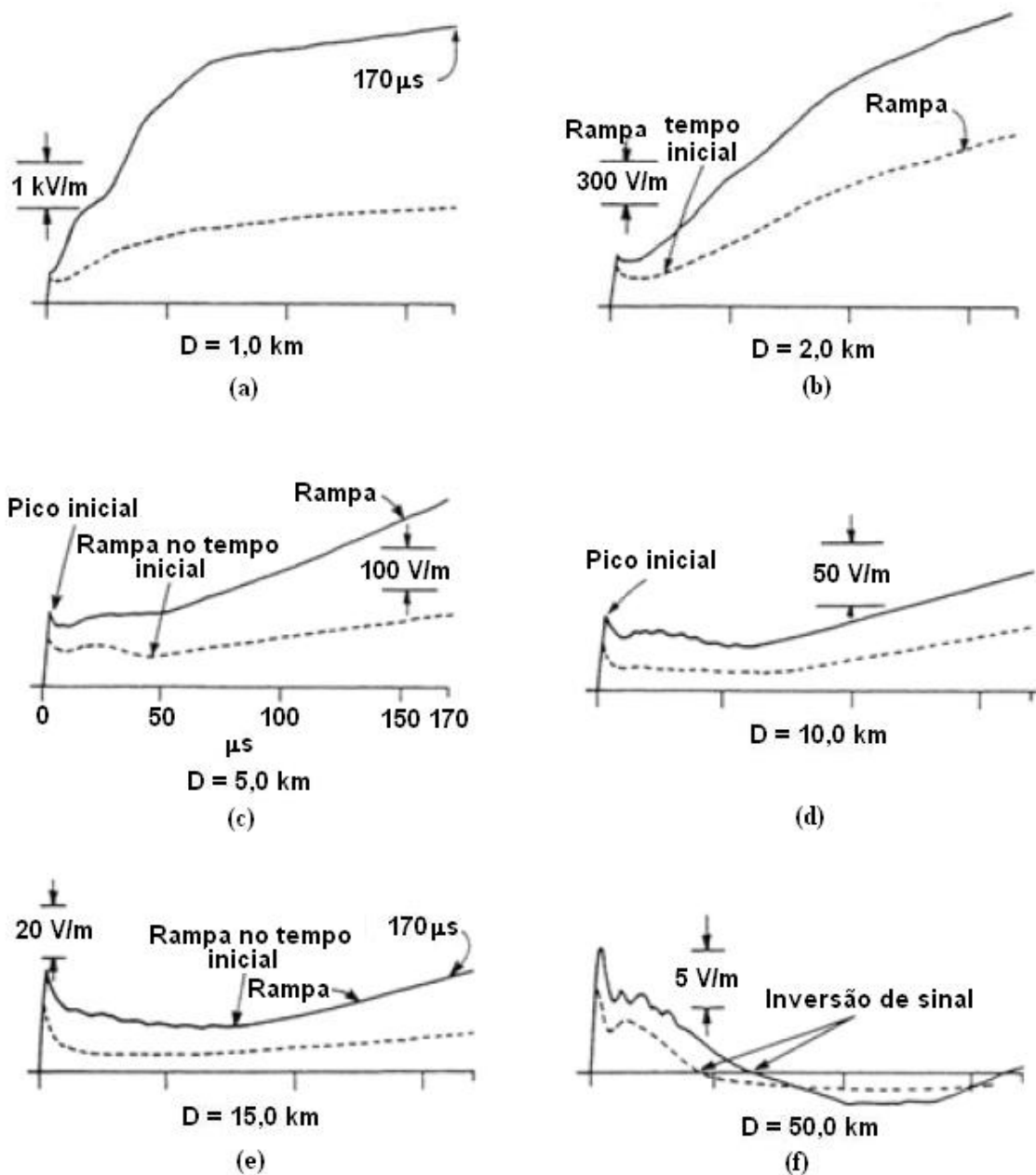


Figura 2.14 – Formas de ondas típicas do campo elétrico vertical da primeira descarga de retorno (linha sólida) e da subsequente (linha pontilhada) às distâncias de 1 (a), 2 (b), 5 (c), 10 (d), 15 (e) e 50 (f) km. Adaptada de (LIN, 1979).

Os campos elétricos gerados por descargas atmosféricas incidentes a poucos quilômetros de distância são, predominantemente, após as primeiras dezenas de microssegundos, efeitos da componente eletrostática do campo elétrico total, sendo esta a única componente diferente de zero após o cessar da corrente pelo(s) canal(is). Para distâncias iguais ou superiores a 50 km, o campo elétrico é composto basicamente da componente irradiada do campo total (RAKOV, 2001).

Os picos iniciais nas curvas apresentadas na Figura 2.14 são características dominantes de uma forma de onda de campo elétrico de uma descarga com distância superior a 10 km. São também características típicas de descargas a poucos quilômetros de distância até, aproximadamente, 10 km e, com alguma dificuldade, podem ser identificados em descargas atmosféricas incidentes em pontos a menos de 1 km.

Esses picos iniciais são devidos à componente irradiada do campo total e, conseqüentemente, têm sua intensidade diminuída com o inverso da distância na ausência de efeitos de propagação significativos (LIN, 1979). Dessa forma, o pico inicial do campo medido e produzido por diferentes descargas a distâncias conhecidas pode ser normalizado por comparação, por exemplo, com 100 km, multiplicando-se o pico do campo medido por $r/10^5$, sendo r a distância do ponto de incidência da descarga atmosférica, em metros (RAKOV, 2001).

Uma medição de campo elétrico obtida na Catalunha, Espanha, é mostrada na Figura 2.15. Nela, em aproximadamente -40 ms, a variação do campo elétrico medido se dá em função da propagação do canal precursor de descarga (MONTANYÀ, 2004). Em 0 ms, há a descarga de retorno, identificada pela variação brusca na curva da figura.

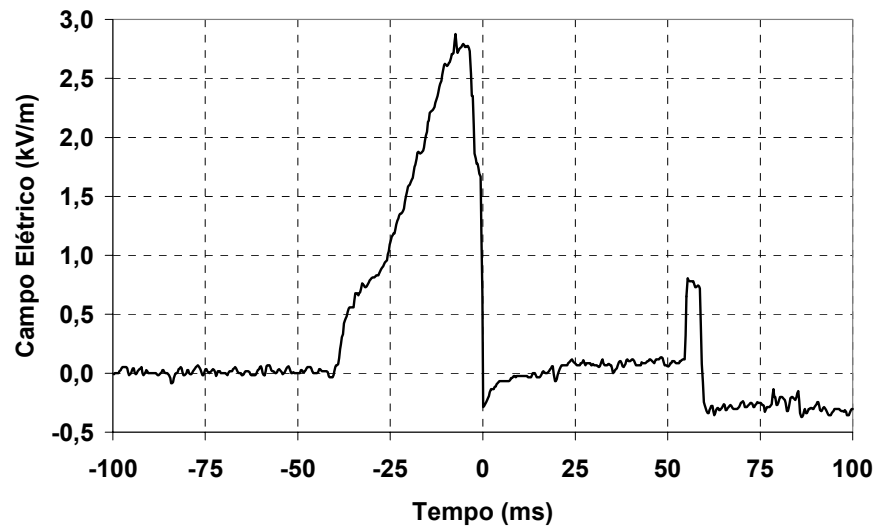
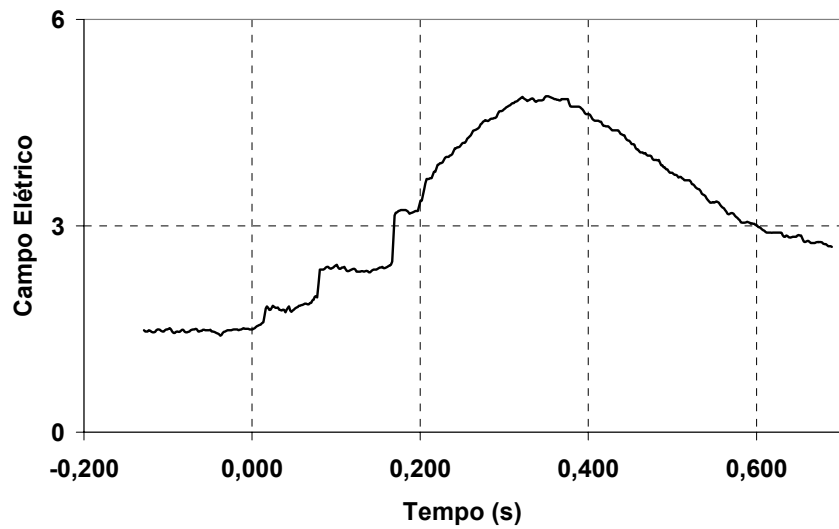


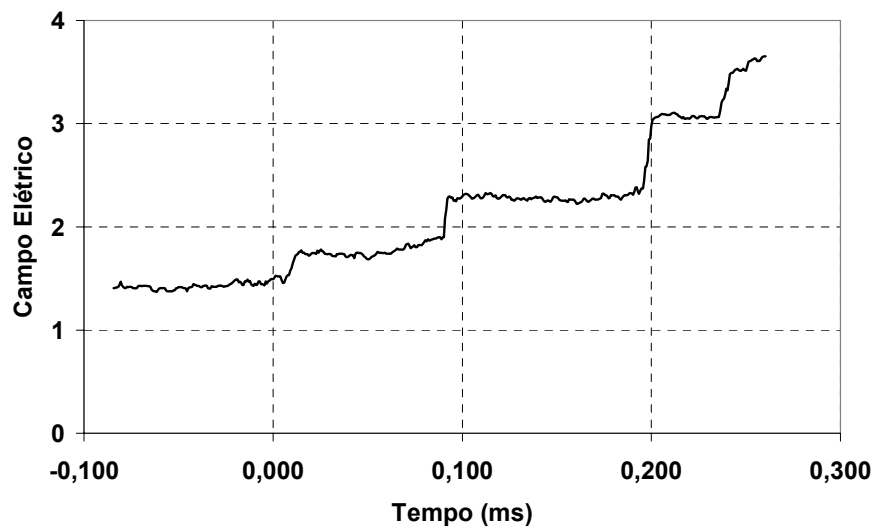
Figura 2.15 – Registro de campo elétrico obtido na Catalunha, Espanha. Adaptada de (MONTANYÀ, 2004).

Medições de campo elétrico similares às apresentadas no Capítulo 4 desta dissertação são ilustradas na Figura 2.16. Esses registros foram obtidos em São José dos Campos (45.864° W, e 23.215° S), em uma altitude de 630 m. Como sensor para a medição, foi utilizada uma antena achatada e circular, com uma seção de área igual 0,13 m². A constante de tempo desta “antena lenta” era de 1 s.

Com esses exemplos de formas de onda, encerra-se o capítulo. Uma discussão dos pontos de maior interesse é feita nos capítulos seguintes. O próximo capítulo apresenta o Sistema de Medição alvo desta dissertação.



(a)



(b)

Figura 2.16 – Registro da variação lenta do campo elétrico, medido em São José dos Campos, em função de uma descarga de retorno e três subsequentes que incidiram em um raio entre 15 e 21 km do ponto de medição. Adaptada de (SABA, 2004).

3 O Sistema de Medição

3.1 Introdução

Este capítulo apresenta o Sistema de Medição desenvolvido para medição dos parâmetros de interesse na investigação de canais ascendentes. O sistema foi idealizado para possibilitar a aquisição de dados sobre as seguintes grandezas: intensidade de campo elétrico e sua variação no tempo, a corrente elétrica no condutor de descida da torre da Estação do Morro do Cachimbo e a elevação de potencial gerada pelo fluxo desta corrente no aterramento da torre.

Inicialmente, no capítulo, é caracterizado o ambiente da Estação do Morro do Cachimbo, local de instalação do sistema. Em seguida, realçam-se os aspectos de concepção do sistema, para um posterior detalhamento das suas características, incluindo a descrição dos equipamentos utilizados, forma de funcionamento, grandezas medidas, potencialidades e limitações.

3.2 A Estação de Pesquisas de Descargas Atmosféricas do Morro do Cachimbo

A Estação do Morro do Cachimbo, pioneira na medição de correntes de descargas atmosféricas na América Latina, teve sua construção concluída em 1985. Situa-se a 15 km ao sul de Belo Horizonte, na Serra do Morro do Cachimbo, a 1.430 m de altitude (43°98' W, 20°01' S). Detalhes complementares sobre a estação são encontrados na referência (VISACRO, 2004a).

A estação possui uma torre (mastro) de 60 m de altura que é responsável pela captação de descargas atmosféricas que eventualmente ocorram em suas proximidades. É importante salientar que a torre se encontra posicionada no topo do morro, estando, assim, a uma altura mínima superior a 200 m dos pontos altos dos terrenos circunvizinhos. O local da estação, bem como a altura da torre, foram escolhidos de tal forma a propiciar uma altura efetiva que resultasse em uma incidência de 5 a 8 descargas por ano (SCHROEDER, 2001), o que é um número razoável de incidências quando comparado a outras estruturas em outras partes do planeta. A Figura 3.1 é uma foto da estação tirada de uma distância de cerca de 600 m.



Figura 3.1 – Estação do Morro do Cachimbo. Adaptada de (VISACRO, 2005a).

3.2.1 A Torre

A torre da estação, melhor visualizada na Figura 3.2, é sustentada por cabos (estais) isolantes, de tal forma que a corrente de descarga ou de canais ascendentes flua

estritamente por sua estrutura metálica, ou seja, pelo seu condutor de descida. Admite-se um raio de atração de 350 m (CEMIG, 1985).



Figura 3.2 – Vista da torre e do abrigo da estação.

A posição da torre no alto do morro a habilita à incidência tanto de descargas descendentes quanto de ascendentes¹. Não foi definida para essa torre o que alguns pesquisadores chamam de altura efetiva, parâmetro da estrutura que indica a influência da sua altura no tipo de descarga que nela incide.

3.2.2 O Abrigo Principal

O abrigo principal, construção maior apresentada também na Figura 3.2, é uma sala totalmente blindada para evitar interferência eletromagnética externa que poderia afetar o funcionamento de alguns componentes sensíveis do sistema.

Há no abrigo uma barra de aterramento central, a qual evita diferenças de potencial entre equipamentos e garante um funcionamento mais adequado do sistema, como será visto mais adiante.

¹ Assume-se na literatura que estruturas com alturas inferiores a 100 m experimentam, na grande maioria dos casos, descargas descendentes, enquanto que estruturas com alturas superiores a 500 m, descargas ascendentes (RAKOV, 2003).

3.2.3 O Aterramento

A Figura 3.3 mostra, em perspectiva, o sistema de aterramento da Estação do Morro do Cachimbo e dá uma idéia de suas dimensões.

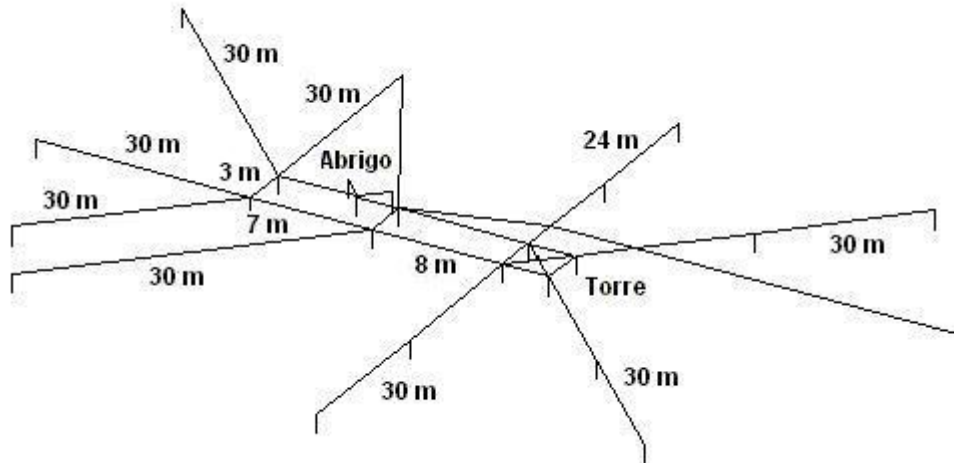


Figura 3.3 – Aterramento da Estação do Morro do Cachimbo. Adaptada de (SCHROEDER, 2002).

Medições de resistência de aterramento, realizadas em fevereiro de 2005 apontaram um valor de 28Ω para esta grandeza. Ensaio com injeção de correntes impulsivas confirmaram a expectativa de uma impedância de aterramento desta ordem (VISACRO, 2005b).

3.3 O Sistema de Medição

A seguir, é feita uma análise detalhada do Sistema de Medição.

3.3.1 Elementos do Sistema

A Figura 3.4 mostra o esquema do Sistema de Medição e dá uma idéia do posicionamento dos seus componentes na estação.

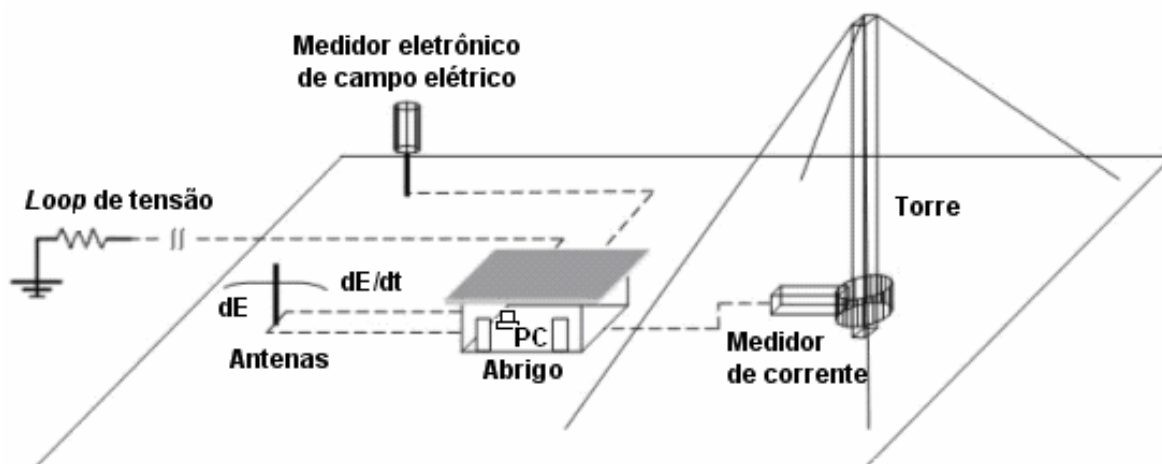


Figura 3.4 – Esquema do Sistema de Medição e posicionamento dos instrumentos na estação.

O Sistema de Medição é composto por elementos responsáveis pela medição das grandezas (sensores) e por elementos auxiliares destinados à aquisição, registro e processamento de dados. Os sensores consistem em duas antenas para medição da variação lenta do campo elétrico (dE) e de sua variação rápida (dE/dt) ao nível do solo, no medidor eletrônico de campo elétrico (*field mill*), no medidor de corrente do tipo alicate e no resistor série do *loop* de tensão que forma um divisor de tensão para amostragem da elevação de potencial no aterramento da torre. Como elementos auxiliares, há uma caixa de aquisição metálica na qual são conectados os cabos provenientes dos sensores, as placas de aquisição de dados, o microcomputador onde estas estão conectadas, o *software* que opera o sistema e o GPS², além dos cabos que fazem as devidas conexões. A seguir, comentam-se os aspectos mais relevantes dos elementos auxiliares. Os sensores são detalhados mais adiante.

Todos os componentes auxiliares estão colocados internamente ao abrigo da estação. Os sensores estão distribuídos em pontos distantes do abrigo principal na área interna da estação, exceto o divisor resistivo do *loop* de tensão, posicionado a cerca de 150 m da cerca externa da estação. Esta posição mais afastada foi necessária para se alcançar o terra remoto, ponto afastado do aterramento da estação, não influenciado pela elevação de potencial deste causado pelo eventual fluxo de corrente pelo mesmo (VISACRO, 2005b, 2007). A disposição dos sensores implica longas extensões de cabos, necessárias para conduzir os sinais detectados até os componentes auxiliares de aquisição e registro de dados, posicionados no abrigo principal.

² Sigla que significa *Global Positioning System*, ou seja, sistema de posicionamento global que utiliza satélites.

Tais cabos, todos do tipo coaxial RG58, ao entrarem no abrigo principal, são conectados à caixa de aquisição. Ela é responsável por receber os sinais dos sensores e repassá-los às placas de aquisição. A caixa recebe os sinais provenientes das duas antenas, do medidor de corrente, do divisor de tensão do *loop* e dos medidores eletrônicos de campo elétrico. (Mais adiante será explicado o porquê de mais de um medidor eletrônico.) No caso dos sinais provenientes das antenas, é a caixa que, através de elementos de circuito em sua entrada, determina se será realizada uma medição de variação lenta de campo elétrico ou de variação rápida (mais detalhes adiante). Caso seja a primeira opção, o sinal passa, ainda na caixa, por um *buffer*³ que garante mais qualidade ao sinal de campo elétrico medido. A caixa também tem a função de fornecer alimentação ao GPS, por meio de um conversor DC/DC⁴, que alimenta o circuito integrado onde está o amplificador operacional que constitui o *buffer*. A Figura 3.5 mostra a caixa de aquisição de dados (a) e seu interior (b). Os detalhes de ligação em seu interior estão indicados no Apêndice, ao final do texto.

Uma outra propriedade da caixa são os botões de teste. Pressionando-os, uma tensão de +5 V é aplicada nas entradas para medições de variação lenta (dE) e rápida (dE/dt) do campo elétrico, como uma forma de simulação. A partir do registro gerado, pode-se perceber se algumas propriedades do sistema estão funcionando corretamente, ou seja, se ele dispara, gerando registros dos sinais conhecidos que estão sendo aplicados, e se as constantes de tempo envolvidas nas medições de campo elétrico estão corretas.

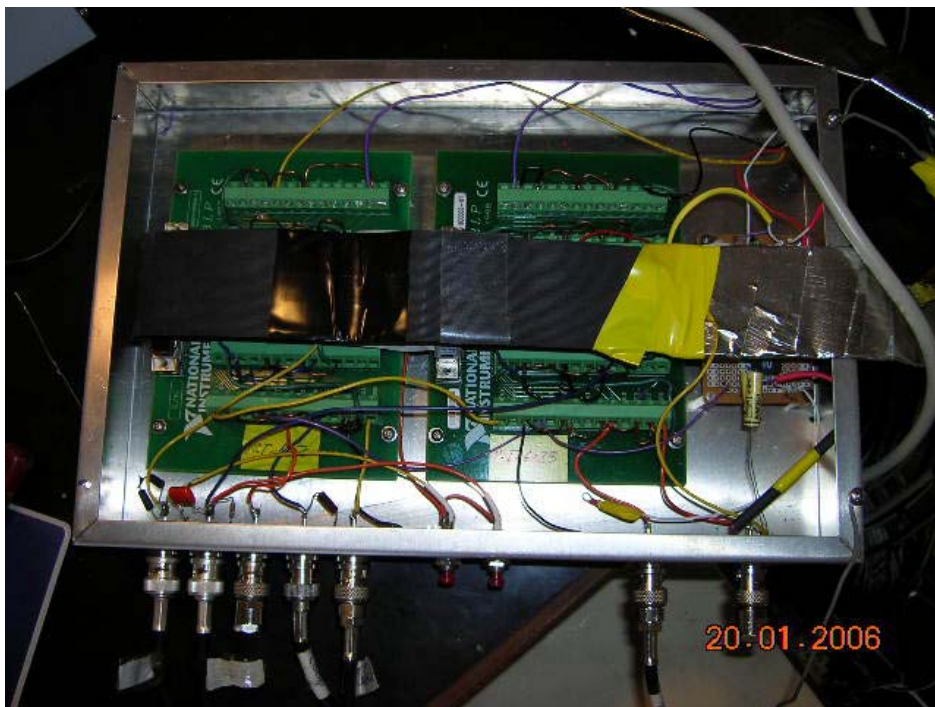
Dentro da caixa se encontram também os cartões que fazem as corretas conexões com as placas de aquisição de dados. Nesses cartões são aplicados os sinais provenientes dos sensores e são aterradas todas as entradas de canais não utilizados, para se evitarem ruídos que prejudiquem a qualidade do sinal. Igualmente aterrada é a carcaça metálica da caixa, feita com o objetivo de proteger e blindar o seu interior, visto que são críticos os problemas de interferência, ruídos e tensões induzidas nas entradas dos canais, já que se lida com fenômenos de alta frequência.

³ Trata-se de um circuito integrado OPA277. Atua no aumento da relação sinal/ruído e na diminuição da impedância equivalente vista pela placa de aquisição de dados.

⁴ Trata-se de um circuito integrado NMH0515D que, partindo da tensão de entrada de +5 V proveniente da fonte do microcomputador, fornece +15 V na sua saída.



(a)



(b)

Figura 3.5 – Caixa de aquisição. (a) Vista frontal. (b) Vista superior da caixa aberta.

Com relação à aquisição de dados propriamente dita, ela é feita por meio de duas placas da *National Instruments*. Uma delas é denominada placa rápida, e a outra, placa

lenta⁵. Por meio do *software* desenvolvido especialmente para operar o sistema de medição, é possível se ajustarem o nível do *trigger*⁶, o tamanho do arquivo gerado, ou seja, o número de pontos do registro, o número de pontos antes e depois do *trigger* e, por fim, a taxa de aquisição de cada uma das placas, isto é, o número de amostras por unidade de tempo. A Figura 3.6 mostra o diagrama de ligação do sistema de medição.

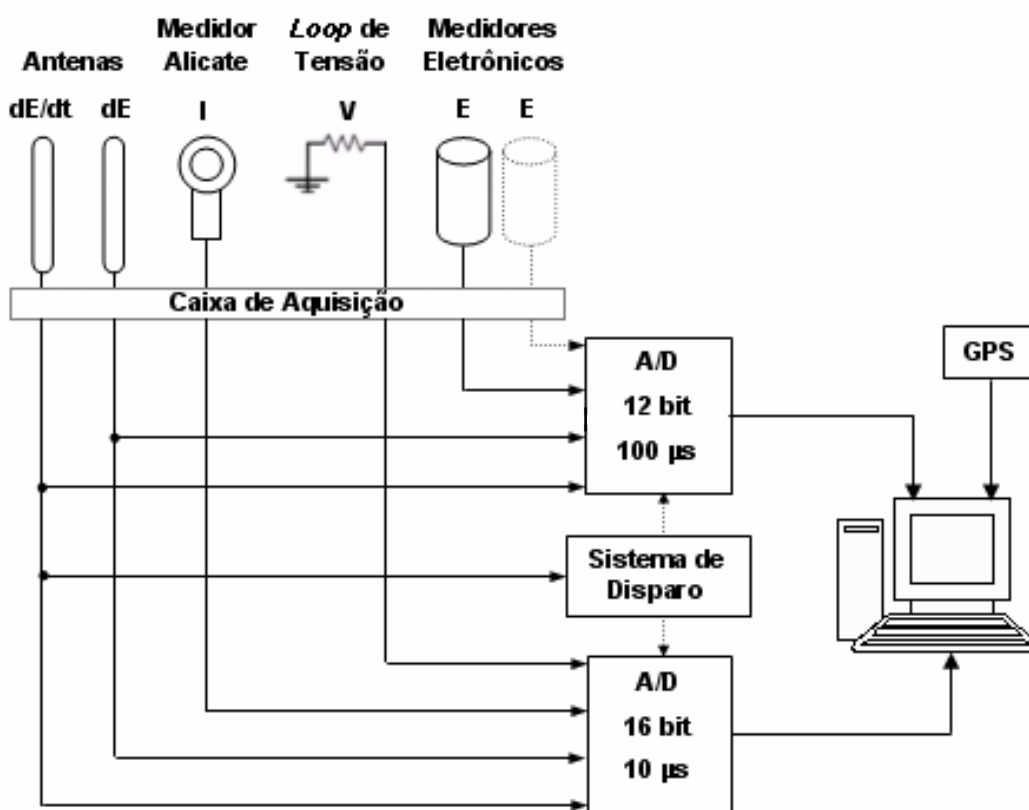


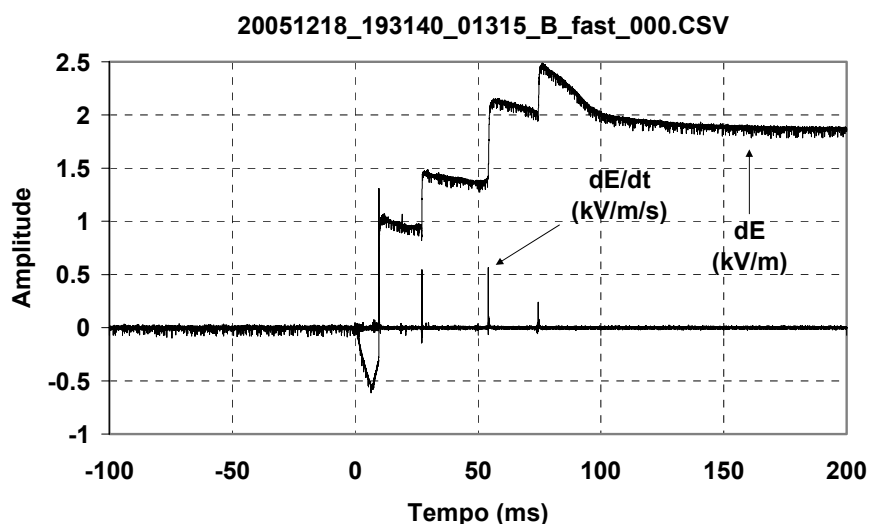
Figura 3.6 – Diagrama de ligação do sistema de medição.

A placa rápida é uma NI 6250, com um conversor analógico-digital de 16 bits. Opera com uma taxa de amostragem de 100 kHz (10 μs), podendo chegar a 1 MHz. Gera arquivos de 30 mil pontos, sendo 10 mil antes do *trigger* e 20 mil, depois. São utilizados os canais zero, um, dois, três e quatro, cada um correspondendo a, respectivamente, variação rápida do campo elétrico, variação lenta do campo elétrico, reservado⁷, tensão no aterramento da torre e corrente no condutor de descida da mesma. A Figura 3.7 apresenta curvas de sinais registrados por essa placa.

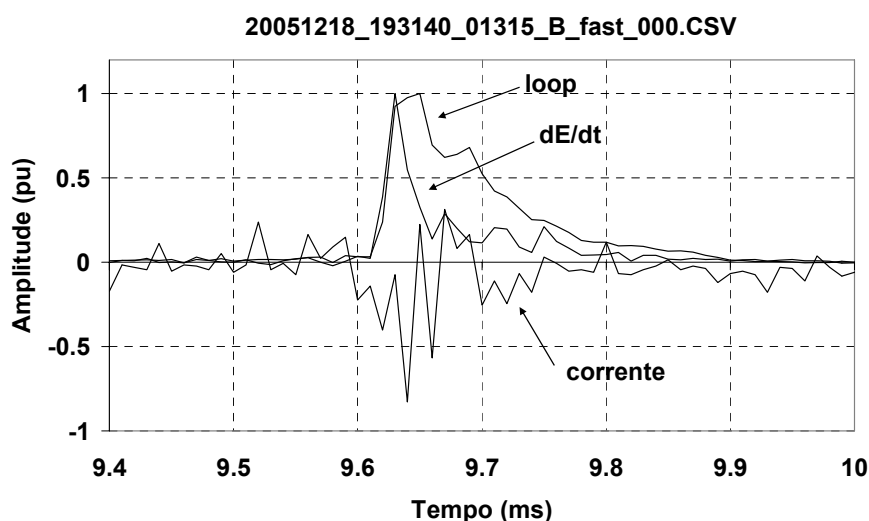
⁵ Tradução dos termos *fast card* e *slow card*, os mais empregados na literatura.

⁶ Essa expressão é utilizada com o mesmo significado de “nível de disparo” ou “tensão de limiar”.

⁷ O canal 2 é reservado para se acrescentar alguma medição de interesse que possa surgir.



(a)



(b)

Figura 3.7 – Exemplo de registro da placa rápida.

A placa lenta, por sua vez, é uma NI 6023E, com um conversor analógico-digital de 12 bits. Opera com uma taxa de amostragem de 10 kHz (100 μ s), podendo chegar a 200 kHz. Gera também arquivos de 30 mil pontos, sendo 10 mil antes do *trigger* e 20 mil, depois. São utilizados os canais zero, um, dois, três e quatro, cada um correspondendo a, respectivamente, variação rápida de campo elétrico, variação lenta de campo elétrico, reservado⁸, primeiro medidor eletrônico de campo elétrico (*field mill*) e segundo medidor

⁸ O canal 2 aqui é também reservado pelo mesmo motivo que na placa rápida.

eletrônico de campo elétrico. A título de ilustração, a Figura 3.8 apresenta curvas de sinais registrados por essa placa. Vale lembrar que o fenômeno da Figura 3.7 é o mesmo do da Figura 3.8.

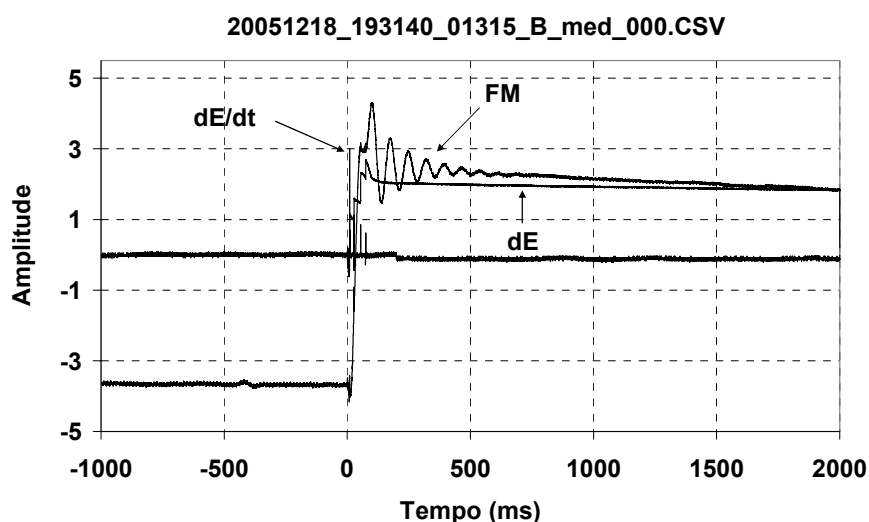


Figura 3.8 – Exemplo de registro da placa lenta.

Mais adiante é explicado o porquê de só haver registro de um medidor eletrônico de campo elétrico na Figura 3.8. O fato de o sinal dE/dt ⁹ ser registrado na placa lenta é só mesmo por precaução, porque a taxa de amostragem utilizada nesse caso não é suficiente para se amostrar bem o sinal em questão. A prova disso é que, integrando-se numericamente dE/dt , o resultado tem que ser, obrigatoriamente, dE . É fácil conseguir isso no registro feito pela placa rápida, mas não se pode dizer o mesmo daquele feito pela lenta. Na Figura 3.9 é mostrado um exemplo de integração do sinal dE/dt . A qualidade existente no sinal dE obtido numericamente frente ao dE medido é visível.

De acordo com as configurações do *software*, os arquivos gerados pela placa rápida registram 0,3 s do fenômeno, sendo 0,1 s antes do disparo e 0,2 s, depois. Já aqueles gerados pela placa lenta registram 3 s, sendo 1 s antes do disparo e 2 s, depois. O arquivo da placa rápida é como um *zoom* do arquivo da lenta em intervalos de tempo reduzidos que antecedem e sucedem o disparo, como pode ser visto na Figura 3.7(a) e na Figura 3.8. Vale lembrar que, para sinais de entrada com amplitudes superiores a ± 10 V, ocorre saturação, de acordo com as especificações do fabricante das placas. Nos casos de medição de variação lenta de campo elétrico onde há saturação, o que é muito comum, por

⁹ Na Figura 3.7(a), esse sinal está multiplicado por 10, para que seja mais bem visualizado.

meio da integração numérica¹⁰ da medição de variação rápida de campo elétrico, chega-se à forma de onda do campo elétrico, como mostra a Figura 3.9(b). Em raríssimos casos ocorre saturação na medição de variação rápida de campo elétrico. A Figura 3.10 mostra um exemplo onde há saturação do campo elétrico medido. Porém, tal sinal pôde ser recuperado pela integração de dE/dt .

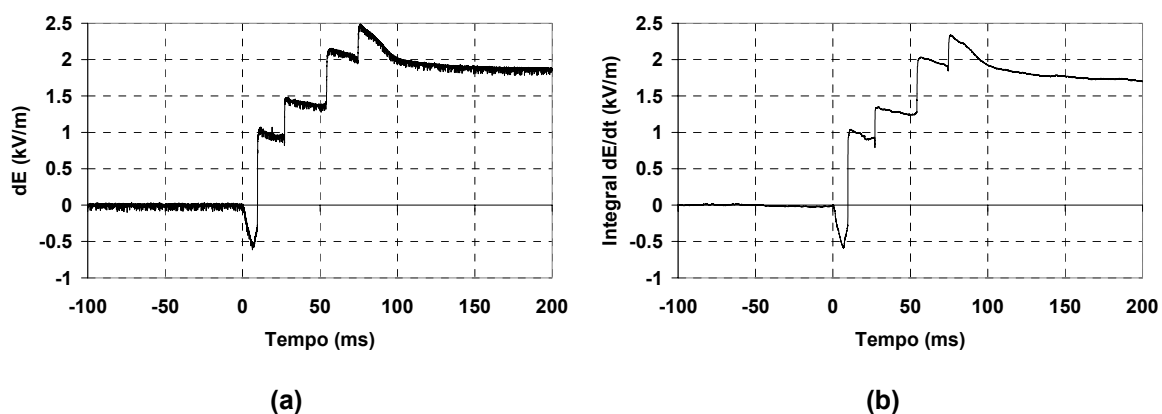


Figura 3.9 – Exemplo comparativo entre o sinal dE medido e aquele obtido numericamente a partir de dE/dt (placa rápida).

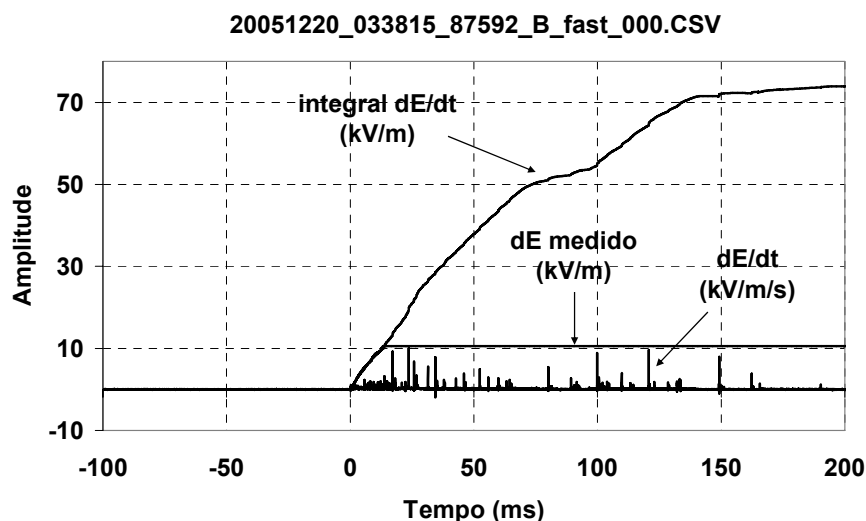


Figura 3.10 – Exemplo de recuperação, por integração de dE/dt , de uma medição na qual houve saturação na medição de dE .

¹⁰ A integração numérica pode ser facilmente obtida com a ajuda de softwares como o *Microsoft Excel* e o *Matlab*.

O sistema é acionado (disparado) por um sinal proveniente da antena que mede a variação rápida do campo elétrico. Tal sistema mede as grandezas de interesse continuamente e, quando um sinal de variação rápida ultrapassa o nível estabelecido para o limiar de tensão, as placas de aquisição geram arquivos no formato de matrizes numéricas com os dados de instantes anteriores armazenados em suas memórias e com os dados que serão ainda registrados, até que seja atingido o número de pontos (estabelecido por *software*) após o *trigger*. Quem dá o comando para que sejam gerados os arquivos é a placa rápida, embora ambas registrem o sinal de derivada de campo elétrico.

É interessante que o disparo esteja relacionado à variação rápida do campo elétrico, porque esse parâmetro é relativamente simples de se medir e é bem específico do fenômeno. Não se encontram na natureza outros fenômenos capazes de produzir derivadas de campo elétrico como as esperadas nesta investigação, com frequência.

A melhor forma de se chegar ao valor ótimo da tensão de disparo, caso o interesse seja se obter o maior número de registros possível, é reduzir, por *software*, o seu valor até um ponto no qual ruídos não possam ultrapassá-lo, ou seja, um ponto no qual o sistema não dispara na ausência de descargas atmosféricas ou canais ascendentes, mas dispara na presença da menor perturbação proveniente de uma descarga atmosférica ou de canais de descarga.

Após o disparo, cada uma das placas cria seu arquivo de dados, cuja designação inclui a data e o horário nos quais houve o disparo. Há ainda, no nome, a informação da placa que gerou o arquivo. A extensão dos arquivos é a “CSV”. Assim, os dados provenientes de um sensor ficam armazenados em colunas separadas por vírgulas. Arquivos com esse tipo de extensão podem ser facilmente manuseados nos aplicativos *Microsoft Excel* ou no *Matlab*, entre outros. Os títulos das curvas das Figura 3.7 e Figura 3.8 são o nome do arquivo que contém esse registro. Nos títulos, a letra “B” significa que aquele é um arquivo “brasileiro” gerado na Estação do Morro do Cachimbo¹¹, e os números “000” dizem que aquele é o primeiro arquivo relacionado ao fenômeno que lhe deu origem. Embora não esteja sendo utilizado aqui, é possível, face à duração do fenômeno, que uma

¹¹ Este *label* existe apenas para facilitar o manuseio dos arquivos por parte de pesquisadores estrangeiros que fazem parceria nas medições no Morro do Cachimbo. Esses pesquisadores operam outras estações nos Estados Unidos com sistemas de medição semelhantes ao implementado.

mesma placa gere vários arquivos para registrar a mesma descarga atmosférica ou canal ascendente.

Retornando à Figura 3.6, observa-se que o sistema é sincronizado por GPS. Tem-se, então, com exatidão de décimos de milésimos de segundos, o momento no qual se iniciou o registro, ou seja, quando a variação rápida de campo elétrico do fenômeno ultrapassou o limiar pré-estabelecido. De posse desse dado, faz-se uma correlação com os dados fornecidos pelo Sistema de Detecção e Localização de Tempestades – LLS – da CEMIG referentes às coordenadas (latitude e longitude) do ponto mais provável de incidência. Tomando-se como centro de uma circunferência o ponto de localização da torre instrumentada, selecionam-se os registros do LLS até um raio de 10 a 20 km. É possível, dentro dessa circunferência, montar-se uma base de dados numerosa, onde é fácil a identificação dos registros de qualidade referentes a eventos de variados tipos e intensidades, com amplitude de tensão detectada no sistema tal que os ruídos possam ser desprezados. O LLS fornece também uma estimativa da intensidade da corrente de retorno, o que possibilita a exploração de outras potencialidades do sistema.

Face à relevância do LLS no contexto desta investigação, são interessantes alguns comentários a seu respeito. Em primeiro lugar, os LLS's são sistemas que fornecem a localização do ponto de incidência da descarga atmosférica, o instante de ocorrência e a estimativa da amplitude da corrente de retorno, dentre outros parâmetros relativos à qualidade dos dados providos. Basicamente, o LLS é constituído por uma rede de estações remotas (sensores), uma central de processamento, um sistema de comunicação de dados e interface que permite a exibição dos dados de descargas.

O princípio de funcionamento do LLS consiste na detecção e medição do sinal eletromagnético originado pela corrente de retorno, o qual se propaga por longas distâncias sobre a superfície terrestre, alcançando as estações remotas. As informações provenientes dos sensores sensibilizados são utilizadas na central de processamento que, aplicando técnicas e algoritmos dedicados, calcula o ponto mais provável de incidência da descarga, além de indicar o erro esperado na localização. Adicionalmente, utilizando as intensidades de sinais medidos e algoritmo específico, a central estima a amplitude da corrente de retorno.

Os dados de descargas providos pelo LLS possuem incertezas que devem ser consideradas quando da utilização dos mesmos (MESQUITA, 2006), especialmente quando se trata da localização e da intensidade de corrente. Para a região onde se passa a

investigação, o valor mediano de erro de localização é, aproximadamente, 600 m (MESQUITA, 2005). Quanto à incerteza da amplitude da corrente, estudos realizados em alguns países indicam uma variação de 5 a 30% frente a valores obtidos em medições diretas.

3.3.2 Medição da Variação Lenta do Campo Elétrico dE

A medição da variação lenta do campo elétrico, dE , é feita por meio de uma antena do tipo *whip*, posicionada a 45 m da torre. Tal antena, com 1 m de comprimento, aproximadamente, é flexível, revestida com borracha, elétrica e mecanicamente simples e tem um ímã em sua base, o que facilita sobremaneira sua instalação. Por um cabo coaxial, interno a um cano metálico, é conectada à caixa de aquisição. É utilizada somente para a captação de sinais, sendo capaz de operar com baixas, médias e altas frequências, embora incapaz de medir campos constantes¹². Por esse motivo, o que de fato é medido por esse registro é o incremento/decremento no campo ambiente, ao nível do solo, em função do fenômeno que o provocou. A denominação dada ao campo elétrico neste texto, “ dE ”, e não simplesmente “ E ”, ganha sentido com o que foi dito. No “sinal corrigido” da Figura 3.14, por exemplo, até o início do fenômeno Descarga Atmosférica (por volta de - 150 ms), observa-se que “o campo elétrico é igual a zero”. Porém, isso não é verdade. Há um campo elétrico ambiente, diferente de zero, cuja variação é muito lenta e não pode ser medida pela antena. A existência deste campo elétrico ambiente pode ser comprovada com o registro do medidor eletrônico, tal como na Figura 3.23, que compara o registro deste equipamento com o da antena, para uma mesma descarga atmosférica. Assim, a medição dE é apenas a contribuição, a parcela do fenômeno adicionada ao campo elétrico total. A Figura 3.11 mostra as antenas de medição de dE e dE/dt .

Dentro da caixa de aquisição, são utilizados resistores e capacitores que têm a função de garantir uma constante de tempo adequada aos propósitos da medição. No caso da medição de variação lenta de campo elétrico, uma constante de tempo maior (da ordem de centenas de milissegundos) deve ser obtida. Por isso, essa antena é chamada de antena lenta¹³.

¹² Como será visto adiante, o circuito equivalente que representa o conjunto antena, cabo coaxial e componentes (resistivos e capacitivos) na caixa de aquisição é um filtro passa-faixa.

¹³ Tradução do termo *slow antenna*, utilizado pela primeira vez na literatura por Kitagawa e Brook, em 1960.



Figura 3.11 – Antenas de medição de variações lenta e rápida de campo elétrico.

Reafirmando o que foi dito no capítulo anterior, convencionou-se aqui que o campo elétrico negativo é aquele formado por cargas elétricas positivas no solo e negativas na nuvem. Há pesquisadores que convencionam o contrário.

Há que se fazer, porém, algumas correções nos valores obtidos em função de alguns parâmetros indesejados, embora necessários, do sistema de medição.

CORREÇÃO DAS MEDIÇÕES DEVIDA À INFLUÊNCIA DO RESISTOR DE CARGA¹⁴

Uma antena, posicionada a uma altura h do solo, tem um valor aproximado de tensão induzida $U_0(t)$ nos seus terminais, quando sujeita a um campo elétrico $E(t)$ dado por (KASEMIR, 1959):

$$U_0(t) = E(t) * h \quad (3.1)$$

O cabo coaxial de capacitância C e de resistência de entrada R que conecta a antena à entrada do sistema de aquisição, no caso, a caixa de aquisição, modifica o sinal $U_0(t)$ de acordo com o circuito equivalente cujo diagrama é mostrado na Figura 3.12.

¹⁴ Todas as correções de medições aqui apresentadas, bem como os diagramas dos circuitos equivalentes ilustrados, são adaptados de textos não publicados de Lothar Ruhnke.

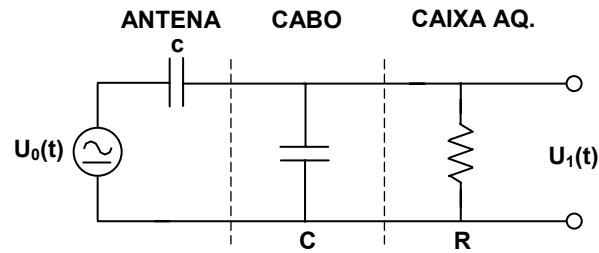


Figura 3.12 – Circuito equivalente da medição de variação lenta do campo elétrico.

No circuito da figura acima, c é a capacitância da antena para o ambiente. A tensão medida $U_1(t)$ se relaciona com $U_0(t)$ pela equação abaixo:

$$U_1(j\omega) = U_0(j\omega) * j\omega R c / (1 + j\omega R(C+c)) \quad (3.2)$$

Para $\omega R(C+c)$ muito maior que 1, como é o caso, a equação (3.2) pode se reduzir a:

$$U_1(j\omega) = U_0(j\omega) * c / (C+c) \quad (3.3)$$

No domínio do tempo, a equação acima pode ser escrita como:

$$U_1(t) = U_0(t) * c / (C+c) \quad (3.4)$$

Nesse caso, $U_1(t)$ é diretamente proporcional a $E(t)$. Contudo, R tem valor próximo a 20 M Ω e C , 4.000 pF. A constante de tempo do circuito, $R(C+c)$, é aproximadamente 80 ms. Há, então, queda no nível do sinal adquirido (efeito de carga), para frequências inferiores a 2 Hz. Faz-se necessário corrigir os efeitos do resistor de carga no sistema de medição. Resolvendo-se a equação (3.2) para $U_0(j\omega)$, tem-se a equação (3.5):

$$U_0(j\omega) * c / (C+c) = U_1(j\omega) * [1 / (j\omega R(C+c) + 1)] \quad (3.5)$$

No domínio do tempo, a equação acima pode ser escrita como:

$$U_0(t) * c / (C+c) = U_1(t) + 1 / R(C+c) * \int_0^t U_1(t) dt \quad (3.6)$$

Para se chegar a bons resultados, pode ser necessário adicionar uma capacitância ao circuito, obtendo-se a um novo valor para a constante de tempo. Foi, então, adicionado um capacitor de 23.600 pF. A nova constante de tempo foi de 602 ms. Com esses parâmetros, chegou-se a um valor ótimo para as medições no que diz respeito à sensibilidade do sistema a essa medição (ver equação (3.4): a adição de capacitores na entrada diminui a sensibilidade da antena lenta.). Problemas de saturação só são observados para descargas muito próximas ou não tão próximas, mas de grande intensidade. O circuito equivalente do sistema instalado, com os valores medidos de capacitâncias e resistências, pode ser visto na Figura 3.13¹⁵.

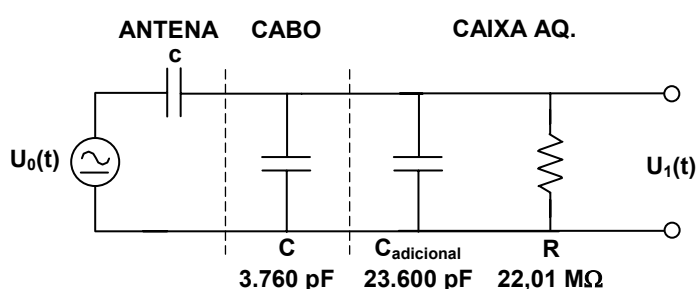


Figura 3.13 – Circuito equivalente completo da medição da variação lenta do campo elétrico.

Para que essa correção seja válida, assume-se que não há tensão de *offset*¹⁶ nos registros. O valor da tensão de *offset* pode ser obtido facilmente calculando-se a média dos pontos existentes antes do início do sinal medido, ou seja, antes do disparo das placas de aquisição ou antes do efeitos do canal descendente. Feito isso, subtrai-se o *offset* do registro como um todo.

Na Figura 3.14, é possível notar claramente o efeito do resistor de carga na medição. Ele provoca um decaimento no sinal captado pela antena: é o efeito da constante de tempo no sinal induzido na antena. Outra correção que pode ser vista se refere ao *offset* no sinal. O *offset* está presente em todo o sinal, porém, para calculá-lo da melhor maneira possível, tira-se a média do maior número de pontos antes do início do fenômeno. Na curva do sinal medido, sabendo-se que há 10 mil pontos antes do *trigger* (instante de tempo zero), tirando-se a média dos 8 mil primeiros pontos e subtraindo-se o valor obtido,

¹⁵ Pelo diagrama do circuito equivalente, nota-se que o conjunto antena mais cabo e componentes comporta-se como um filtro passa-faixa.

¹⁶ As principais fontes de *offset* são os componentes eletrônicos do próprio sistema e, eventualmente, a umidade presente nos cabos.

ponto a ponto, do vetor do sinal, elimina-se o *offset* de uma maneira simples. Nota-se a ausência de *offset* na curva corrigida.

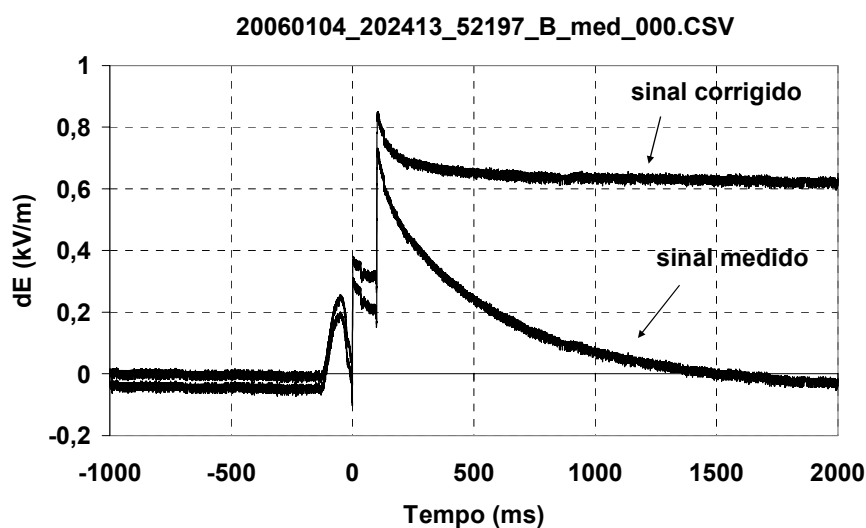


Figura 3.14 – Exemplo de correção de um sinal de variação lenta de campo elétrico medido (MAZUR, 2003).

Outro problema relativo ao *offset* ocorre no momento da integração numérica. Ao se integrar um valor constante, obtém-se uma reta com inclinação não nula. No último termo à direita da equação (3.6), a presença do *offset* irá gerar uma correção falsa. Logo, o *offset* deve ser excluído do sinal.

3.3.3 Medição da Variação Rápida do Campo Elétrico dE/dt

A medição da variação rápida do campo elétrico é feita, tal qual a da variação lenta, por meio de uma antena do tipo *whip*, com o mesmo posicionamento. A conexão com a caixa de aquisição é feita de maneira semelhante. A diferença existente se dá na entrada da caixa de aquisição: não é necessário um capacitor adicional, e o resistor R é bem menor que no outro caso.

CORREÇÃO DAS MEDIÇÕES DEVIDA À CAPACITÂNCIA DO CABO COAXIAL

A antena, posicionada a uma altura h do solo, tem uma tensão induzida $U_0(t)$ nos seus terminais, quando sujeita a um campo elétrico $E(t)$ tal como descrito pela equação (3.1).

O cabo coaxial de capacitância C que conecta a antena à entrada do sistema de aquisição, de resistência de entrada R , modifica o sinal $U_0(t)$ de acordo com o circuito equivalente cujo diagrama é mostrado na Figura 3.12.

No circuito dessa figura, c é a capacitância da antena para o ambiente. A tensão medida $U_1(t)$ se relaciona com $U_0(t)$ pela equação (3.2).

Para $j\omega R(C+c)$ muito menor que 1, como é o caso, a equação (3.2) se reduz a:

$$U_1(j\omega) = U_0(j\omega) * j\omega Rc \quad (3.7)$$

No domínio do tempo, a equação acima pode ser escrita como:

$$U_1(t) = Rc * dU_0(t)/dt \quad (3.8)$$

Nesse caso, $U_1(t)$ é diretamente proporcional a $dU_0(t)/dt$. Contudo, R é de, aproximadamente, 1 k Ω e C , 4000 pF. Rc , por outro lado, é aproximadamente 4 μ s. Há, então, queda no nível do sinal adquirido (efeito de carga), levando-se em conta a taxa de aquisição utilizada no sistema. Resolvendo-se a equação (3.2) para $U_0(j\omega)$, chega-se à equação (3.9):

$$U_0(j\omega) * j\omega Rc = U_1(j\omega) + j\omega R(C+c) * U_1(j\omega) \quad (3.9)$$

No domínio do tempo, a equação acima pode ser escrita como:

$$Rc * dU_0(t)/dt = U_1(t) + R(C+c) * dU_1(t)/dt \quad (3.10)$$

$dU(t)/dt$ pode ser facilmente obtida por meio de diferenciação finita dos dados medidos.

Para se alcançarem bons resultados¹⁷, pode ser necessário um outro valor para o resistor R , chegando-se a um novo valor para a constante de tempo. Foi, então, utilizado um resistor de 2,78 k Ω . A nova constante de tempo é 10,4 μ s. Com esses parâmetros, obteve-se um valor ótimo para as medições no que diz respeito à sensibilidade do sistema

¹⁷ Levando-se em consideração a relação sinal/ruído e a sensibilidade da antena.

à detecção de descargas. De acordo com a equação (3.8) e sabendo-se que é este sinal que dispara o sistema, alterando-se o valor do resistor R , é possível registrar somente as descargas localizadas dentro de um raio de interesse. No caso, são registradas descargas num raio de, aproximadamente, 20 km. O circuito equivalente do sistema instalado, com os valores medidos de capacitâncias e resistências, pode ser visto na Figura 3.15.

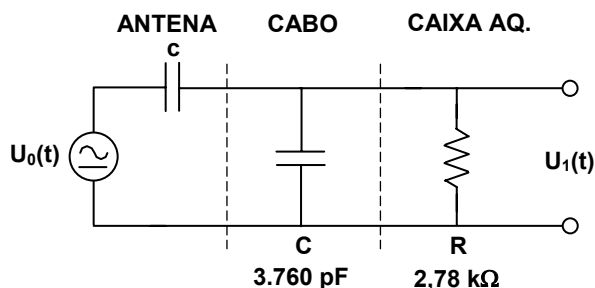


Figura 3.15 – Circuito equivalente completo da medição da variação rápida do campo elétrico.

Para que essa correção seja válida, tal qual nas correções da medição de variação lenta do campo elétrico, assume-se que não há tensão de *offset* nos registros. O procedimento para eliminação do *offset* é o mesmo do descrito no caso anterior. A Figura 3.16 exemplifica uma correção.

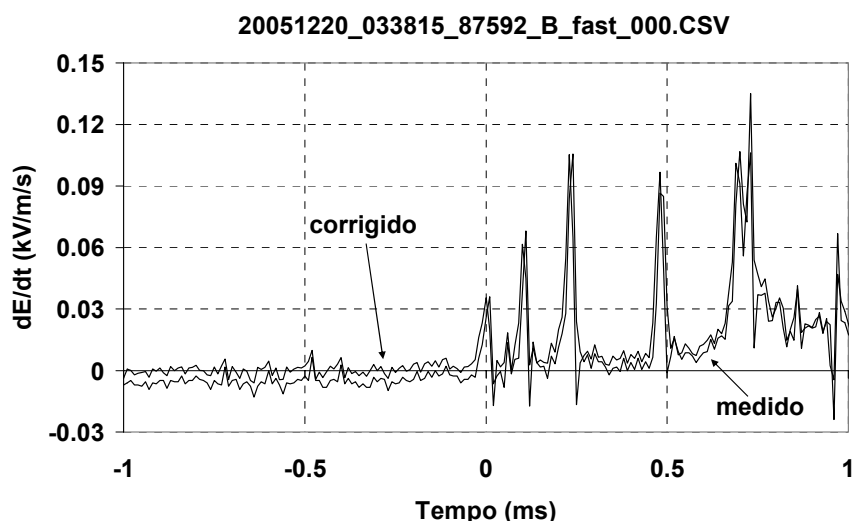


Figura 3.16 – Exemplo de correção de um sinal de variação rápida do campo elétrico medido.

Na Figura 3.16, não tão claramente como nas correções de variação lenta do campo elétrico, nota-se o efeito da capacitância do cabo na medição. A correção é aqui mais sutil, até mesmo porque a constante de tempo nesse circuito é da mesma ordem de

grandeza (microsegundos) da taxa de amostragem. Outra correção que pode ser vista se refere à exclusão do *offset* do sinal.

3.3.4 Medição da Elevação de Potencial na Impedância de Aterramento da Torre

Uma descarga atmosférica nas vizinhanças da torre da estação ou mesmo um canal descendente podem provocar o surgimento de um canal ascendente originado na torre.

Além dos canais ascendentes, há as descargas de retorno e as subseqüentes como fontes de registro de corrente induzidas na torre. A medição da elevação de potencial em sua impedância de aterramento se justifica em função da corrente proveniente de qualquer uma dessas fontes. Há aqui mais um caso de medição redundante, com o propósito de se certificar que o que está sendo medido está correto. A tensão $U_0(t)$ no aterramento da torre pode ser dada pela equação (3.11),

$$U_0(t) = I(t) * Z_G \quad (3.11)$$

sendo Z_G a impedância de aterramento da torre e $I(t)$, a corrente no seu condutor de descida. Um valor aceitável, apresentado no subitem 3.2.3, obtido por meio de injeções de correntes impulsivas de valores conhecidos, é de 28 Ω .

A medição em questão é feita por meio de um *loop* de tensão, ou seja, partindo-se de um referencial de tensão nula (potencial de um aterramento em um ponto fora das cercanias da estação, bem distante da torre¹⁸), utiliza-se um divisor de tensão capaz de compatibilizar os níveis de tensão reais envolvidos com os níveis suportáveis pelas placas de aquisição. Abaixo, o *loop* de tensão será mais bem detalhado. A montagem do divisor de tensão pode ser vista na Figura 3.17.

¹⁸ O terra remoto está a uma distância aproximada de 150 m da torre.



Figura 3.17 – Montagem do divisor de tensão do *loop*.

CORREÇÃO DAS MEDIÇÕES DEVIDA À CAPACITÂNCIA DO CABO COAXIAL DO LOOP

O circuito da Figura 3.18 representa o *loop* de tensão descrito. Se o cabo RG58 que conduz o sinal do divisor de tensão à caixa de aquisição é terminado com um resistor de 50Ω , ou seja, com uma resistência equivalente à impedância de onda do cabo, não haverá distorção no sinal por reflexão. A tensão medida, $U_1(t)$, será igual à queda de tensão na impedância de aterramento multiplicada pela corrente injetada na torre, atenuada por um fator R_1/R_2 , referente ao divisor de tensão do *loop*. $U_0(t)$ é a elevação de tensão no aterramento da torre. No circuito utilizado, R_1 é a resistência de entrada, equivalente a $56,3 \Omega$. R_2 é a resistência do *loop* que constitui um aterramento num ponto remoto e é de $47 \text{ k}\Omega$.

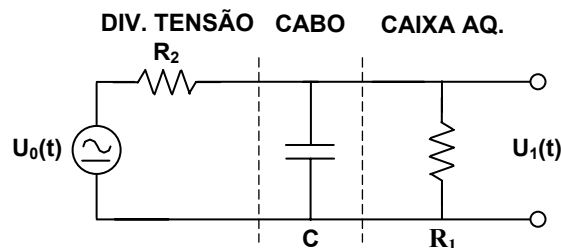


Figura 3.18 – Circuito equivalente da medição da elevação de potencial no aterramento da torre.

Uma forma alternativa de se visualizar o circuito do *loop* é por meio da Figura 3.19.

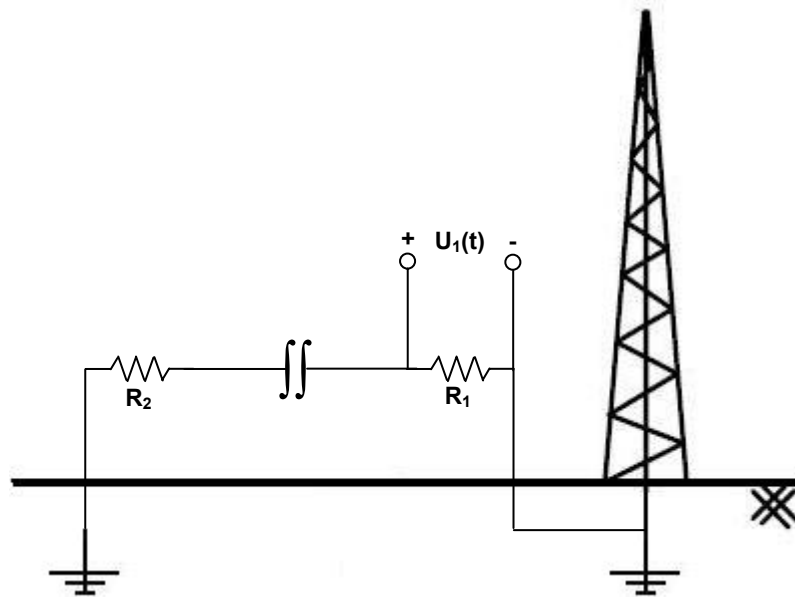


Figura 3.19 – Forma alternativa de visualização do circuito da medição da elevação de potencial no aterramento da torre.

Para se obter a tensão na impedância de aterramento da torre, basta multiplicar a tensão medida pelo fator R_2/R_1 , ou seja, 835.

Também nesta medição, faz-se necessário corrigir o sinal medido devido à influência do cabo coaxial que conduz o sinal do ponto remoto de aterramento, ou seja, potencial nulo, à caixa de aquisição.

Para R_2 muito maior que R_1 , como é o caso, tem-se:

$$U_1(j\omega) = U_0(j\omega) * (R_1/R_2) / (1 + j\omega R_1 C) \quad (3.12)$$

A fim de se eliminarem quaisquer efeitos provenientes da constante de tempo $R_1 C$, chega-se na equação (3.13) para $U_0(t)$:

$$U_0(j\omega) * (R_1/R_2) = U_1(j\omega) + U_1(j\omega) * j\omega R_1 C \quad (3.13)$$

No domínio do tempo, a equação acima pode ser escrita como:

$$U_0(t) * (R_1/R_2) = U_1(t) + R_1 C * dU_1(t)/dt \quad (3.14)$$

$dU_1(t)/dt$ pode ser também facilmente obtida por meio de diferenciação finita dos dados medidos.

3.3.5 Medição da Corrente no Condutor de Descida da Torre

A medição de corrente pode ser vista principalmente como um guia para se analisar a seqüência cronológica que acontece antes da primeira descarga de retorno, ou seja, o canal ascendente. Para se medir a corrente na torre, utiliza-se um medidor do tipo alicate posicionado no seu condutor de descida. O medidor é mostrado na Figura 3.20. O sinal é transmitido à caixa de aquisição por meio do cabo coaxial RG58.

O medidor em questão é da marca *FLUKE*, modelo *i3000s*, e possui uma banda passante de 10 Hz a 100 kHz. Possui três escalas: 30, 300 e 3000 A. Fica, geralmente, na escala de 300 A. Obtém-se o valor da corrente medida a partir do sinal de tensão da saída do medidor, dividindo-o pela relação tensão/corrente da escala, no caso, 1 mV/A.

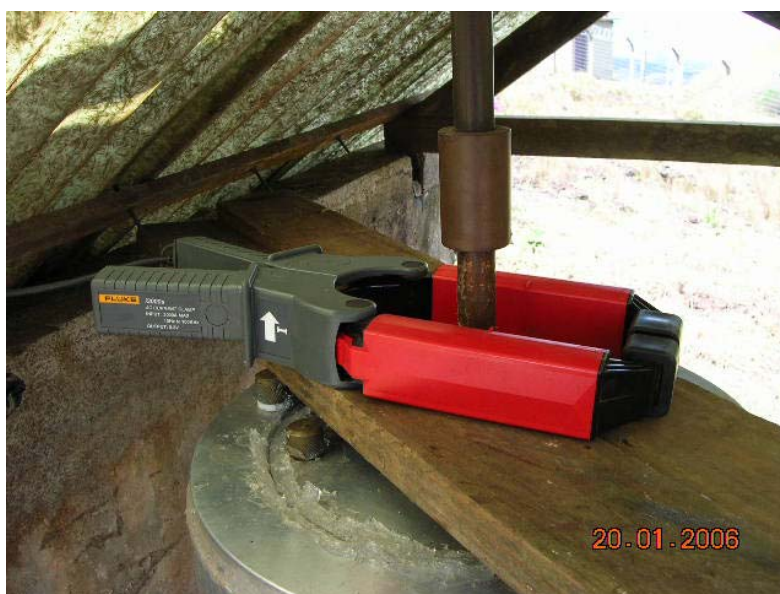


Figura 3.20 – Medidor de corrente do tipo alicate no condutor de descida da torre.

Com relação ao sentido e ao sinal da corrente convencionados neste texto, uma variação positiva de campo elétrico medida pela antena corresponde a um fluxo negativo de corrente para o solo. Assim, um canal ascendente positivo ou uma variação brusca de campo elétrico em função de uma corrente de retorno (dE/dt positivo) geram um registro contendo uma corrente negativa.

Uma importante observação a ser feita sobre esta medição diz respeito à proximidade de sua forma de onda com a de dE/dt . A equação abaixo mostra a relação entre as duas grandezas. Estimando-se os valores da capacitância da torre (C) e da sua altura efetiva (h_{ef}), obtém-se uma correlação entre as formas de onda de corrente e dE/dt . Valores bastante razoáveis para C e h_{ef} seriam, respectivamente, 5000 pF e 30 m.

$$I = dE/dt * C * h_{ef} \quad (3.15)$$

3.3.6 Medidores Eletrônicos de Campo Elétrico e Ajustes

Com o objetivo de ajustar a medição de campo elétrico efetuada pelo sistema e de medir o campo continuamente, antes e depois do fenômeno de interesse, são utilizados na estação medidores eletrônicos de campo elétrico (*field mill*). A Figura 3.21 mostra o (a) medidor empregado e (b) seu suporte.

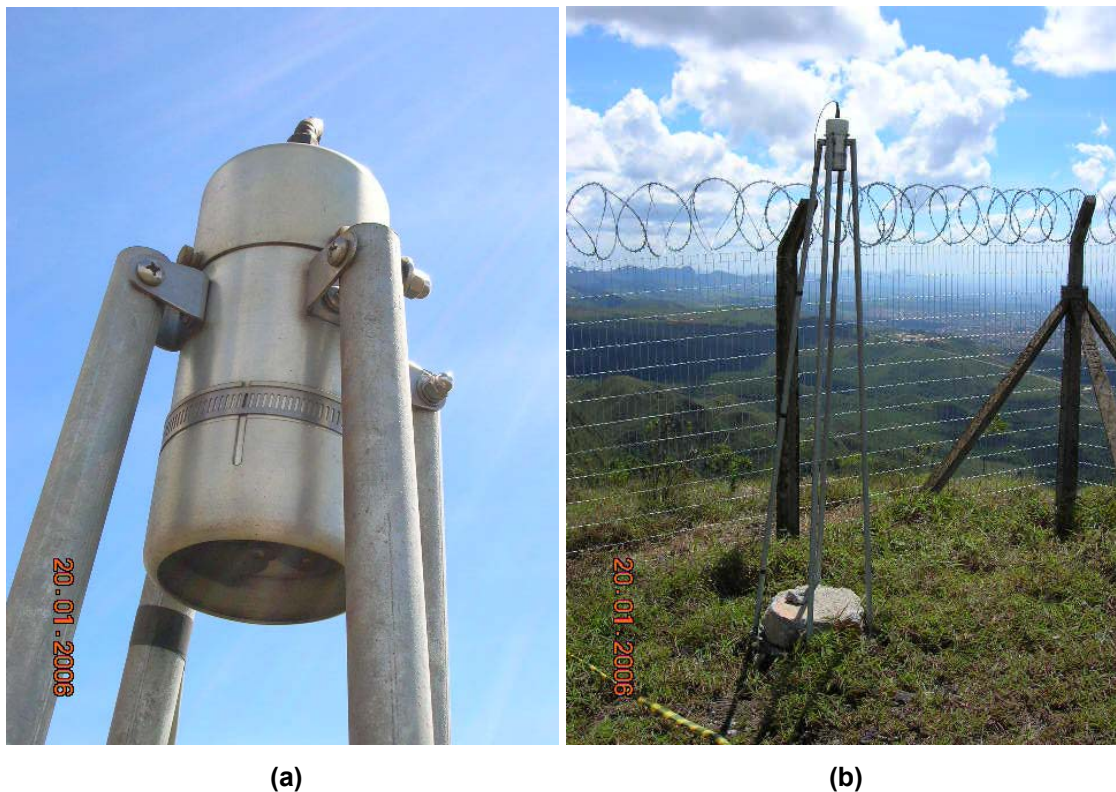


Figura 3.21 – Medidor eletrônico de campo elétrico.

O princípio de funcionamento desse equipamento se baseia na medição do campo a partir de uma variação conhecida de capacitância. Para isso, o equipamento possui uma placa com furos circulares que gira com velocidade constante, provocando uma variação

na capacitância do sensor do equipamento. Logo, o medidor é capaz de medir campos constantes e variáveis.

O problema que surge aqui é que o medidor possui uma resposta em frequência lenta, ou seja, não é capaz de medir variações bruscas no campo. Apresenta elevado *overshoot* e longo tempo de assentamento, o que impede que seja utilizado para medir campos de canais ascendentes e de correntes de retorno de descargas atmosféricas. Justifica-se aí o uso da antena somada aos resistores e capacitores na caixa de aquisição. Esses conjuntos, por sua vez, não medem campos constantes. Como pode ser visto no circuito equivalente da Figura 3.12, o conjunto antena mais cabos é um filtro passa-faixa.

Para uma medição correta do campo elétrico, são necessários dois medidores. Um deles é parte integrante do sistema e funciona continuamente. Tem a função de medir o campo antes e depois do fenômeno causador da perturbação, por servir de referência aos valores medidos pelas antenas. Na Figura 3.22 está um exemplo de uma medição feita pelo medidor e outra pela antena, referentes ao mesmo fenômeno. Notam-se as oscilações, o alto tempo de assentamento e a incapacidade do medidor eletrônico de responder a elevadas variações de campo elétrico.

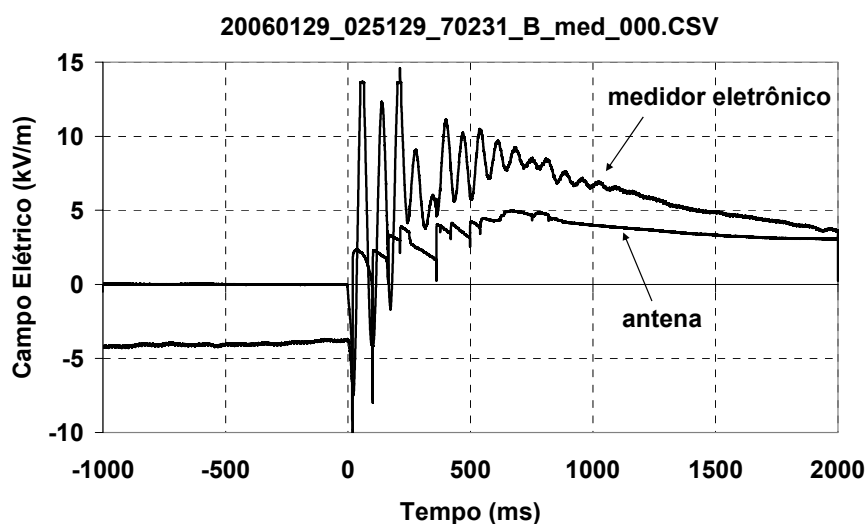


Figura 3.22 – Comparação entre as medições feitas pela antena de variação lenta do campo elétrico e pelo medidor eletrônico.

Na Figura 3.22, há a descarga de retorno com várias descargas subsequentes. As derivadas de campo elétrico são altas, o que justifica as grandes oscilações no registro do medidor eletrônico. Já na Figura 3.23, onde não há uma descarga de retorno, apenas

variações de campo elétrico mais lentas devidas aos avanços do canal ascendente, as oscilações da medição eletrônica são menores que no caso anterior.

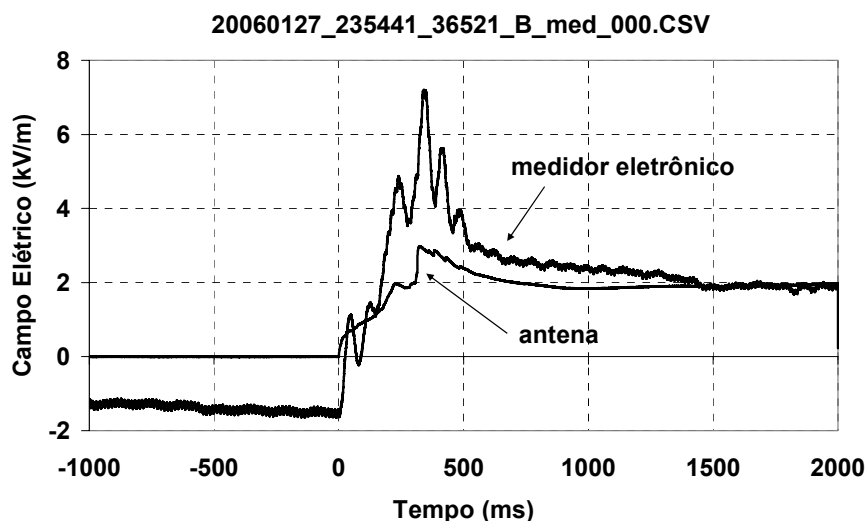


Figura 3.23 – Exemplo de calibração da medição de variação lenta de campo elétrico.

Na medição eletrônica, interessam as regiões da curva antes e depois do fenômeno: o valor anterior, porque só esta medição é capaz de provê-lo, e o valor posterior, porque é a referência para a medição dE . Nessas regiões, a variação do campo elétrico é lenta e o medidor consegue responder bem. A região da curva do registro anterior ao fenômeno é perdida pela antena. Após o fenômeno e o assentamento da saída do medidor eletrônico, os valores fornecidos por ambos os sensores devem coincidir. Assim, por meio de um ajuste, ou seja, pela multiplicação ponto a ponto do registro de dE por uma constante, faz-se a sobreposição desta medição com a do medidor eletrônico, obtendo-se valores corretos para dE . A Figura 3.23 mostra um exemplo de ajuste como este. No exemplo, a partir de cerca de 1500 ms, as duas curvas devem se sobrepôr, já que houve o assentamento da resposta do medidor eletrônico.

O segundo medidor eletrônico é utilizado temporariamente, ou seja, fica instalado até que se encontre um ajuste para o registro fornecido pelo medidor permanente. É previamente calibrado em laboratório, a partir de um campo elétrico de valor conhecido. Serve somente para prover um fator multiplicador constante que iguala seu registro ao do medidor permanente. Tal ajuste pode ser feito com base em registros de uma mesma descarga atmosférica feitos por ambos os medidores ou com base em um registro feito por

um grande período de tempo¹⁹ (30 minutos, aproximadamente), estando ambos na presença de neblina, onde são observadas variações lentas, porém, significativas no campo elétrico no nível do solo.

De posse da tensão na saída do medidor, $U(t)$, chega-se ao valor do campo elétrico medido, em kV/m, por meio da equação (3.16):

$$E[kV / m] = U[V] * 3,07 + 0,23 \quad (3.16)$$

Há que se ressaltar aqui que a medição só é válida para valores da tensão de saída de até ± 5 V, pois, para valores fora dessa faixa, a saída deixa de ser linear.

3.3.7 Potencialidades e Limitações

O Sistema de Medição implementado, associado ao LLS, é uma poderosa ferramenta no estudo de Descargas Atmosféricas. Uma de suas propriedades que merece destaque é a redundância nas medições, ou seja, a mesma grandeza é medida de formas distintas. Se tais medições apontarem para o mesmo resultado, isso significa que a medição dificilmente estará errada. Caso se chegue a resultados incompatíveis, torna-se mais fácil investigar onde há problemas. Na eventualidade de perda de algum dos registros, por defeito em algum sensor ou por saturação, a medição perdida pode ser recuperada ou pode se ter uma idéia de sua forma de onda a partir dos demais registros.

Exemplificando o que foi dito, podem ser citadas as medições de variações lenta e rápida de campo elétrico. As duas medições são feitas por meio de resistores e capacitores distintos, e, tratando-se numericamente os dados obtidos, chega-se a resultados equivalentes. Outro exemplo é a medição de corrente na torre e a medição da elevação de potencial em seu aterramento. Sabe-se que formas de ondas próximas devem ser obtidas, variando-se somente as polaridades. Essas duas formas de onda devem ser similares à variação rápida de campo elétrico. Resumindo, deve ser chamada a atenção para a precisão do sistema e para a qualidade e confiabilidade das medições realizadas.

Além do estudo específico do canal ascendente, o sistema pode investigar o campo elétrico relativo a correntes de retorno de qualquer tipo de descarga nuvem-solo, desde que este consiga sensibilizá-lo. Inúmeros estudos estatísticos no tema podem ser

¹⁹ Altera-se a taxa de aquisição da placa lenta, de modo a produzir registros cujas janelas são de cerca de 30 min. O número de pontos é mantido.

desenvolvidos, bem como estudos para associar parâmetros físicos de descargas com as condições do relevo nas vizinhanças da Estação do Morro do Cachimbo.

Considerando-se a instalação dos equipamentos em uma torre, os resultados obtidos pelo sistema contribuem no estudo do comportamento de estruturas elevadas frente a descargas atmosféricas próximas. Tais estruturas nada mais são que pontos preferenciais para incidência de descargas. Estes estudos podem se relacionar não apenas com o surgimento de canais ascendentes, mas também com a indução de correntes e elevações de potencial na estrutura.

Quanto às limitações do sistema, a primeira delas é o raio no qual consegue registrar descargas atmosféricas. Apesar de ser possível montar uma numerosa base de dados com descargas contidas num raio de 20 km da estação, essa distância é muito pequena quando comparada ao que fazem outros sistemas de medição encontrados na literatura, nos quais o raio pode chegar a mais de 300 km (SCHULZ, 2005). No sistema em questão, o raio de medição fica muito restrito em função do elevado nível de ruídos presente nas medições (ver subitem 3.3.8).

Uma segunda limitação diz respeito às taxas de aquisição utilizadas. Embora seja possível variá-las de acordo com o interesse, seus valores máximos são baixos, principalmente o da placa NI 6023E, que pode chegar a 200 kHz. Não é possível aqui se estudar com detalhes as características rápidas do fenômeno, tais como os tempos de subida. Pulsos preliminares rápidos, com espaçamentos de cerca de 20 a 25 μ s (LALANDE, 1998), associados ao início do processo, não podem ser observados. É possível se perderem também picos muito rápidos. Há que se fazer aqui um compromisso entre qualidade da medição e esforço computacional, tamanho do arquivo e tempo envolvido na geração e gravação do registro.

Outro fator de limitação são as faixas de passagem dos instrumentos. No caso das antenas, o fato de não serem capazes de medir campos estáticos é facilmente solucionado. Porém, o mesmo não ocorre com o medidor de corrente do tipo alicate. Embora sua faixa de passagem (10 Hz a 100 kHz) esteja coerente com a taxa de aquisição utilizada (100 kHz), componentes de baixa frequência do sinal de corrente são perdidas. Por meio de comparação com o sinal da queda de potencial na impedância de aterramento, é possível se ter uma idéia da perda que isso pode acarretar à medição.

3.3.8 Problemas Inerentes ao Sistema e Soluções Adotáveis para Compensação

Como todo sistema de campo composto por equipamentos expostos à ação do ambiente freqüentemente apresenta problemas, o sistema em questão não é uma exceção. O principal problema é a penetração de umidade nos equipamentos e cabos de transmissão de sinais.

A penetração de umidade nos contatos entre as antenas e os cabos coaxiais que conduzem os sinais destas à caixa de aquisição altera a resistência do isolamento dos cabos. Com isso, há redução da constante de tempo da medição de variação lenta de campo elétrico, já que a resistência de isolamento está em paralelo com um resistor de, aproximadamente, 22 M Ω . A resistência do isolamento passa a ser, então, significativa no circuito, interferindo no mesmo. A medição passa a ser incorreta, porque a correção passa a “mascarar” o sinal real esperado. A prevenção é vedar bem os contatos e evitar que eles fiquem muito expostos à incidência da chuva ou poças de água. A solução para o problema pode ser secar os contatos ou até mesmo trocar os cabos.

No caso do cabo da medição de derivada de campo elétrico, o problema é menos crítico, porque há um resistor de, aproximadamente, 2 k Ω na entrada. Assim, a resistência do isolamento tem que cair sobremaneira para que fique significativa no circuito. Sendo esta superior a 1 M Ω , não há problema em se utilizar o cabo com umidade em seu interior.

Caso ambos os cabos contenham umidade, deixa-se o pior deles conectado à entrada dE/dt , já que esta é menos suscetível ao problema.

Pode acontecer também de entrar umidade na antena. O material responsável por lacrar sua base não é resistente o suficiente às intempéries. Ele facilmente se deteriora e surgem buracos em sua superfície, o que permite a entrada de umidade. Há também uma redução da resistência do seu isolamento, o que compromete sua sensibilidade e a constante de tempo.

As antenas foram vedadas com silicone para se evitar esse problema, mas é importante manter suas bases sempre limpas, sem teias de aranhas, porque a sujeira também atrapalha o correto funcionamento. Além disso, como os materiais envolvidos aqui são plásticos, e o silicone para vedação não se adere perfeitamente a eles, sendo

necessário, periodicamente, fazer manutenção nas antenas, limpando-as, secando-as e substituindo o silicone das bases.

Os medidores eletrônicos de campo elétrico também estão suscetíveis à penetração de umidade no seu interior: sua medição fica comprometida. Esse problema acontece algumas vezes na presença de fortes e duradouras tempestades. Quando isso ocorre, eles ficam momentaneamente fora de operação, mas retornam quando a umidade em seus interiores diminui. Gotas de água eletrificadas na placa que gira constantemente também prejudicam a correta medição do campo. Não é necessário tomar aqui nenhuma providência para corrigir o problema, pois a umidade desaparece em poucas horas após a forte tempestade.

Outro problema acontece na medição de corrente no condutor de descida da torre. A oxidação dos contatos do medidor alicate impede que o equipamento meça corretamente a corrente. É necessário checar, periodicamente, as condições dos contatos. Se eles estiverem oxidados, com o auxílio de uma lixa bastante fina esfregada em ambas as superfícies, o problema pode ser resolvido. É sempre bom que se façam testes de injeção de correntes impulsivas de amplitudes conhecidas para se verificar o correto funcionamento do medidor.

Por fim, um problema tão grave quanto os demais: os ruídos. Eles estão presentes em todas as medições e contribuem sobremaneira para deteriorá-las. O microcomputador utilizado nas medições deve ser solidamente aterrado junto ao aterramento do abrigo. Deve haver somente um ponto de referência nas medições. Assim, a caixa de aquisição, o GPS, a alimentação do microcomputador, a carcaça deste, o suporte do medidor eletrônico de campo elétrico, a alimentação dos medidores eletrônicos de campo elétrico e as malhas dos cabos coaxiais devem estar conectados ao mesmo ponto e entre si. Isso se deve ao fato das medições serem feitas sempre com referência a esse ponto. O ruído do sistema tem que ser eliminado, e o aterramento é a forma melhor e, relativamente, mais simples de se fazer isso.

Capacitores de filtro são empregados para se eliminar ruídos no interior da caixa de aquisição. Todos os pontos de alimentação possuem capacitores de filtro conectados a eles. As entradas dos canais e dos amplificadores operacionais não utilizados são também aterradas.

Tendo-se em mente que o sistema é preparado para medir fenômenos de alta frequência e irradiados, a blindagem dos cabos e da caixa de aquisição também é importante. A blindagem apenas do abrigo tal como é, por si só, não resolve o problema. A caixa de aquisição é propositalmente feita de metal, com o objetivo de blindar e facilitar seu aterramento. O cabo do GPS, que não é coaxial, também é blindado com uma fita metálica. Há que se ressaltar que o GPS é uma das maiores fontes de ruído do sistema. Posicionado em cima do telhado do abrigo, funciona como uma antena, trazendo sinais difíceis de serem expurgados.

Por fim, surge a questão dos falsos disparos, ou seja, são gerados arquivos sem que haja uma variação rápida de campo elétrico suficiente para provocar um nível de tensão superior ao de limiar. Isto ocorre principalmente em função da elevada resistência de aterramento do abrigo. Um pulso negativo de tensão que se propaga pela linha que alimenta a estação e chega às placas pelo aterramento é visto pelo microcomputador como um pulso positivo, o que ocasiona o disparo do sistema. Isso ocorre pela presença de alguma reatância indutiva existente entre as conexões de aterramento entre o microcomputador e o aterramento físico do abrigo. Infelizmente, esse problema ainda não pode ser solucionado, mas pode ser mascarado com o aumento da tensão de limiar.

3.3.9 Aspectos de Concepção

A metodologia a ser utilizada na análise dos dados é, de posse das medições, identificar a posição da descarga atmosférica associada pelo Sistema de Detecção e Localização de Raios – LLS, por meio da sincronização dos eventos, e correlacioná-la com o que foi medido. As coordenadas do ponto de incidência da descarga atmosférica associada ao evento e a intensidade de sua corrente de retorno são assumidas como sendo aquelas fornecidas pelo LLS. A intensidade da corrente, embora estimada com uma incerteza elevada, já é um indicador a respeito das intensidades obtidas pelo sistema de medição, e vice-versa.

Uma propriedade importante do sistema de medição é que, mesmo na ausência de conexão entre os canais ascendente e descendente, ou seja, da descarga de retorno para o solo, as grandezas para as quais o sistema é projetado a medir são registradas, desde que a variação rápida do campo elétrico, dE/dt , ultrapasse o limiar do *trigger*. Isso quer dizer que, apesar de não serem o foco das pesquisas, campos elétricos de descargas intra-nuvem e entre nuvens são algumas vezes registrados. O registro desses fenômenos torna-se interessante como referência para o estudo dos dados fornecidos pelos LLS's. A título de ilustração, no próximo capítulo, são confrontados dados provenientes do sistema de

medição com aqueles provenientes do LLS e que tiveram origem no mesmo fenômeno associado a uma descarga atmosférica.

Com o intuito de se evitar que registros não sejam efetuados durante uma tempestade, face à relativa escassez de eventos de interesse ao longo do ano, a Estação do Morro do Cachimbo fica ligada em tempo integral. Em caso de *blackout*, a energia para alimentação do sistema passa a ser fornecida por baterias. É possível, então, monitorar-se a todo instante as grandezas de interesse. Nada é perdido. Em períodos nos quais a probabilidade de ocorrência de tempestades é muito baixa, desliga-se o sistema e retiram-se os equipamentos do campo, para manutenção e preservação dos mesmos.

Encerra-se aqui o capítulo. No capítulo seguinte, são apresentados os resultados preliminares obtidos.

4 Resultados Preliminares

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os primeiros resultados obtidos pelo Sistema de Medição implementado. Foi feita uma seleção dos melhores dados registrados. Estes foram coletados no período que vai de dezembro de 2005 a março de 2006.

Vale ressaltar que o sistema foi colocado em funcionamento em meados de dezembro de 2005. Logo, foram perdidas muitas tempestades relativas a esta temporada de chuvas, a qual, a partir de outubro, apresentou algumas tempestades com elevada incidência de descargas atmosféricas nas redondezas da Estação do Morro do Cachimbo.

A partir de março de 2006, não foram registradas fortes tempestades nas vizinhanças da estação. Assim sendo, não há bons registros nesse período, embora o sistema tenha sido mantido em funcionamento.

4.2 Forma de Apresentação dos Dados Registrados

Conforme apresentado no Capítulo 3, o Sistema de Medição opera com duas placas de aquisição, uma rápida (10 μ s) e outra lenta (100 μ s). Ambos os registros gerados por cada uma das placas são importantes, porém, aquele gerado pela placa rápida, do ponto de vista de análise física do fenômeno, é mais importante. O registro proveniente da placa lenta serve mais como uma forma de se visualizar o fenômeno como um todo, sem ser muito detalhista com os pormenores do sinal coletado. Assim sendo, quase todos os gráficos apresentados neste capítulo são gerados pela placa rápida.

Os dados apresentados foram divididos em dois subconjuntos contendo os registros mais interessantes obtidos na primeira temporada de chuvas na qual o Sistema de Medição esteve em operação.

Em relação ao primeiro subgrupo, o qual é mais rico em medições por evento detectado, serão ilustradas todas as formas de onda obtidas. Para cada disparo do sistema, serão apresentados gráficos completos das variações lentas de campo elétrico, isto é, registros com 300 ms de amostragem, sendo os primeiros 100 ms referentes ao período anterior ao disparo.

Ampliando-se a escala de tempo do registro, ou seja, fazendo-se um *zoom* nos pontos de interesse, são mostrados os gráficos da variação rápida de campo elétrico, elevação de tensão no aterramento da torre e corrente no condutor de descida desta, nos instantes vizinhos ao momento do fluxo da corrente de retorno, seja da primeira descarga ou de uma subsequente. Isso é feito em razão desses três parâmetros supracitados serem vistos como “pulsos” (numa escala de tempo total de 300 ms) associados aos tempos das correntes de retorno. Nos períodos entre correntes de retorno e surgimento de um canal (ascendente ou descendente), tais parâmetros são, praticamente, nulos.

São também apresentadas figuras com o posicionamento da torre da Estação do Morro do Cachimbo e da descarga atmosférica registrada, com o intuito de se facilitar a análise dos dados obtidos. A apresentação é feita em ordem cronológica dos eventos.

Junto a cada figura, há ainda os dados relativos à descarga atmosférica em foco fornecidos pelo LLS. Esses dados consistem em dia, horário (GMT), distância da torre,

corrente máxima e coordenadas (latitude e longitude) do ponto de incidência estimado para a descarga.

Quanto ao segundo subconjunto, são apresentados apenas registros de variação lenta do campo elétrico por evento. Os dados fornecidos pelo LLS também são relatados, para uma descrição mais detalhada do evento. São também apresentados dados equivocadamente discriminados pelo LLS como relativos a descargas nuvem-solo, juntamente à medição de variação lenta de campo elétrico do fenômeno que a gerou, a título de curiosidade, para se demonstrar um problema inerente ao LLS.

4.3 Registros Selecionados

A seguir, são apresentados os dois subconjuntos dos registros mais interessantes obtidos.

4.3.1 Primeiro Subconjunto

O primeiro subconjunto é mostrado conforme descrito no item anterior, ou seja, ilustrando as formas de ondas de todos os registros que podem ser obtidos.

O primeiro registro apresentado, Figura 4.1, refere-se a uma primeira descarga de retorno que aconteceu no dia 18/12/2005. Segundos dados do LLS, o horário no qual ela ocorreu foi 19:31:40,023 h, a uma distância de 3,1 km da torre, num ponto de coordenadas $-19,9882^\circ$ e $-43,9931^\circ$ de latitude e longitude, respectivamente. A corrente máxima teve um valor estimado de -33 kA. O evento descrito também apresentou três descargas subseqüentes, segundo as variações bruscas visualizadas na curva (b).

Os sinais apresentados nas Figuras 4.1(c), (d) e (e), do ponto de vista das polaridades discutidas no Capítulo 3, estão de acordo uns com os outros. As formas de onda se mostram distorcidas, apesar de apresentarem aspectos similares.

Na Figura 4.2 são mostrados gráficos referentes a uma descarga subseqüente ocorrida no dia 19/12/2005. Ela aconteceu cerca de 117 ms após a primeira descarga de retorno, como pode ser visto na Figura 4.2(b). O LLS forneceu um horário para a subseqüente de 20:35:29,424 h, uma distância de 3,7 km da torre e uma localização de $-20,0388^\circ$ e $-43,9591^\circ$ de latitude e longitude, respectivamente. Sua corrente foi de -19 kA.

Com relação ao registro de corrente na torre, Figura 4.2(d), nada além de ruídos é observado.

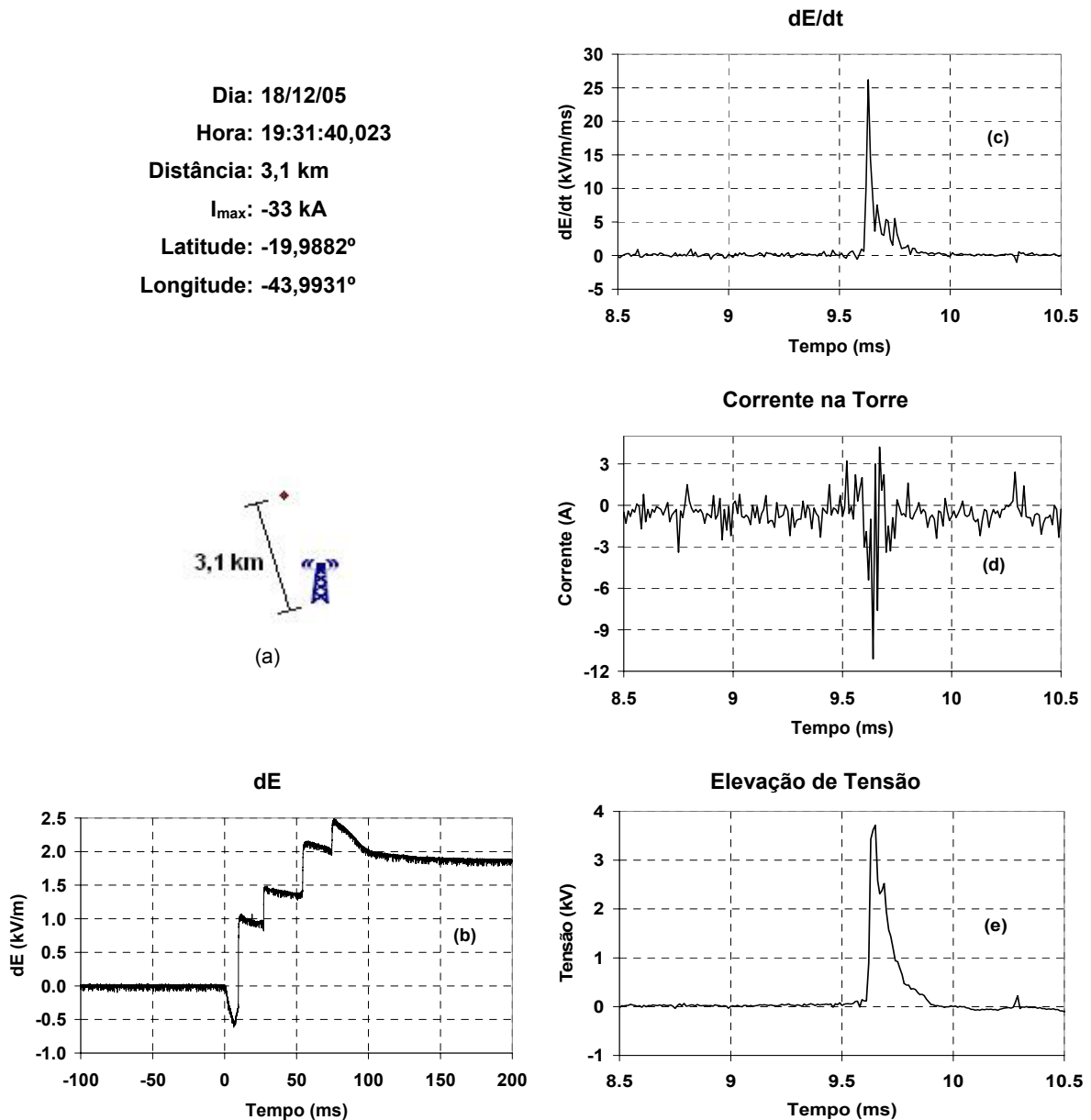


Figura 4.1 – Gráficos relativos ao registro “20051218_193140_01315_B_fast_000.CSV”.

Quanto à descarga atmosférica mostrada, a idéia de se apresentarem gráficos referentes à descarga subsequente se deu em função das formas de onda da variação rápida do campo elétrico (Figura 4.2(c)) e da elevação de potencial no aterramento da torre (Figura 4.2(e)) possuírem aspectos semelhantes, porém, invertidos. Enquanto dE/dt é positiva, a tensão é negativa, e vice-versa.

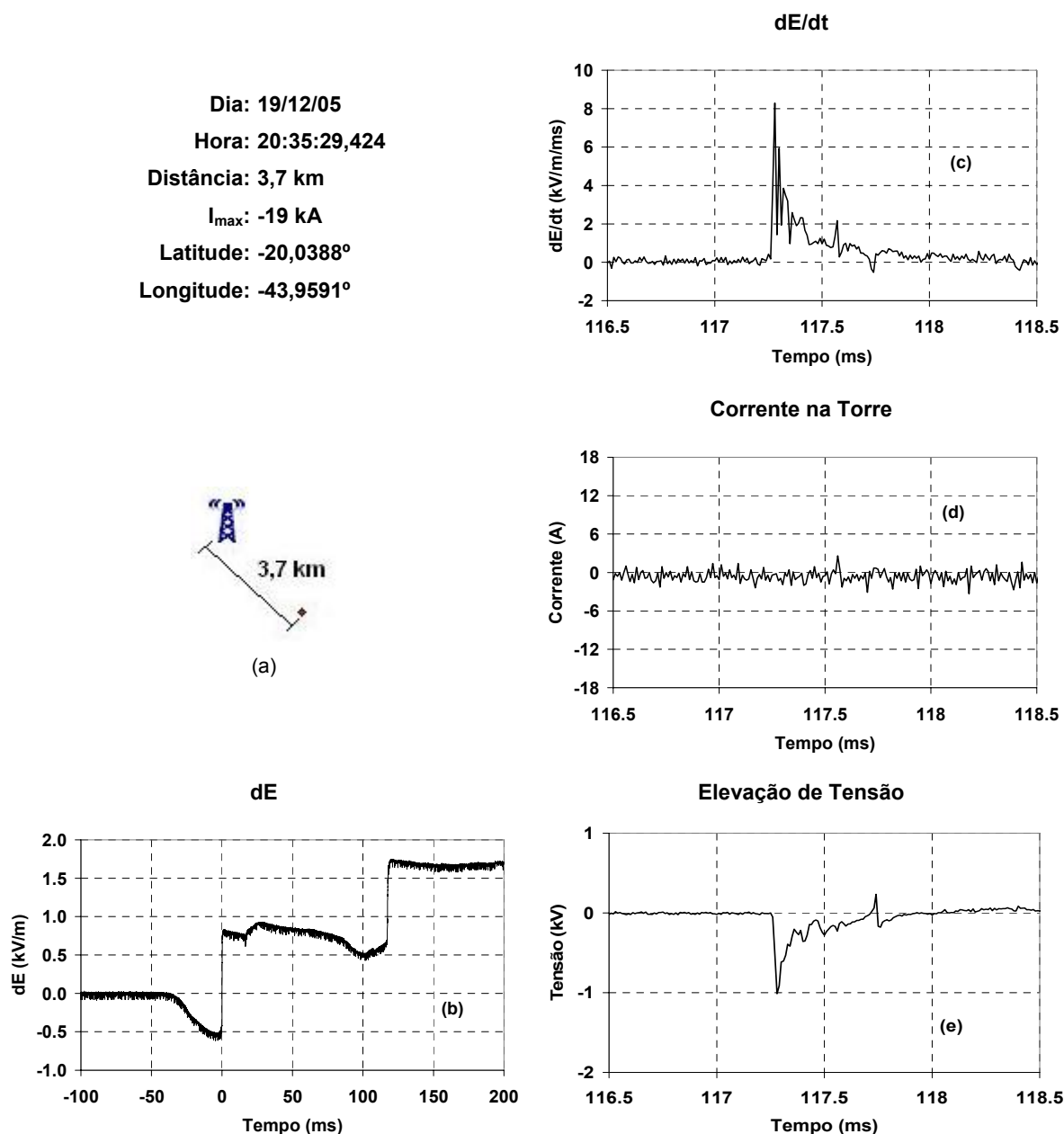


Figura 4.2 – Gráficos relativos ao registro “20051219_203529_30704_B_fast_000.CSV”.

A Figura 4.3 apresenta gráficos referentes a uma descarga atmosférica que aconteceu também no dia 19/12/2005, data de uma fortíssima tempestade nas redondezas da Estação do Morro do Cachimbo. O LLS forneceu um horário de 20:37:11,558 h, uma distância de 0,6 km da torre e uma localização de -20,0174° e -43,9772° de latitude e longitude. A corrente foi de -16 kA.

Com relação ao registro de corrente na torre, Figura 4.3(d), nada é observado além de ruídos. Os sinais da variação rápida do campo elétrico e da elevação de potencial no aterramento da torre apresentam polaridades contrárias.

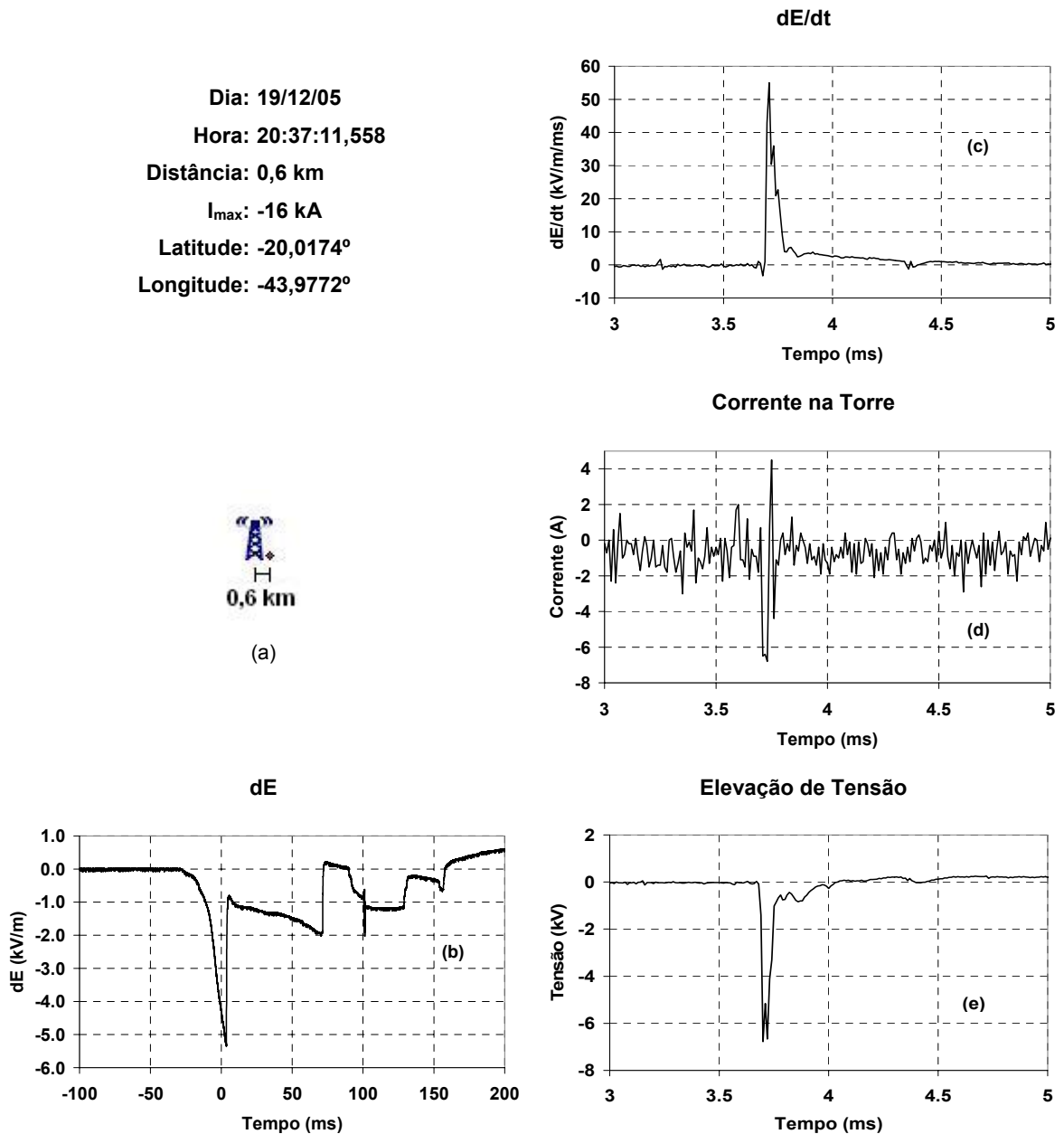


Figura 4.3 – Gráficos relativos ao registro “20051219_203711_89941_B_fast_000.CSV” .

Um ponto que merece destaque se refere ao instante de ocorrência da descarga atmosférica em questão. De acordo com o sistema de medição, tal instante seria algo próximo a 20:37:11,903 h. Por outro lado, o LLS forneceu 20:37:11,558 h. A diferença observada é grande. Porém, não há outros registros fornecidos pelo LLS e/ou pelo sistema de medição que se aproximem com relação aos tempos. Além disso, os valores estimados pelo LLS para a corrente e para o ponto de incidência estão de acordo com os registros

providos pelo sistema de medição. Acredita-se que os dados apresentados se refiram ao mesmo fenômeno¹.

Na Figura 4.4, podem ser vistos registros referentes a uma descarga ocorrida no dia 28/12/2005. Segundos dados do LLS, o horário foi 18:25:45,091 h, a distância, 2,4 km da torre, num ponto de coordenadas, latitude e longitude, iguais a $-20,0231^\circ$ e $-43,9604^\circ$. O valor da corrente foi de -19 kA.

Embora haja uma alteração no registro de corrente no momento do fluxo da corrente de retorno, pouco é observado na Figura 4.4(d). A forma de onda do sinal de tensão se apresenta bem distorcida quando comparada à de dE/dt , além de possuírem sinais opostos. Tal descarga atmosférica não apresentou descargas subseqüentes.

Um ponto interessante a ser destacado na Figura 4.4(e) é que o sinal de tensão, no início das variações, é negativo e, após 140 μ s, torna-se positivo, embora o sinal de dE/dt seja sempre positivo durante esse intervalo e os próximos milissegundos que sucedem tal variação, como apresenta a Figura 4.4(c).

A Figura 4.5 apresenta gráficos referentes à primeira descarga subseqüente do fenômeno que contou com mais duas descargas subseqüentes, como mostra a Figura 4.5(b), além da primeira descarga de retorno. A descarga em estudo aconteceu no dia 04/01/2006, às 21:29:29,792 h. Seu ponto de incidência, com coordenadas iguais a $20,0388^\circ$ e $-43,9591^\circ$ de latitude e longitude, respectivamente, foi a 4,5 km da torre. A corrente foi de -19 kA.

Embora a descarga tenha incidido a 1,2 km da torre e sua corrente tenha sido estimada em -14 kA, os efeitos da primeira descarga subseqüente foram mais intensos quanto à corrente medida no condutor de descida e à elevação de tensão no aterramento da torre. Por esse motivo não foram apresentados os dados relativos à primeira descarga de retorno.

¹ Para o evento em foco, apenas o registro da placa rápida foi gerado. O registro da placa lenta facilmente esclareceria a questão, indicando, caso houvesse uma descarga atmosférica como sugere o LLS, uma variação abrupta em dE não registrada pela placa rápida, em virtude do tamanho reduzido de sua janela (300 ms). A não geração deste arquivo é um indício de algum problema ocorrido, o que dá sustentação à afirmação feita no texto.

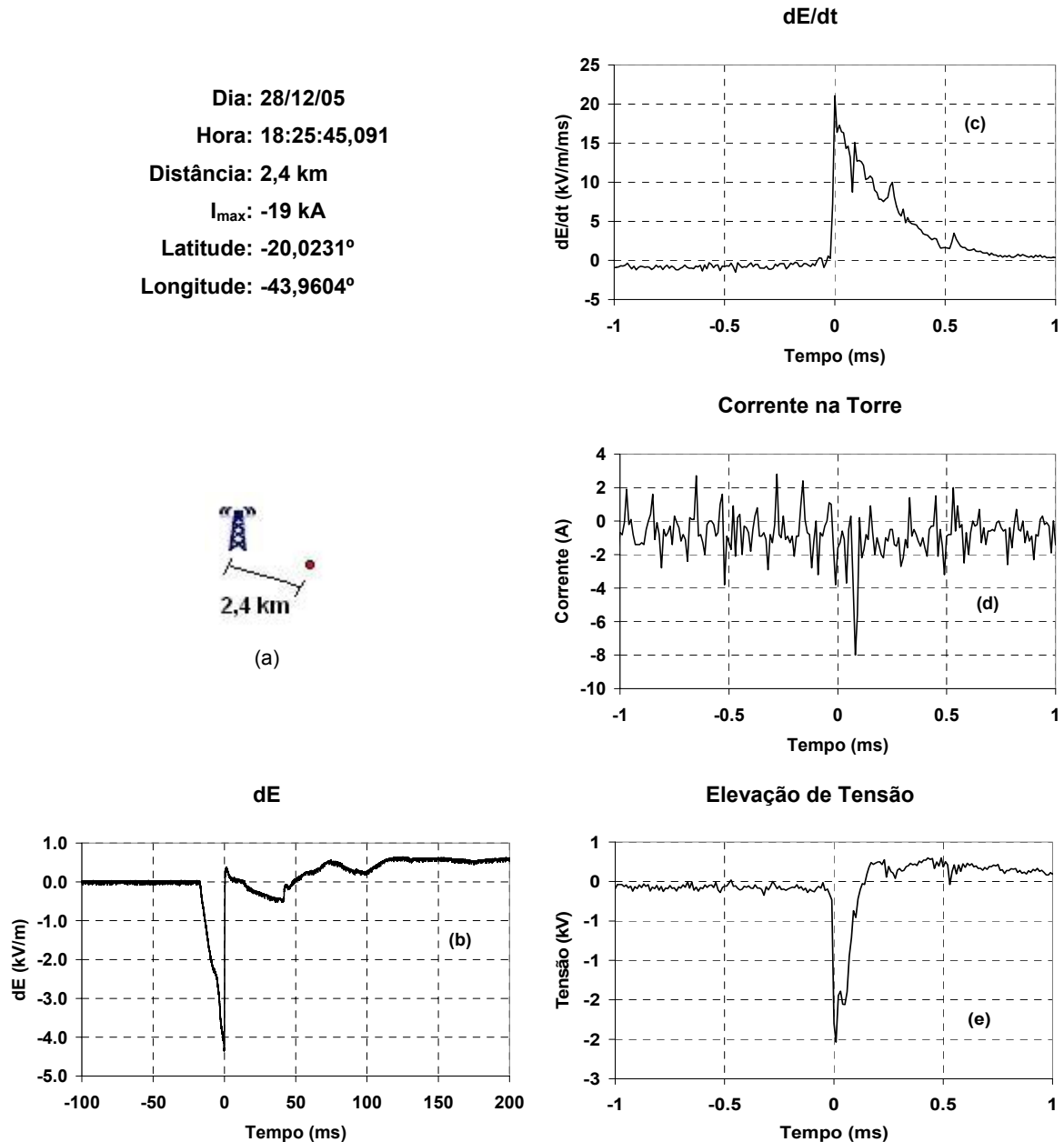


Figura 4.4 – Gráficos relativos ao registro “20051228_182545_09143_B_fast_000.CSV”.

As formas de onda obtidas (Figuras 4.5(c), (d) e (e)), embora muito diferentes entre si, apresentam polaridades coerentes. O registro de corrente na torre, apesar de apresentar uma alteração no momento do fluxo da corrente de descarga, não permite conclusões.

É interessante chamar a atenção para a Figura 4.5(b). Pelas acentuadas quedas nos níveis de dE após o fluxo das correntes de retorno, é possível observar que a constante de tempo da medição está alterada. Essa alteração pode ser atribuída à presença de umidade na base da antena ou no cabo coaxial e invalida a medição. Por

meio de uma comparação ilustrativa com a curva obtida por meio da integração numérica de dE/dt , alterando-se o valor da constante de tempo até que as duas curvas se sobreponham, chega-se a um valor de cerca de 90 ms para tal constante, o que provoca perda de componentes de freqüências inferiores a, aproximadamente, 1,8 Hz (f_c), que é um valor relativamente alto.

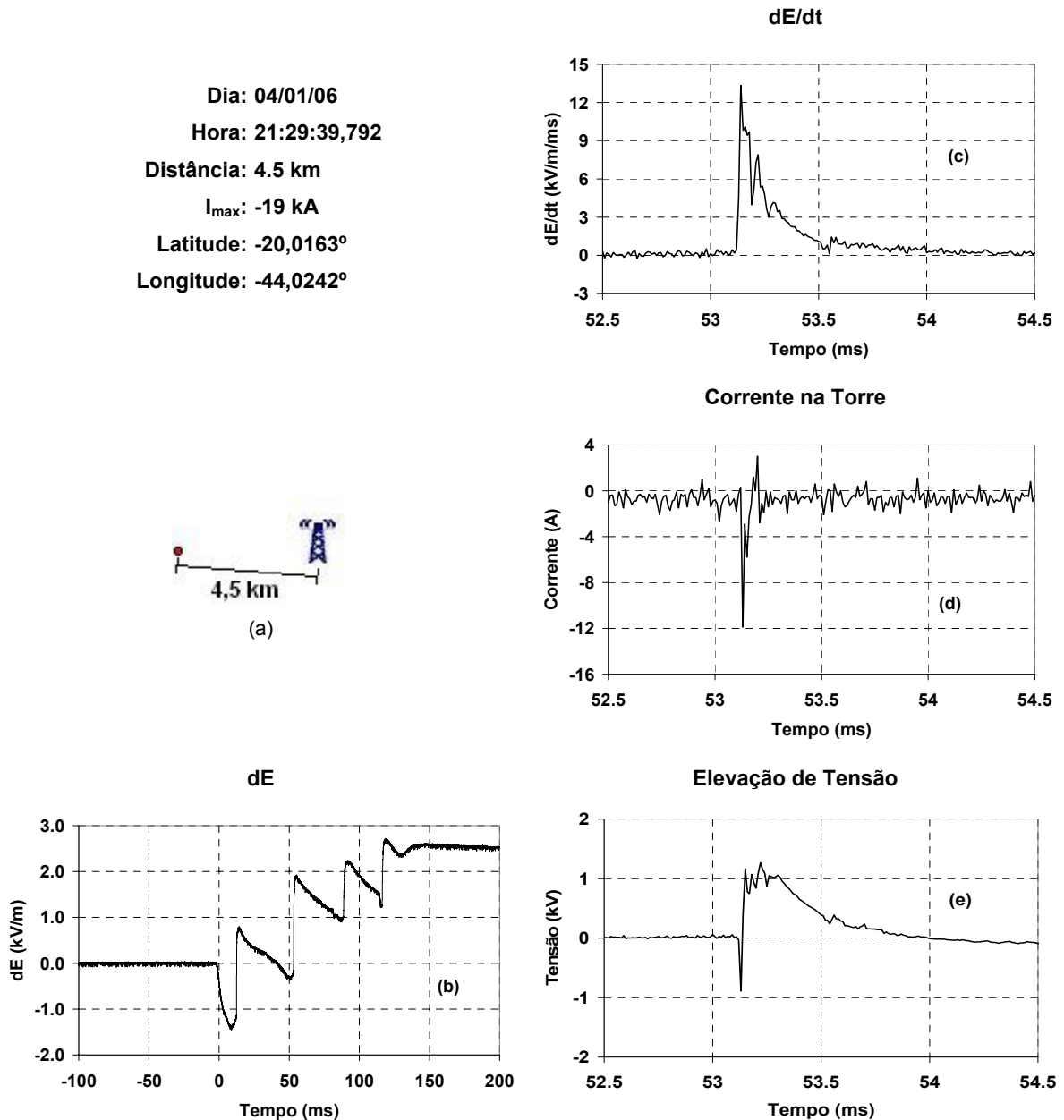


Figura 4.5 – Gráficos relativos ao registro “20060104_212939_73874_B_fast_000.CSV”.

No dia 07/01/2006, às 18:27:41,101 h, uma descarga atmosférica sem descargas subseqüentes foi registrada. Ela incidiu num ponto a 2,2 km de distância da torre. A latitude e longitude do ponto foram, respectivamente, -19,9932° e -43,9809°. O valor máximo da

corrente estimada foi de -19 kA. A Figura 4.6 ilustra os gráficos relativos a essa descarga atmosférica.

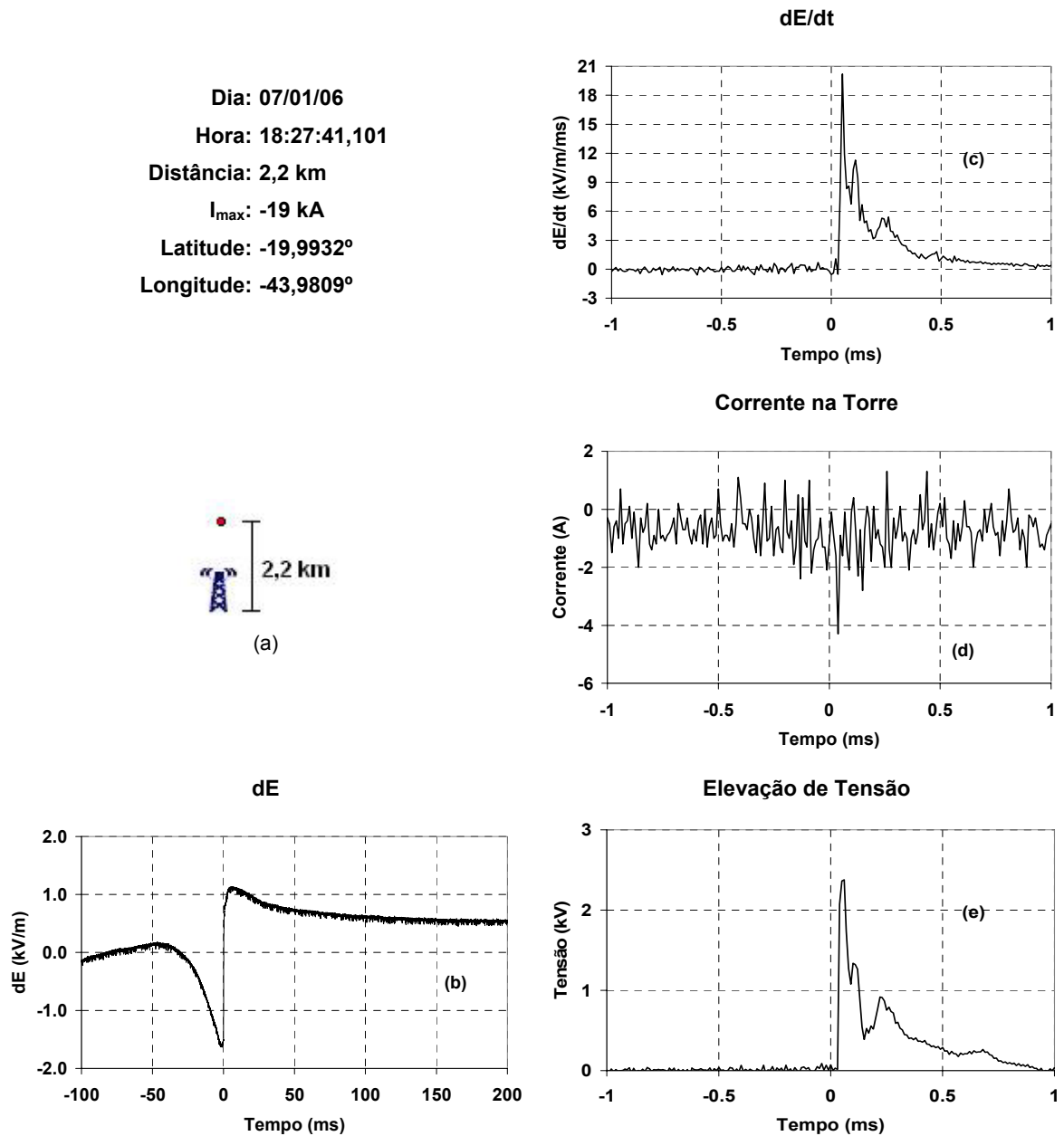


Figura 4.6 – Gráficos relativos ao registro “20060107_182741_10061_B_fast_000.CSV”.

Embora as formas de onda da variação rápida do campo elétrico e da elevação de tensão no aterramento da torre sejam próximas em formato uma da outra, nada foi detectado pelo medidor de corrente do tipo alicate, como pode ser visto na Figura 4.6(d). Mais uma vez, observa-se a mesma polaridade nos sinais de dE/dt e tensão desenvolvida no aterramento da torre (Figuras 4.6(c) e (e)).

No dia 29/01/2006, uma intensa descarga atmosférica aconteceu nas redondezas da estação. Dessa vez, os efeitos da corrente de retorno da primeira descarga foram, como na maioria das vezes, mais fortes que das subseqüentes. Assim, mereceram destaque os efeitos provocados por aquela corrente. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.7.

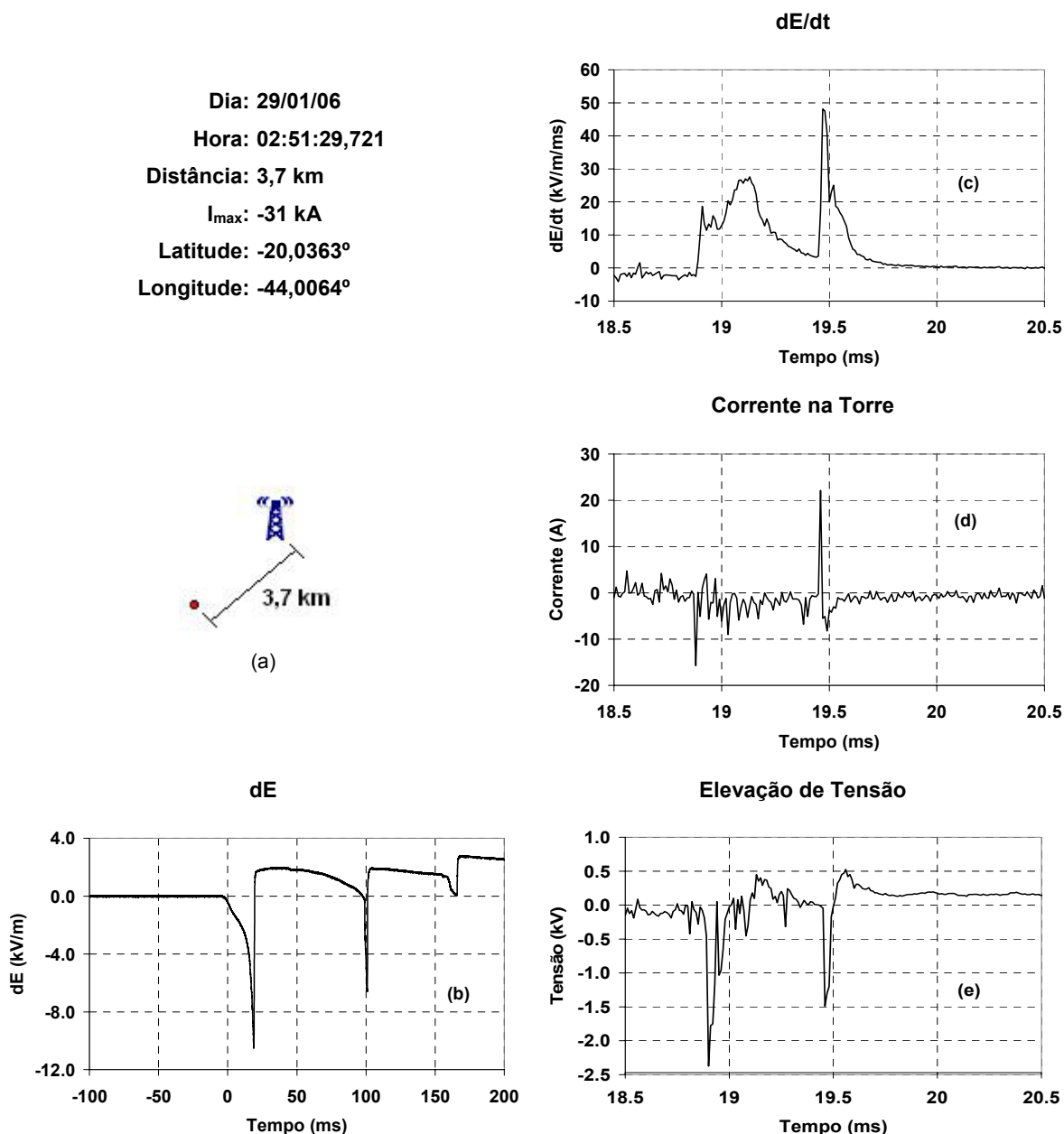


Figura 4.7 – Gráficos relativos ao registro “20060129_025129_70231_B_fast_000.CSV”.

A descarga atmosférica supracitada, com corrente estimada em -31 kA, incidiu a 3,7 km de distância da torre, às 02:51:29,721 h. Devido à intensidade do fenômeno, houve saturação na medição da variação lenta do campo elétrico, o que poderia ser facilmente percebido com uma ampliação da Figura 4.7(b), entre os instantes 18,5 e 20,5 ms.

Além das polaridades dos sinais de tensão e dE/dt serem opostas, as formas de onda se apresentam bem diferentes. Dois pulsos são observados no registro de corrente da Figura 4.7(d), porém, possuem polaridades diferentes entre si e não se mostram de acordo com a polaridade dos pulsos de tensão no aterramento da torre (Figura 4.7(e)).

A Figura 4.8 apresenta gráficos referentes a uma descarga atmosférica sem descargas subseqüentes que aconteceu no dia 08/02/2006. O LLS forneceu um horário de 18:49:25,812 h, uma distância de 0,5 km da torre e uma localização de $-20,0089^\circ$ e $-43,9814^\circ$ de latitude e longitude. A corrente foi de -18 kA.

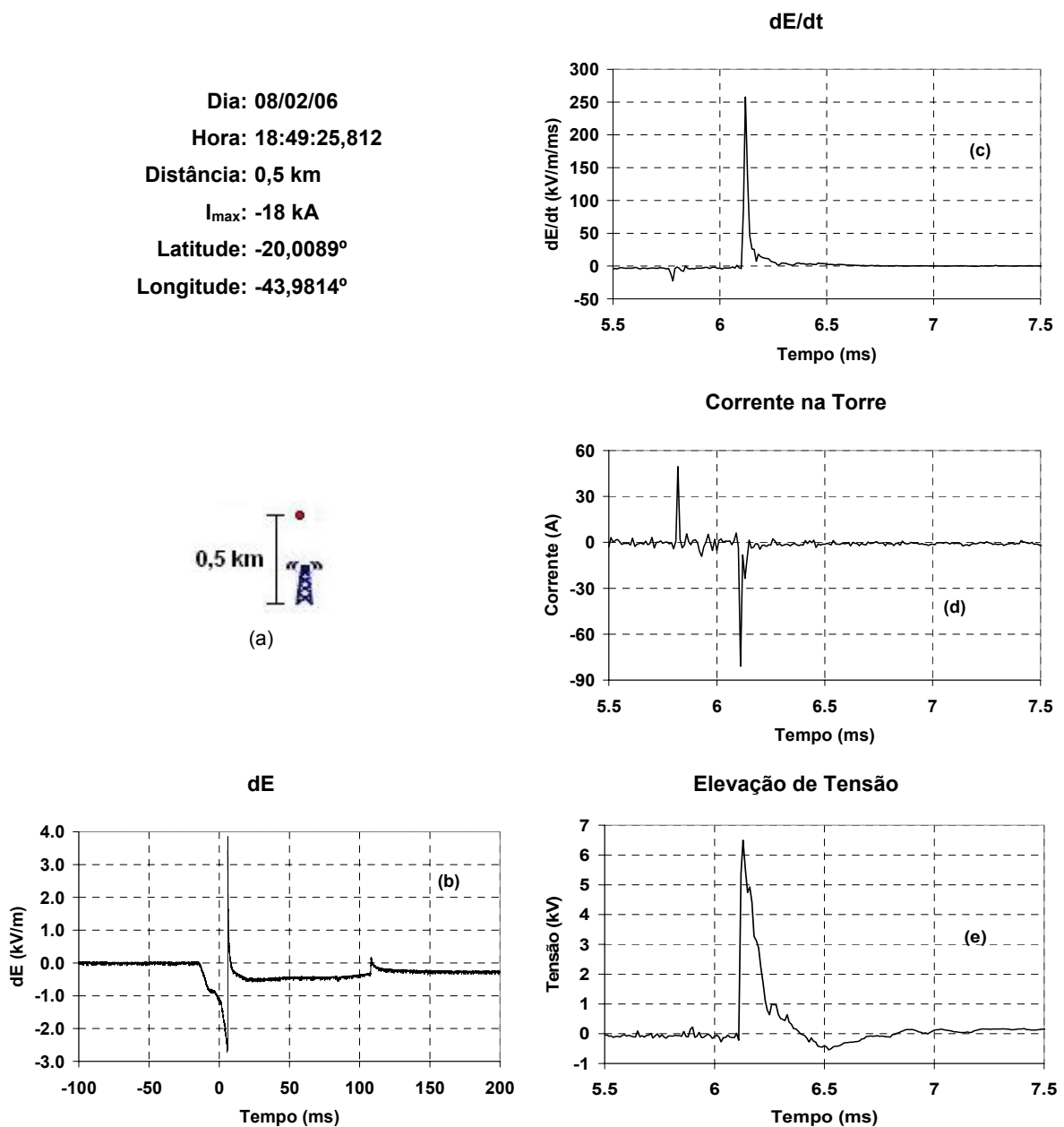


Figura 4.8 – Gráficos relativos ao registro “20060208_184925_80543_B_fast_000.CSV”.

Nessa figura, há saturação nos registros de dE/dt e corrente no condutor de descida da torre². A descarga em questão não apresentou uma corrente elevada, mas a pequena distância entre o ponto de incidência e a torre foi responsável por fortes efeitos nesta. Embora haja dois pulsos na medição de corrente (Figura 4.8(d)) as formas de onda observadas, de um modo geral, se mostram consistentes. O sinal de tensão, Figura 4.8(e), apresentou um perfil mais largo que o de dE/dt , Figura 4.8(c), e tornou-se negativo logo após o momento no qual dE/dt ficou nula.

12/02/2006 foi um dia de intensa atividade atmosférica nas redondezas da estação. Houve três registros interessantes e que estão presentes neste texto. O primeiro deles, com seus dados mostrados na Figura 4.9, ocorreu às 01:32:29,403 h, num ponto de latitude e longitude iguais a $-20,0292^\circ$ e $-43,9955^\circ$, respectivamente, a 2,3 km da torre. A corrente estimada foi de -27 kA.

Na descarga atmosférica em estudo, embora o perfil de dE (Figura 4.9(b)) varie bastante, não houve descargas subseqüentes. Tais variações podem ser atribuídas a canais que se formaram, mas não deram origem a uma nova descarga, ou a alterações na posição dos centros de cargas na nuvem.

Ainda na Figura 4.9, observam-se formas de ondas similares entre a variação rápida do campo elétrico e tensão, embora haja nesta uma saturação que não pode ser vista na figura sem uma ampliação. As polaridades são contrárias. Mais uma vez, nada há no sinal de corrente da Figura 4.9(d).

O segundo registro destacado do dia 12/02/2006, ocorrido às 01:34:52,206 h, ou seja, a pouco mais de 2 minutos do registro anterior, incidiu a 1 km da torre. Latitude e longitude, respectivamente, foram iguais a $-20,0186^\circ$ e $-43,9733^\circ$. A corrente, por sua vez, foi estimada em -15 kA. Os resultados dessa descarga atmosférica podem ser vistos na Figura 4.10.

Na Figura 4.10(b), notam-se que os comentários feitos à Figura 4.9(b) são pertinentes a este caso. Assim sendo, a segunda descarga atmosférica sem subseqüentes do dia 12/02/2006 produziu efeitos semelhantes aos da primeira descarga do dia na

² Embora a saturação não seja visível nas Figuras 4.8(c) e (d), na forma de um patamar de tensão constante, paralelo ao eixo dos tempos, ela existe. Em ambos os casos, foram registrados pela placa de aquisição rápida, durante um curto intervalo de tempo, sinais com tensão igual ou superior a 10 V, o qual é o limite máximo suportado pelas placas.

estação com relação aos registros de dE/dt , corrente na torre e tensão no seu aterramento, os quais podem ser vistos nas Figuras 4.10(c), (d) e (e), respectivamente. A diferença entre os dois casos em comparação é que, no segundo, há saturação³ no sinal de tensão no aterramento da torre. Embora a corrente neste caso seja bem inferior (-15 kA contra -27 kA do primeiro caso), a distância bem menor (1,0 km no segundo caso frente a 2,3 km no primeiro) aqui foi responsável por tais efeitos.

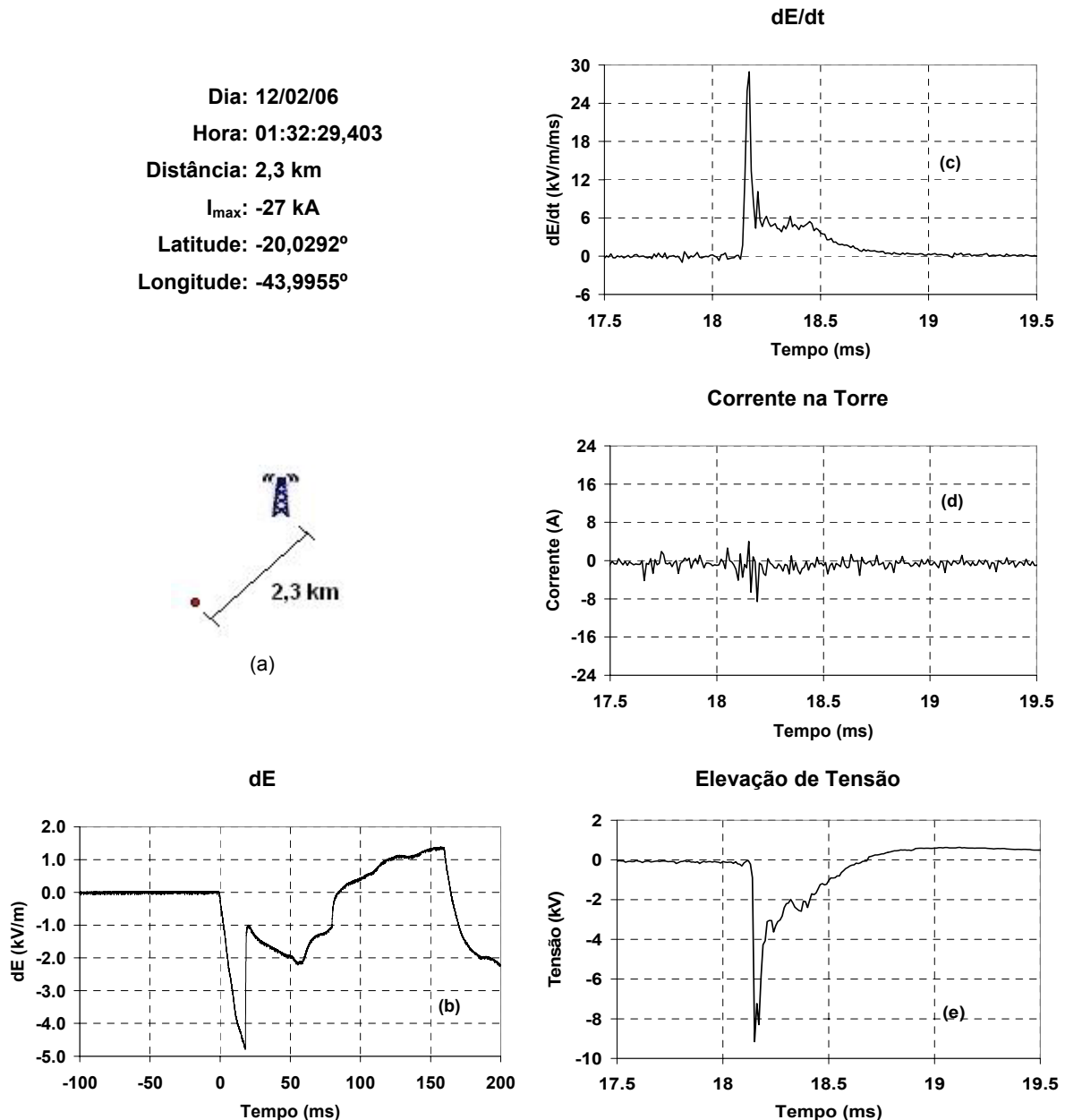


Figura 4.9 – Gráficos relativos ao registro “20060212_013229_38447_B_fast_000.CSV”.

³ Idem nota de rodapé 2.

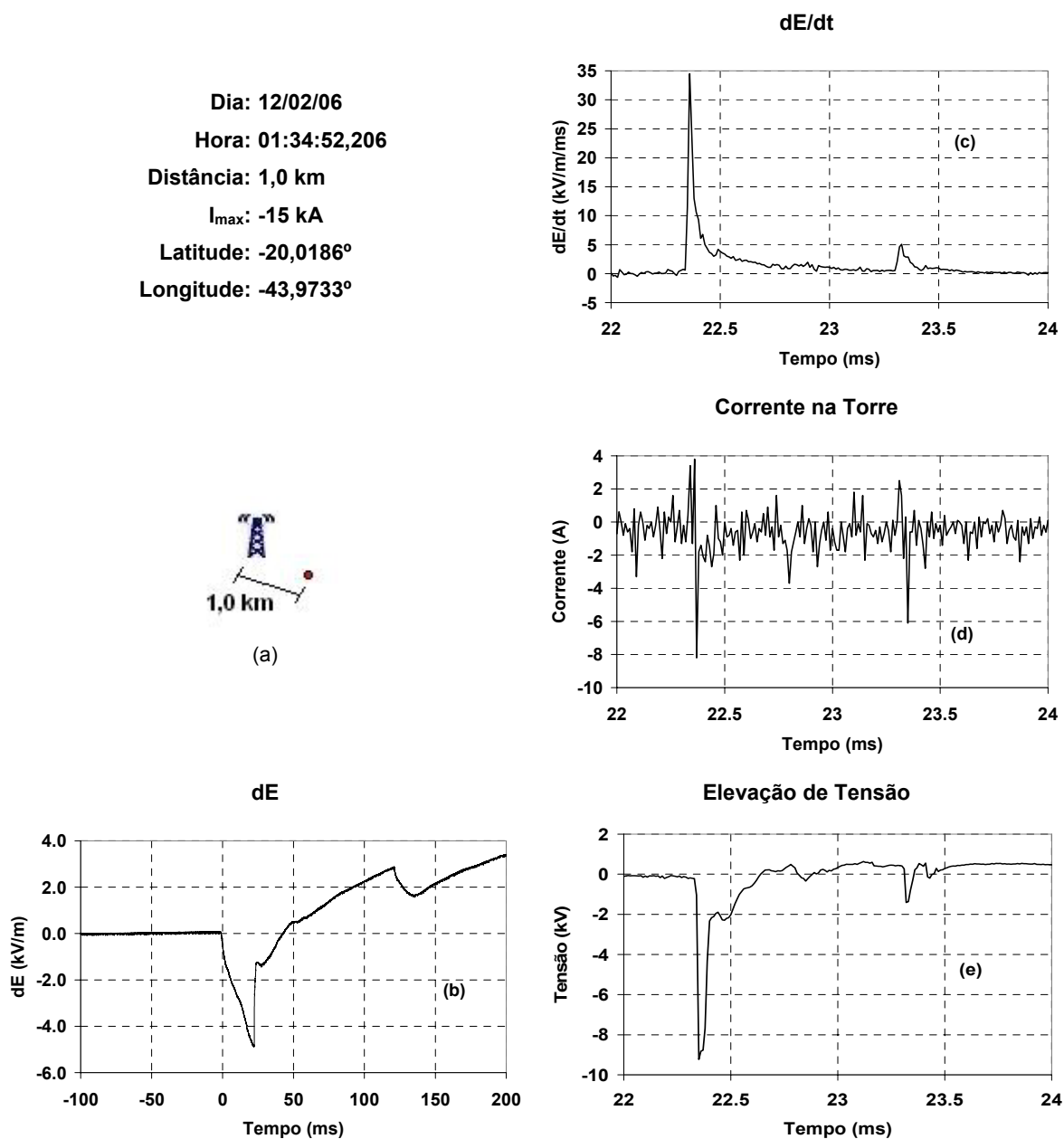


Figura 4.10 – Gráficos relativos ao registro “20060212_013452_18364_B_fast_000.CSV”.

Finalizando os registros de interesse do dia 12/02/2006, aparece aquele que ocorreu às 17:58:29,621 h, ou seja, a cerca de 16 h após os dois primeiros casos. A Figura 4.11 apresenta os resultados do fenômeno.

Ao contrário dos dois primeiros casos, este apresentou uma descarga subsequente. Por provocar efeitos mais severos na torre, a descarga subsequente foi quem teve seus registros analisados.

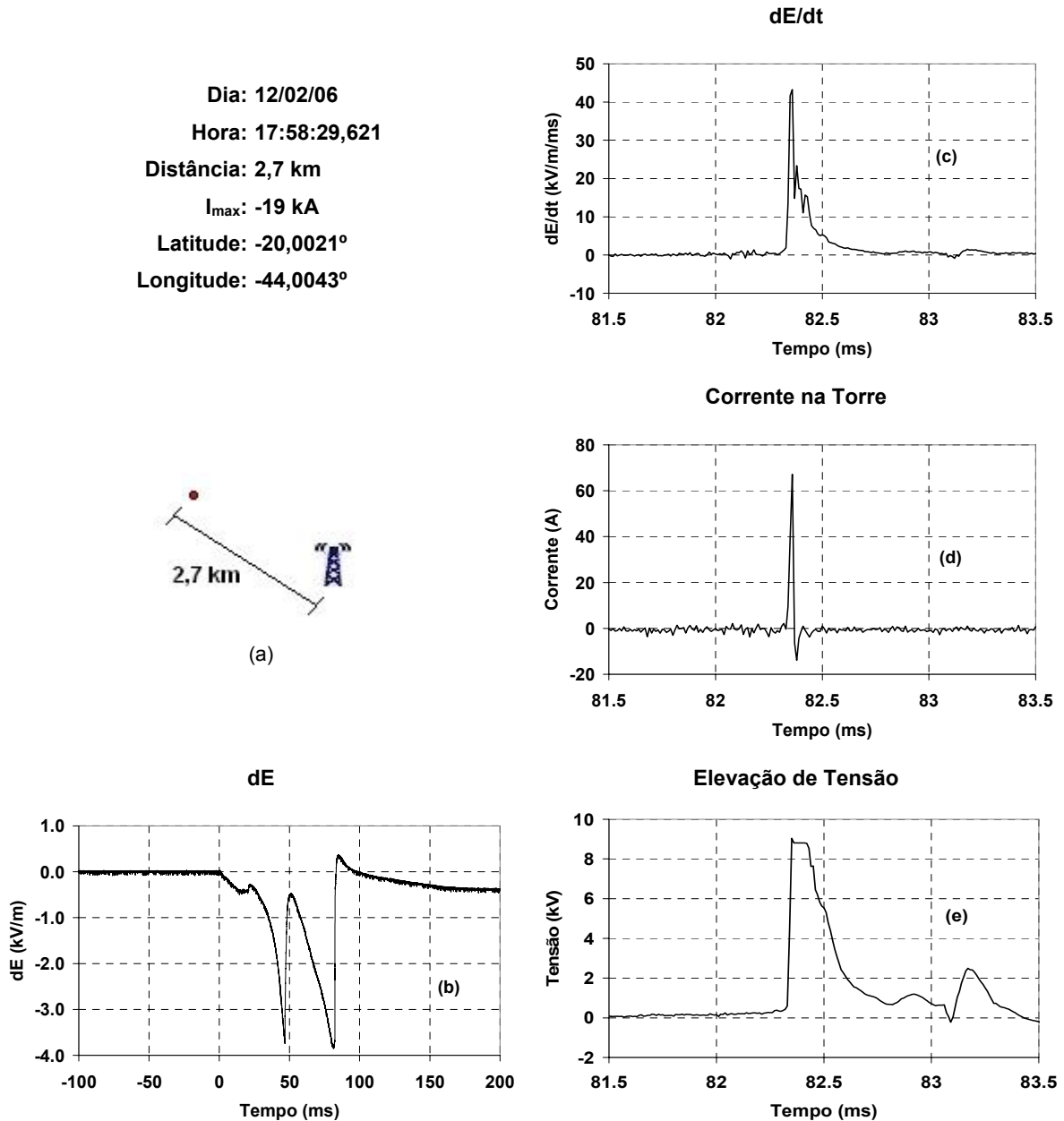


Figura 4.11 – Gráficos relativos ao registro “20060212_175829_53825_B_fast_000.CSV”.

Incidindo num ponto de latitude e longitude iguais a $-20,0021^\circ$ e $-44,0043^\circ$, respectivamente, a 2,7 km da torre, a descarga subsequente teve sua corrente estimada em -19 kA. Pela intensidade dos efeitos provocados na estação, ou seja, saturação nos registros de tensão no aterramento e corrente na torre, pode-se dizer que o valor da distância ou da corrente fornecidos pelo LLS não condizem com a realidade.

As formas de onda das Figuras 4.11(c), (d) e (e) apresentam formatos distintos entre si, e os registros de tensão e corrente não apresentam polaridades coerentes. A forma de onda da Figura 4.11(e), em particular, apresenta um formato bem diferente do

que foi visto até então, sugerindo um efeito de indução de tensão no cabo que conduz o sinal ao terra remoto devido à corrente de descarga. Essa tensão induzida seria responsável pela saturação por um intervalo de tempo. Tal efeito ainda não fora observado em outros casos.

A Figura 4.12 apresenta gráficos de uma descarga atmosférica sem descargas subseqüentes, ocorrida no dia 01/03/2006. O horário registrado foi de 16:13:15,730 h, e a corrente estimada, -38 kA. A 2,9 km de distância da torre, o ponto de incidência teve como coordenadas $-19,9911^\circ$ e $-43,9958^\circ$.

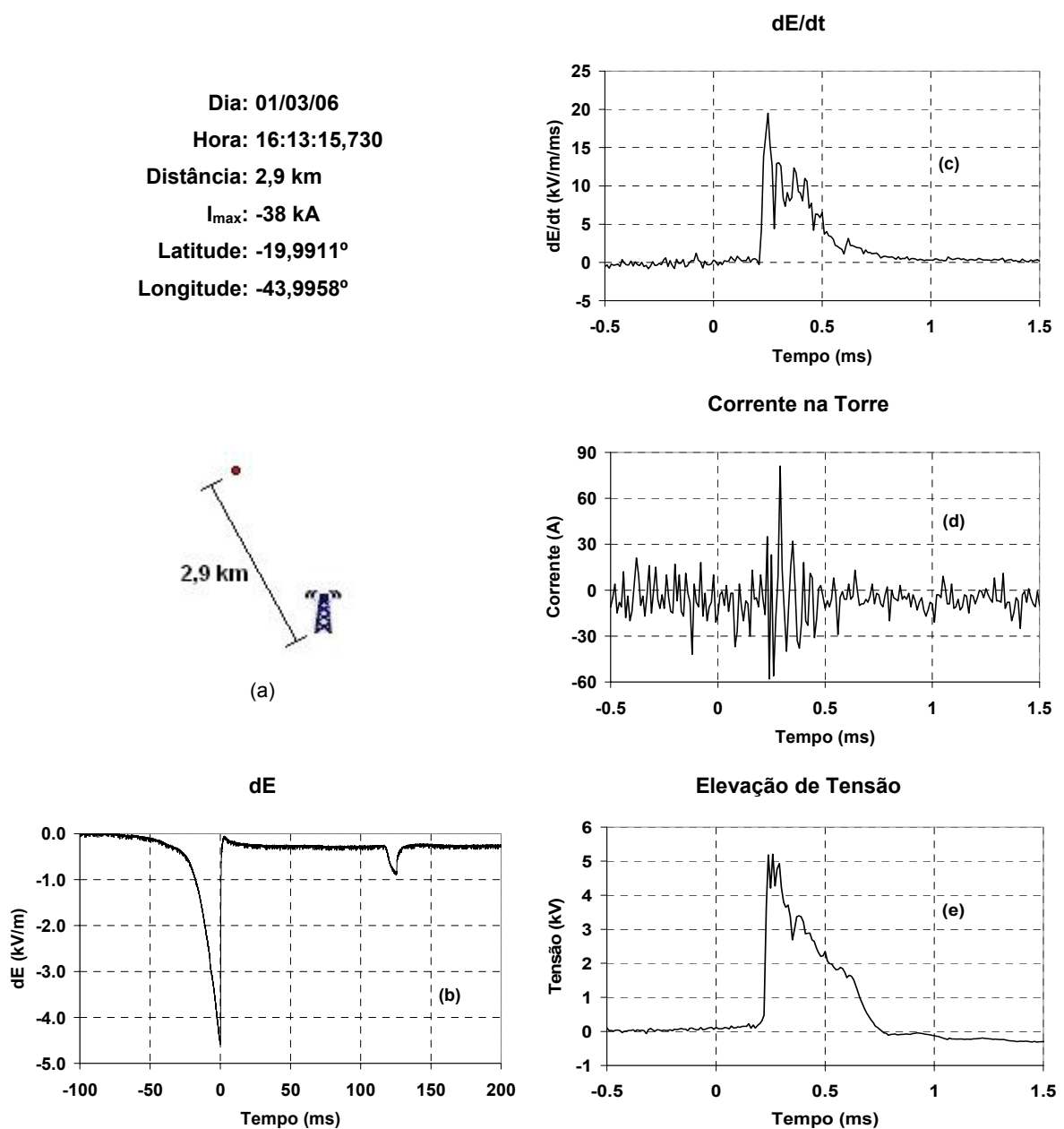


Figura 4.12 – Gráficos relativos ao registro “20060301_161315_98977_B_fast_000.CSV”.

Embora um pouco distorcida quando comparada à forma de onda da variação rápida de campo elétrico, Figura 4.12(c), o sinal da Figura 4.12(e) se aparenta com aquele. Nenhum dos dois está de acordo com o registro de corrente da Figura 4.12(d), que nada apresenta, além de ruídos. É interessante observar que o nível do ruído nesta figura se encontra mais elevado do que aquele até então verificado. Isso aconteceu porque a escala do medidor alicate foi alterada para 1 mV/A.

A perturbação no campo que ocorre entre 100 e 150 ms na Figura 4.12(b) não se caracteriza com uma descarga subsequente. Aparentemente, é apenas uma alteração na posição das cargas na nuvem ou um pequeno canal que se iniciou, mas não apresentou um campo elétrico na sua ponta capaz de sustentar sua evolução.

Nesse caso também é observada uma discrepância com relação aos instantes de ocorrência da descarga atmosférica fornecidos pelo sistema de medição e pelo LLS. Mais uma vez não foi gerado o arquivo da placa lenta, capaz de elucidar a dúvida, e o mesmo comentário feito em relação à Figura 4.3 se adequa a esta questão.

Para finalizar a apresentação do primeiro subconjunto de registros da dissertação, vem a Figura 4.13. Nela, são ilustrados gráficos relativos a uma descarga atmosférica pouco intensa e sem subsequentes, como mostra a Figura 4.13(b). Ela ocorreu no dia 20/03/06, às 19:07:37,434 h. Com uma corrente estimada em -12 kA, incidiu a 1,8 km da torre, num ponto de coordenadas, latitude e longitude, iguais a -20,0053° e -43,9957°.

Em nenhum desses registros houve saturação. As formas de onda de dE/dt e tensão tiveram polaridades iguais, embora com formatos um pouco diferentes entre si. Além de um único pulso no momento exato da corrente de retorno e ruídos, nada foi observado no registro de corrente, Figura 4.13(d).

Um comentário comum a todos os registros apresentados é que, antes do fluxo da corrente de retorno, há um acréscimo negativo na intensidade do campo elétrico⁴, o que pode ser notado nos gráficos de variação lenta dE . Esta alteração pode ser explicada pela propagação/aproximação de um canal descendente, o qual é responsável por provocar um aumento no módulo do campo elétrico ambiente próximo ao nível do solo. Assim, todos os registros até agora apresentados são de descargas atmosféricas descendentes negativas.

⁴ A expressão “acrécimo negativo” é utilizada para manter a coerência com a convenção de polaridades empregada nesta investigação.

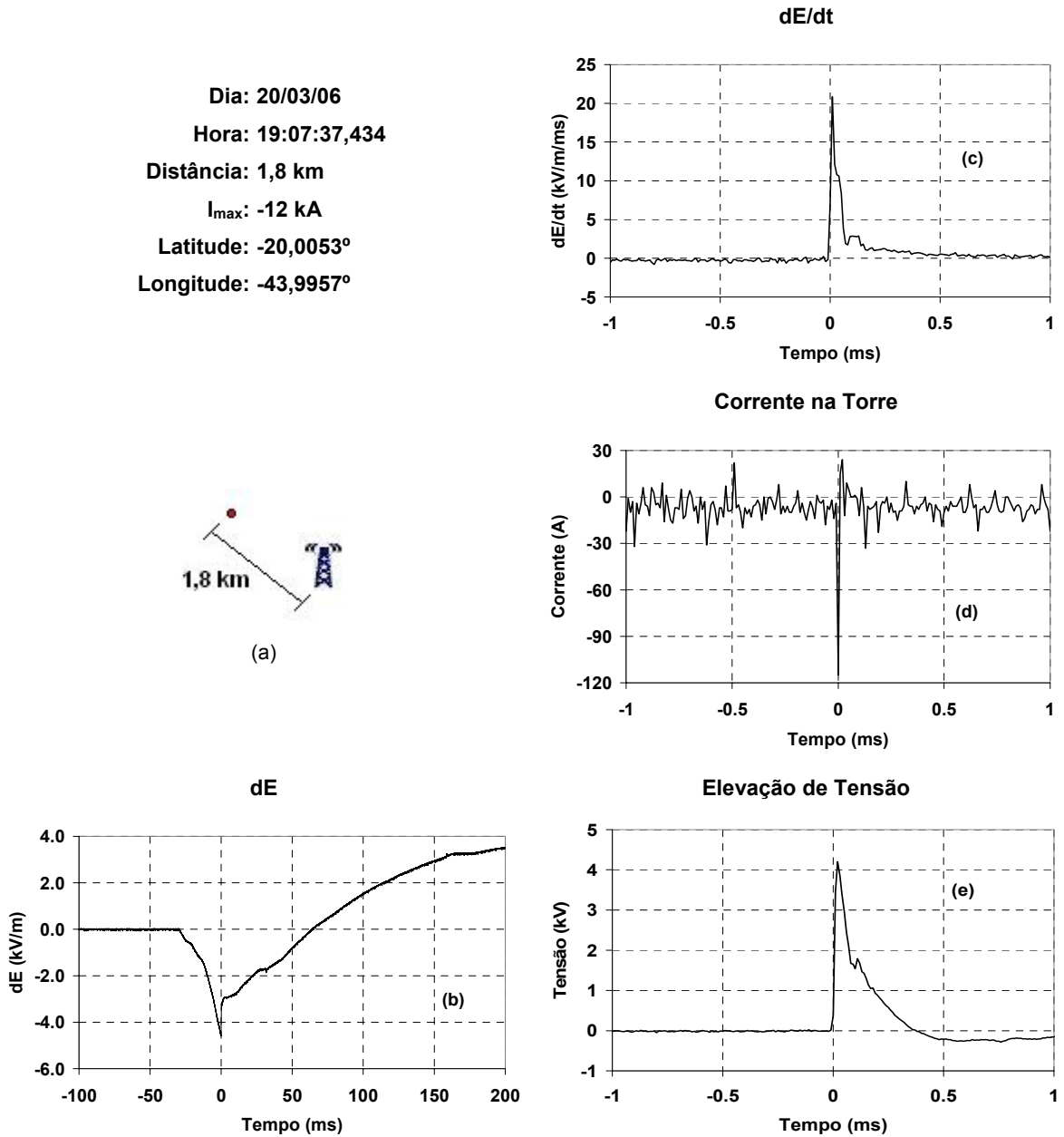
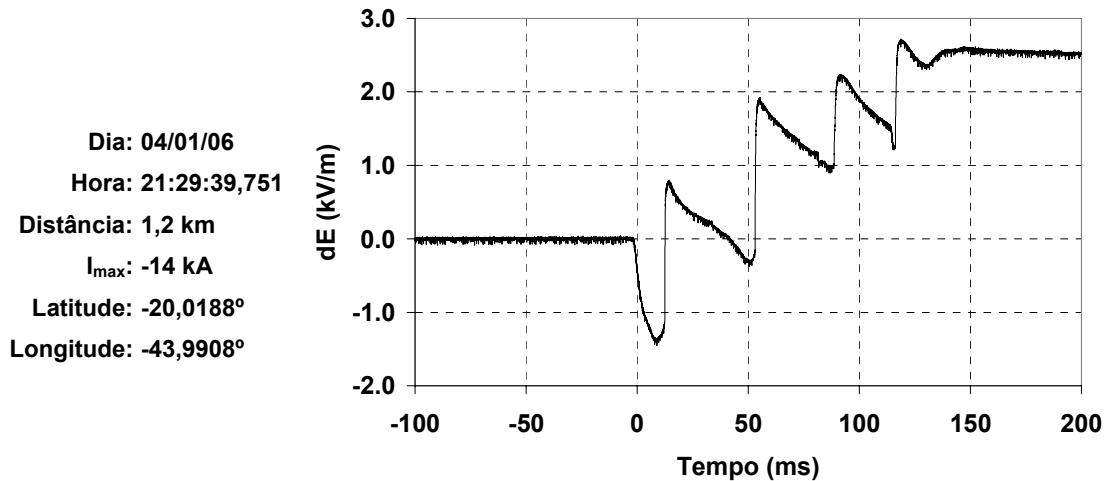


Figura 4.13 – Gráficos relativos ao registro “20060320_190737_43409_B_fast_000.CSV”.

4.3.2 Segundo Subconjunto

O segundo subconjunto de dados traz apenas a medição da variação lenta do campo elétrico associado à descarga atmosférica ou canal ascendente. Tem como objetivo apresentar o perfil de campo elétrico de descargas atmosféricas incidentes a diferentes distâncias da Estação do Morro do Cachimbo, bem como de canais de descarga. O primeiro perfil é o ilustrado na Figura 4.14.



**Figura 4.14 – Variação lenta do campo elétrico relativo ao registro
 “20060104_212939_73874_B_fast_000.CSV”.**

Na figura acima, encontra-se uma medição referente a uma descarga atmosférica, cuja intensidade da corrente de retorno foi de -14 kA. Houve três descargas subseqüentes, as quais podem ser observadas nos tempos iguais a, aproximadamente, 50, 90 e 120 ms. A primeira descarga incidiu a 1,2 km da torre do Morro do Cachimbo. É interessante notar que, antes do fluxo da corrente de retorno, o campo elétrico ambiente negativo aumentou em cerca de 1,2 kV/m, possivelmente em função da aproximação do canal precursor de descarga. O fluxo da corrente de retorno foi responsável por um incremento no campo elétrico próximo de 2 kV/m. Embora a intensidade da corrente tenha sido baixa, a pequena distância dos sensores ao ponto de incidência explica a variação no campo elétrico ambiente.

O mesmo comentário que foi feito à Figura 4.5(b) pode ser aplicado à Figura 4.14. Comparando-se esse registro com a curva obtida por meio da integração de dE/dt , chega-se a um valor de cerca de 70 ms para a constante de tempo ($f_c \cong 2,3$ Hz).

Na Figura 4.15, encontra-se uma medição referente a uma descarga atmosférica cuja intensidade da corrente de retorno foi de -53 kA. Ela incidiu a 5,3 km da torre do Morro do Cachimbo, e não houve descargas subseqüentes. É interessante notar que, após o fluxo da corrente de retorno, o campo elétrico continuou aumentando nas próximas centenas de milissegundos. Tal comportamento pode ser explicado pela propagação, posteriormente à corrente de retorno, de um canal ascendente que não chegou a dar origem a uma descarga subseqüente.

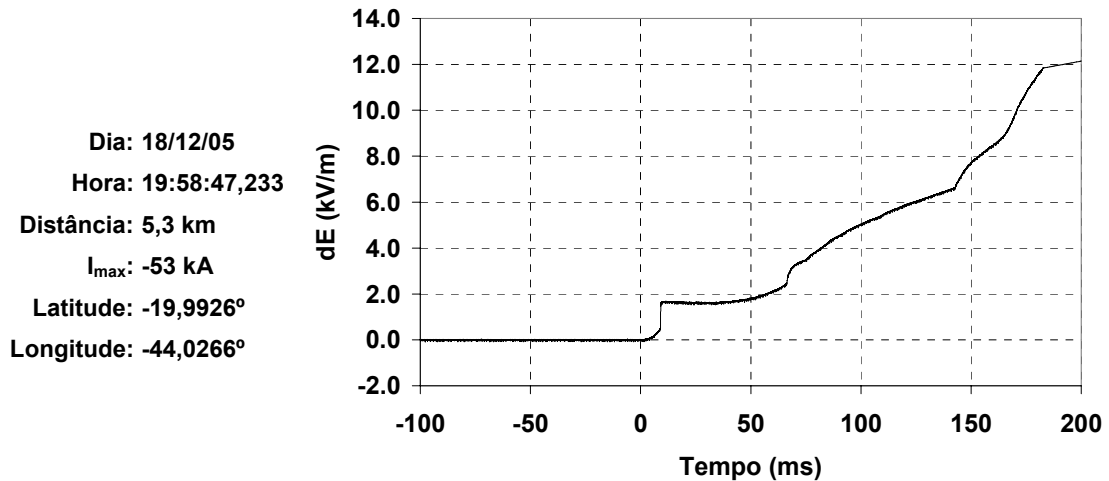


Figura 4.15 – Variação lenta do campo elétrico relativo ao registro “20051218_195847_22417_B_fast_000.CSV”.

Um registro interessante está ilustrado na Figura 4.16. Um canal descendente, capaz de disparar o sistema⁵, pode explicar a queda de 1,5 kV/m no campo elétrico. A intensa corrente de retorno, -61 kA e a 4,1 km, incrementou o campo elétrico em cerca de 3 kV/m. Após o fluxo da corrente de retorno, a 15 ms, no gráfico, podem ser observadas variações no campo elétrico. Em 70 ms, a queda brusca no campo elétrico, embora pequena, sugere um fluxo de corrente positiva, apesar do LLS não ter gerado nenhum registro com essas características. Talvez, uma pequena descarga intranuvem possa ter provocado tal variação. Não se pode dizer que tal variação é função de um canal descendente, em virtude de seu curto intervalo de tempo. A segunda variação observada, em cerca de 130 ms, pode ser consequência de um canal descendente. A diferença entre as duas variações é nítida.

A Figura 4.17 apresenta um registro de variação lenta de campo elétrico gerado em 18/12/2005, referente a uma descarga atmosférica com duas descargas subseqüentes. O ponto de interesse nessa figura é a primeira descarga de retorno, a qual apresentou uma intensidade de -60 kA e incidiu a cerca de 15 km da torre. O incremento no campo elétrico ambiente, próximo a 1 kV/m, só foi possível em função da elevada intensidade da corrente, face aos 15 km do ponto de incidência.

⁵ Tal disparo não deveria ter ocorrido neste momento. Trata-se de um problema no sistema de medição, uma vez que não foram observadas variações rápidas no campo elétrico, cuja tensão associada ultrapassasse o limiar de tensão pré-definido.

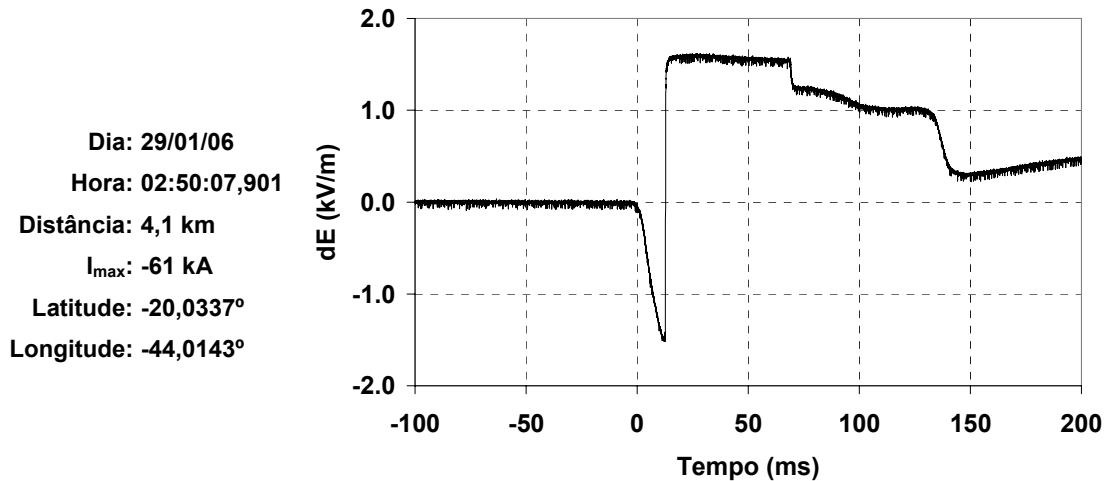


Figura 4.16 – Variação lenta do campo elétrico relativo ao registro
 “20060129_025007_88827_B_fast_000.CSV”.

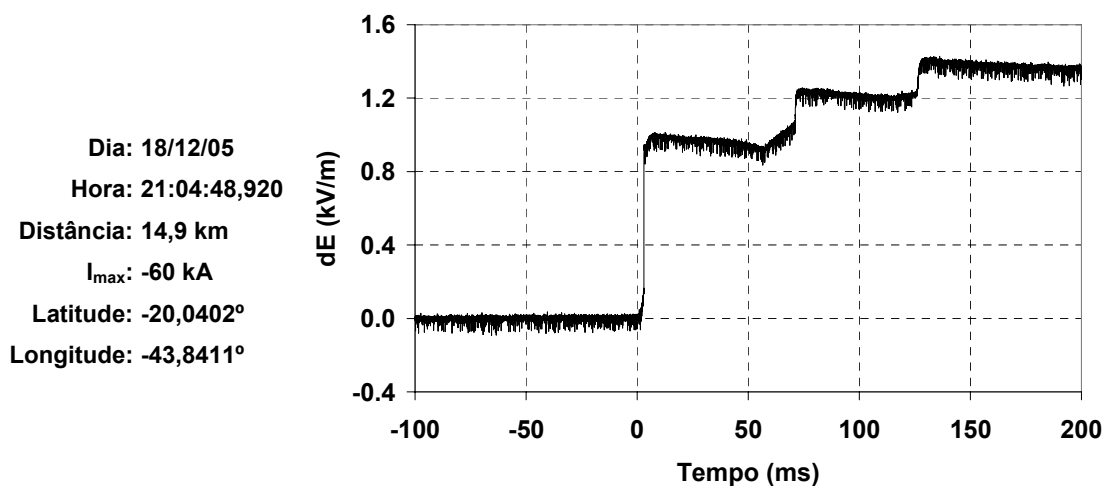


Figura 4.17 – Variação lenta do campo elétrico relativo ao registro
 “20051218_210448_91744_B_fast_000.CSV”.

Um registro que também merece destaque é o apresentado na Figura 4.18. Trata-se da medição de uma descarga atmosférica, sem subseqüentes, que incidiu a 17 km da torre durante uma grande tempestade que aconteceu no dia 29/01/2006. A intensidade da corrente, fornecida pelo LLS, é de -152 kA, ou seja, um valor extremamente elevado quando comparado com os observados na região (SCHROEDER, 2001) (VISACRO, 2004b). Após o fluxo da corrente, o qual provocou um aumento no campo de 1 kV/m, o campo elétrico continuou aumentando, como sugere o perfil da curva. Mesmo antes da corrente de retorno, o campo elétrico apresentava um comportamento crescente. Tal comportamento não foi observado em outros registros, já que, a uma distância como essa,

só mesmo uma corrente muito intensa para gerar um registro de boa qualidade, sabendo-se do problema de ruídos que o sistema enfrenta. Este assunto será discutido no próximo capítulo.

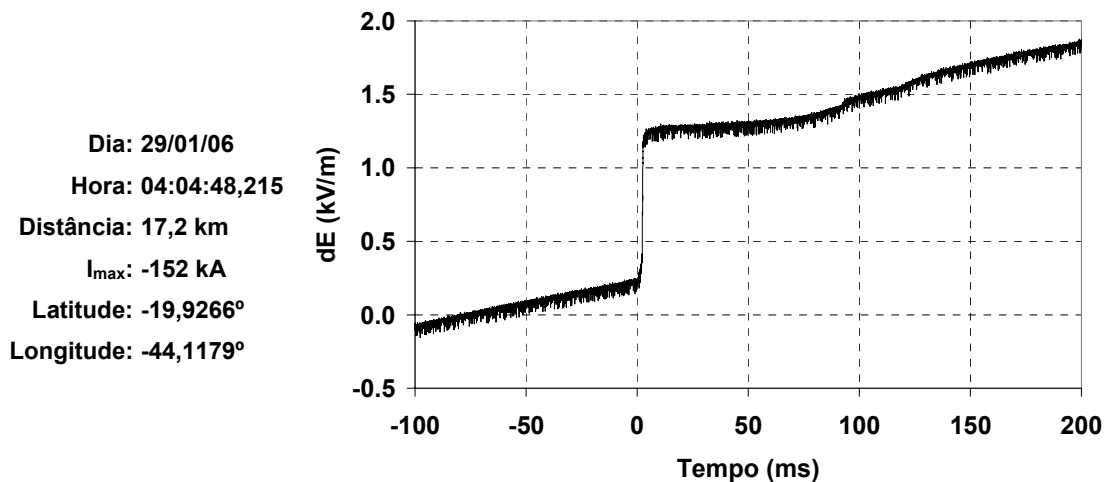
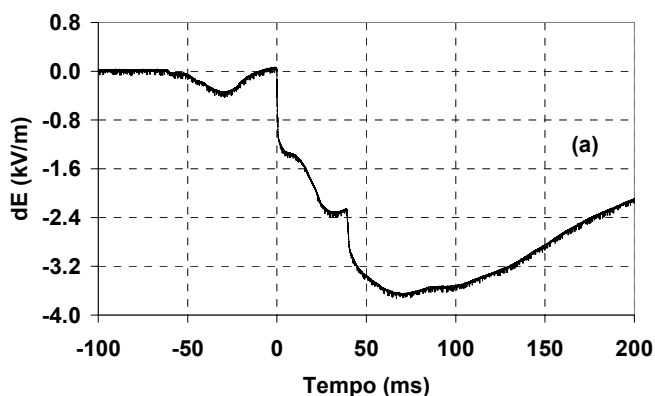


Figura 4.18 – Variação lenta do campo elétrico relativo ao registro
“20060129_040448_21262_B_fast_000.CSV”.

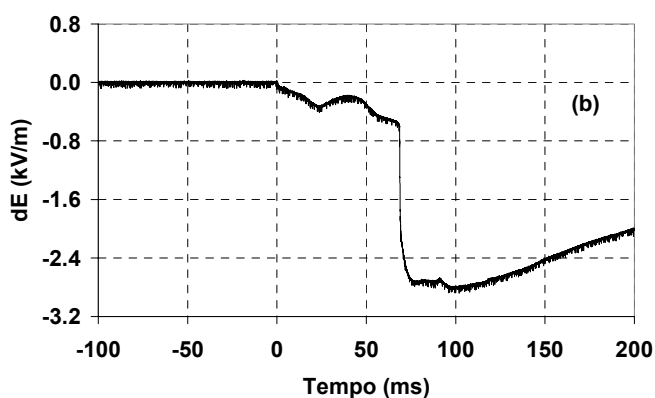
Até este ponto do texto, foram apresentadas somente descargas negativas. Os registros de melhor qualidade obtidos foram desse tipo de descarga, o que já era esperado, tendo-se em mente que quase a totalidade das descargas atmosféricas entre nuvem e solo são negativas (SCHROEDER, 2001), o que aumenta a probabilidade de melhores medições. Porém, houve alguns registros de descargas positivas. Uma pequena seleção dos mesmos é apresentada na Figura 4.19. Estão presentes na figura medições da variação lenta do campo elétrico, dE , provenientes da placa de aquisição rápida.

É interessante notar que, dentre as descargas atmosféricas positivas, de fato, não foram observadas descargas subseqüentes. A elevada intensidade da corrente de retorno também é algo que merece destaque. A única medição que parece possuir alguma inconsistência com relação ao valor da corrente fornecida pelo LLS é a da Figura 4.19(c), uma vez que, em função da variação total do campo elétrico, igual a apenas 1,1 kV/m, a corrente de retorno deve ser menos intensa. Outro erro possível, considerando correto o valor da corrente, é o da distância, que, nesse caso, deve ser bem maior que os 5,2 km notificados. É importante lembrar que, para a região na qual está instalada a torre do Morro do Cachimbo, o erro associado ao ponto de incidência estimado é de 600 m.

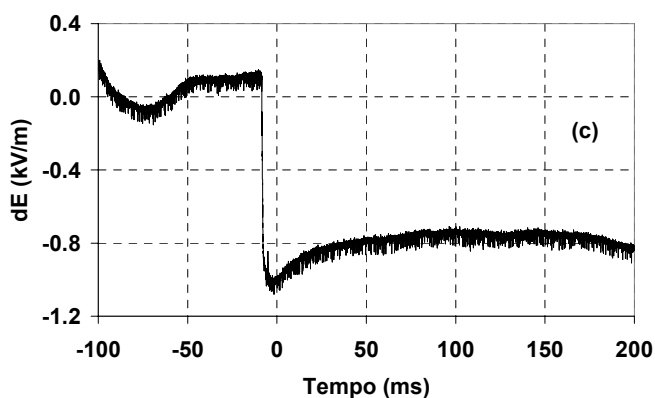
Dia: 14/12/05
 Hora: 22:22:27,630
 Distância: 9,7 km
 I_{max} : 74 kA
 Latitude: -20,0653°
 Longitude: -44,0557°



Dia: 14/12/05
 Hora: 22:26:21,476
 Distância: 15,1 km
 I_{max} : 88 kA
 Latitude: -20,0780°
 Longitude: -44,1082°



Dia: 05/01/06
 Hora: 03:48:45,748
 Distância: 5,2 km
 I_{max} : 72 kA
 Latitude: -19,9941°
 Longitude: -44,0262°



Dia: 23/02/06
 Hora: 15:19:20,919
 Distância: 6,5 km
 I_{max} : 78 kA
 Latitude: -20,0170°
 Longitude: -44,0431°

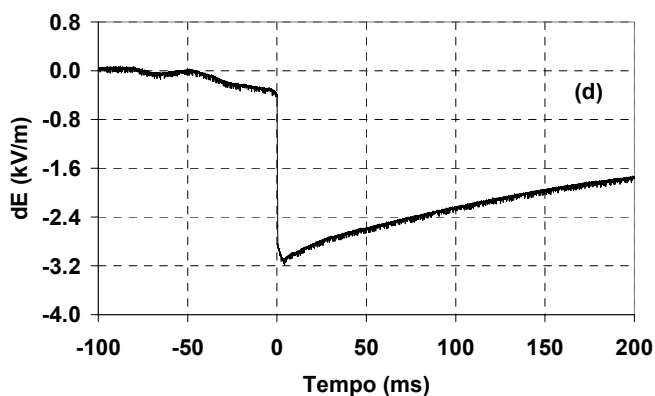


Figura 4.19 – Exemplos de registros de medição da variação lenta do campo elétrico de descargas atmosféricas positivas.

Canais ascendentes próximos à estação, dependendo de sua intensidade, podem ser suficientes para disparar o sistema. Um exemplo disso é o registro da Figura 4.20. Neste caso, optou-se por apresentar o registro gerado pela placa lenta, com o objetivo de se retratar um intervalo maior de tempo. Como não há variações bruscas no campo elétrico, ou seja, não são observados fluxos de corrente entre nuvem e solo, não há perda de qualidade na medição. Além disso, nada foi detectado pelo LLS no que tange este fenômeno.

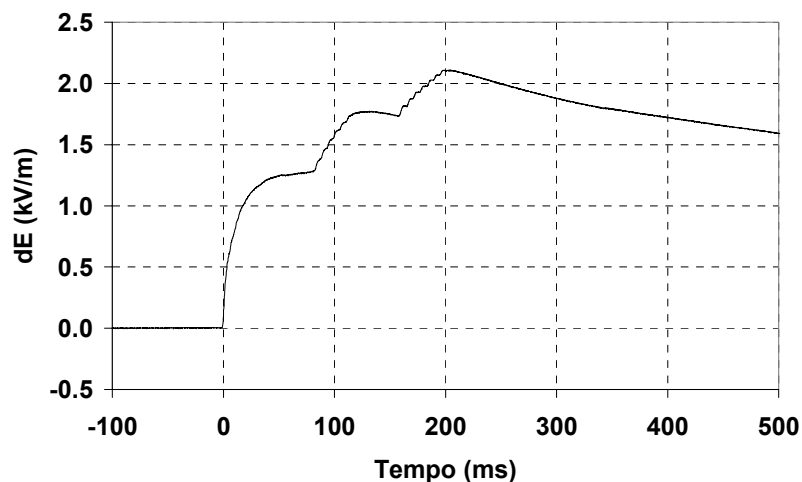


Figura 4.20 – Variação lenta do campo elétrico relativo ao registro “20060319_002816_16968_B_med_000.CSV”, que se trata de um canal ascendente próximo à estação.

Ainda nessa figura, podem ser observados três estágios antes que o campo elétrico comece efetivamente a diminuir, sendo identificados pelos tempos nos quais surgiram, ou seja, 0, 90 e 160 ms. Face aos grandes intervalos de tempo entre os estágios, não se pode dizer que são função de ramificações do canal ascendente. Uma explicação mais sensata seria o surgimento de novos canais ascendentes, já que, com a ausência da descarga atmosférica, o campo elétrico ao nível do solo se manteve intenso a ponto de originar novos canais. O incremento no campo elétrico ao nível do solo chegou a mais de 2 kV/m, como pode ser visto na Figura 4.20.

A Figura 4.21 apresenta um caso interessante, trazido ao texto apenas como curiosidade e para mostrar mais uma aplicação para o Sistema de Medição. Como pode ser notado na curva, o que houve realmente foi um canal ascendente capaz de incrementar o campo elétrico ao nível do solo em mais de 3 kV/m. Porém, não há sinais de fluxo de corrente de retorno. A variação brusca de dE , no instante 0 ms, não pode ser atribuída a

uma corrente de retorno negativa, face a sua pequena intensidade e ao seu perfil, o qual destoa do perfil das descargas nuvem-solo apresentadas.

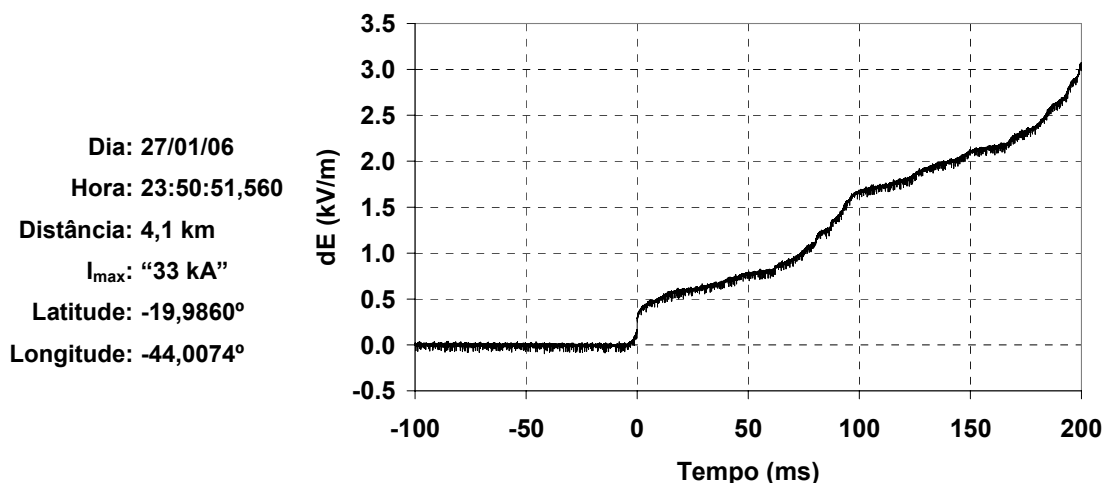
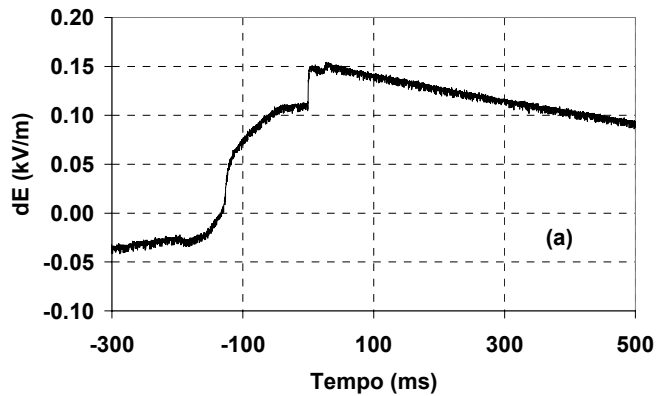


Figura 4.21 – Variação lenta do campo elétrico relativo ao registro “20060127_235051_56017_B_fast_000.CSV”, um canal ascendente (próximo da torre) erroneamente registrado pelo LLS como descarga positiva.

O LLS, por sua vez, equivocadamente forneceu dados referentes a uma descarga atmosférica positiva, com uma corrente de 33 kA que incidiu a 4,1 km da torre. Ambas as informações estão erradas, porque, ao que tudo indica, esse canal ascendente ocorreu em um ponto mais próximo da torre, face à grande variação que provocou no campo elétrico. Uma descarga atmosférica positiva, como foi mostrado anteriormente, provocaria uma variação negativa no campo elétrico no instante referente ao fluxo de sua corrente de retorno. O equívoco do LLS pode ser função da percepção do pulso repentino de campo elétrico, provocado pelo canal ascendente. Tal pulso pode ter sido consequência de uma corrente relativamente elevada, quando comparada a correntes de outros canais ascendentes. Não foi observada uma perturbação no campo elétrico como esta no canal ascendente da Figura 4.20.

Além do LLS registrar como descarga positiva certos canais ascendentes, em alguns casos, registra também descargas intranuvem como descargas nuvem-solo. A Figura 4.22 apresenta alguns registros com forte indício de serem referentes a descargas intranuvem. À esquerda da figura estão os dados provenientes do LLS. As aspas presentes nas informações de posição e intensidade estimada de corrente querem dizer que tais informações não correspondem à realidade do fenômeno, ou seja, uma suposta descarga nuvem-solo.

Dia: 11/02/06
 Hora: 17:30:50,368
 Distância: “7,8 km”
 I_{\max} : “19 kA”
 Latitude: “-19,9584^o”
 Longitude: “-43,9343^o”



Dia: 20/03/06
 Hora: 19:03:34,064
 Distância: “6,9 km”
 I_{\max} : “36 kA”
 Latitude: “-19,9660^o”
 Longitude: “-44,0615^o”

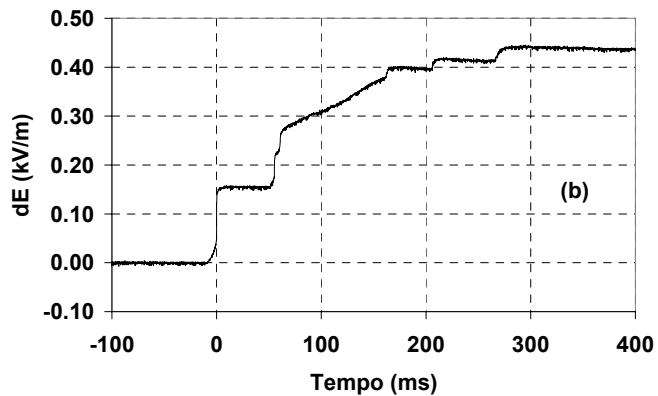


Figura 4.22 – Registros com fortes indícios de serem referentes a descargas intranuvem.

Na mesma figura, as variações bruscas de dE sugerem a existência de algum tipo de descarga atmosférica. Em função dos dE 's provocados pelo fluxo de corrente serem todos positivos, lembrando descargas nuvem-solo negativas, caso essas descargas atmosféricas fossem nuvem-solo, o LLS teria fornecido intensidades de corrente negativas. Além do mais, o perfil de campo elétrico desses registros destoa dos apresentados anteriormente, principalmente em virtude dos pequenos incrementos observados no campo ambiente como consequência de correntes de retorno de descargas nuvem-solo, o que reforça a tese de pertencer a descargas intranuvem.

4.4 Comparação Entre Alguns Registros de dE Provenientes de Descargas Atmosféricas Nuvem-Solo Negativas

Uma importante análise a ser feita com relação às medições de campo elétrico se refere aos tempos de subida das ondas em função da distância do ponto de incidência da descarga atmosférica. A seguir, são apresentadas, na Figura 4.23, a título de comparação,

algumas medições que nada mais são que ampliações dos momentos referentes ao fluxo da corrente de descarga, ou seja, ampliações das variações bruscas observadas nos registros da variação lenta do campo elétrico, dE . Todos os registros dessa figura se referem a descargas atmosféricas negativas. Com exceção do registro da Figura 4.23(e), que se trata de um fenômeno que ocorreu no dia 12/02/2006 e não foi mostrado anteriormente, porque houve saturação em algumas medições, nenhum dado novo se encontra na figura, apenas rerepresentação de algumas ilustrações do item 4.3.

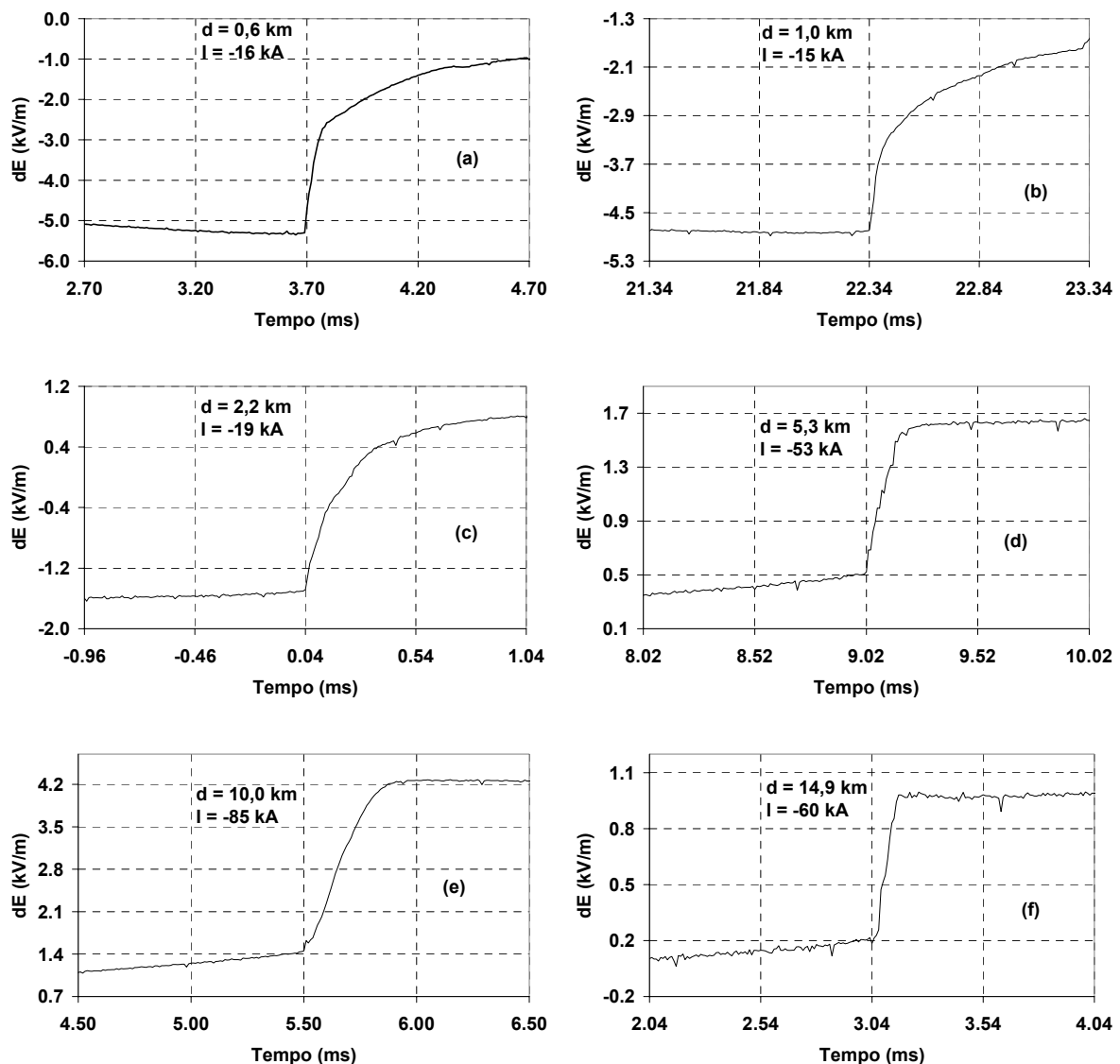


Figura 4.23 – Perfis de campo elétrico em função da distância de incidência da descarga atmosférica.

Na figura acima, é possível observar a variação na inclinação de dE correspondente ao fluxo da corrente de retorno em função da distância do ponto de incidência da descarga atmosférica. O tempo de subida da onda do campo elétrico tende a ser menor quanto

maior for a distância da descarga ao ponto da medição. Além disso, o aspecto curvo observado para descargas próximas tende a dar lugar a um perfil cada vez menos curvo, quase reto, quanto mais a descarga se afasta do ponto de medição. Uma comparação entre as Figuras 4.23(a) e (f) dá uma idéia dessa afirmação.

A única distorção observada se refere à Figura 4.23(e), a qual não se comportou da maneira esperada, ou seja, uma inclinação intermediária entre uma distância menor e outra maior. Nesse caso, antes de se concluir com mais detalhes, seria necessário conhecer com maior profundidade a forma de onda da corrente de retorno que gerou tal curva de campo elétrico. Vale ressaltar que, em uma análise como a que se pretendeu fazer, seria necessário que todos os registros gerados se referissem a uma mesma corrente de retorno, o que não é possível. Outro fator importante, mas não fundamental, é o erro associado à posição estimada para o ponto de incidência. Aqui, não é o principal responsável pelo desvio da figura, mas pode ter uma parcela de influência.

4.5 Comentários Finais

De posse dos primeiros resultados fornecidos pelo sistema de medição, com relação às medições de variações lenta e rápida do campo elétrico, as quais se mostram de acordo com o que é reportado na literatura, é possível a caracterização de descargas atmosféricas próximas à estação do Morro do Cachimbo. Um resumo das características relevantes de dE e dE/dt pode ser traçado.

Na grande maioria dos casos registrados, as descargas atmosféricas são do tipo nuvem-solo negativas. Quase sempre⁶, há descargas subseqüentes. Em todas as descargas atmosféricas negativas apresentadas, com pontos de incidências estimados em 5 km ou menos, a variação do campo elétrico em função da propagação do canal descendente foi percebida. O aumento negativo no campo elétrico num intervalo de tempo que varia de cerca de 10 a 50 ms, seguido de uma variação abrupta, permite a identificação do canal descendente (valores superiores a 5 kV/m foram observados). Em dois registros, com pontos de incidência estimados em 14,9 e 17,2 km, respectivamente (Figuras 4.17 e 4.18), os efeitos do canal descendente não foram percebidos pelas

⁶ Não foi objeto de estudo desta investigação uma análise estatística do fenômeno Descarga Atmosférica a partir dos dados obtidos pelo sistema de medição. Por isso, não foi utilizado no texto um percentual que exprimisse a idéia da afirmação.

antenas. No segundo caso, uma outra interpretação pode ser feita. A intensidade da corrente fornecida pelo LLS, 152 kA, e a forma de onda de dE sugerem a possibilidade de uma descarga ascendente negativa: o aumento lento no perfil da curva por um intervalo de tempo grande, que não foi totalmente registrado, pode se referir a um canal ascendente que culminou numa descarga ascendente negativa.

Ainda considerando-se descargas descendentes negativas, o aumento negativo do campo elétrico em função do canal descendente dá lugar a uma variação brusca, consequência do fluxo da corrente de retorno. O intervalo de tempo entre o início da subida da curva e o seu assentamento, ou seja, o momento em que o campo elétrico deixa de crescer em virtude da corrente de retorno, depende da distância de incidência. Para distâncias que vão de 0,6 km a 14,9 km, o intervalo foi de pouco mais de 1 ms a pouco mais de 0,1 ms, respectivamente⁷.

Com a base de dados que se formou em apenas uma temporada de chuvas, é cedo para se fazerem comentários a respeito do perfil de campo elétrico associado a descargas ascendentes negativas e descargas positivas, face à escassez de eventos como esses.

Após a apresentação de alguns dos inúmeros registros gerados enquanto o Sistema de Medição esteve em funcionamento durante a temporada de chuvas e da comparação entre alguns desses registros, encerra-se aqui o capítulo. No próximo capítulo, é feita uma discussão sobre os resultados obtidos, seguida do fechamento da dissertação.

⁷ Embora o erro associado à distância estimada seja também de 0,6 km, sabe-se que a descarga atmosférica à qual se refere não incidiu na torre da estação, uma vez que outros equipamentos lá instalados não identificaram uma corrente de retorno na torre.

5 Conclusões

5.1 Introdução

Após a apresentação do Sistema de Medição no Capítulo 3 e de uma seleção dos primeiros registros gerados na temporada de chuvas de 2005/2006 pelo sistema, o presente capítulo sintetiza as conclusões relativas a ele, aos procedimentos adotados em campo para as medições e aos resultados preliminares.

Consideram-se os dados das medições de variações lenta e rápida do campo elétrico, elevação de potencial na impedância de aterramento da torre e corrente no seu condutor de descida, apresentados nas figuras do primeiro subconjunto de resultados do capítulo anterior, item 4.3.1.

Apresentam-se uma breve discussão acerca das potencialidades e limitações do sistema e as propostas de continuidade do trabalho já desenvolvido.

5.2 Análise da Potencialidade e das Limitações do Sistema de Medição

Quanto às potencialidades e limitações do Sistema de Medição, nesta forma original de implementação, ou seja, com os mesmos sensores, mesmo posicionamento no espaço físico da Estação do Morro do Cachimbo e mesma taxa de aquisição de dados, podem ser feitos comentários específicos para cada uma das medições.

5.2.1 Medições das Variações Lenta e Rápida do Campo Elétrico

As medições das variações lenta (dE) e rápida (dE/dt) do campo elétrico são os pontos fortes do sistema de medição. Em quase todos os registros, elas se mostram em conformidade com o que é encontrado na literatura sobre o tema e apresentado no Capítulo 2.

Uma grande limitação às medições de campo elétrico são os ruídos. Muito esforço foi despendido no sentido de eliminá-los, mas não foi suficiente. A presença dos ruídos limita sobremaneira o raio no qual o sistema consegue realizar medições válidas, frente aos níveis de tensão fornecidos pelas antenas. Embora o sistema seja sensibilizado e registre campos elétricos de descargas atmosféricas num raio de 20 km a partir da torre, tais medições não podem ser consideradas válidas, na prática, quando referentes a intensidades de corrente não muito elevadas. A partir de uma certa distância (7 ou 8 km), para correntes de retorno da ordem de 20 a 30 kA, a presença dos ruídos torna-se muito significativa nas medições, invalidando-as. Por esta razão, só foram aproveitados registros provenientes de descargas incidentes a distâncias superiores a 8 km, no Capítulo 4, cujas intensidades da corrente de retorno foram elevadas¹ (cerca de 60 kA em diante) e capazes de tornar os níveis de ruído insignificantes.

Quanto aos problemas de umidade no interior dos cabos coaxiais, estes ainda existem, porém, não contribuem para invalidar as medições. Há que se pensar em maneiras viáveis (relação custo/benefício) para se solucionar o problema.

Pode-se dizer que as medições em questão, quanto às taxas de amostragem empregadas, no que tange a proposta do Sistema de Medição, ou seja, investigação de

¹ Ao se utilizarem expressões como “corrente de retorno elevada”, a referência padrão de comparação é aquela apresentada em (SCHROEDER, 2001).

canais ascendentes, estão adequadas. Um possível incremento na taxa de aquisição da medição da variação rápida traz melhorias à medição. Contudo, a principal função dessa medição é recompor a medição da variação lenta, a título de comparação (redundância) ou em caso de perda desta. Tal recomposição, como foi mostrado no Capítulo 3, já é bem feita com a taxa de aquisição ora utilizada. A simples comparação com as formas de onda de tensão no aterramento da torre e corrente em seu condutor de descida não justifica o elevado preço que se pagará por um eventual aumento na frequência de amostragem.

Porém, se houver interesse em um estudo mais apurado de perfil de campo elétrico de descargas atmosféricas, como em (LIN, 1979), há que se utilizarem taxas de amostragem mais elevadas em ambas as medições.

5.2.2 Medições de Corrente na Torre

Não houve registro confiável de corrente de canal ascendente ou corrente induzida na torre.

Uma possível conclusão é que somente descargas atmosféricas muito próximas da torre possam induzir um canal ascendente nesta. No Capítulo 4, há um registro de uma corrente de retorno de -16 kA, incidente a 0,6 km da torre (Figura 4.3). Embora a intensidade de sua corrente seja baixa, a distância também o é, o que poderia culminar na origem de um canal ascendente a partir da torre. Porém, nada foi observado na medição de corrente (Figura 4.3(d)). Algumas causas podem ser elencadas para justificar tal fato.

A primeira delas é a grande quantidade de ruídos presente na medição. O excessivo nível de ruídos, por si só, já é capaz de invalidar a medição.

A segunda causa seria a baixa taxa de amostragem (100 kHz), que não permitiria a detecção da corrente de um eventual canal ascendente na torre, caso esta tivesse duração de apenas alguns microssegundos.

Observando-se bem as figuras do primeiro subgrupo do Capítulo 4 relativas à corrente, nota-se que, em alguns casos, as polaridades dos pulsos existentes e de dE/dt , são iguais. Em outros casos, não. Uma possível explicação seria a indução de tensão no cabo coaxial que faz a conexão com a caixa de aquisição.

Um outro fato que merece destaque é a resposta em frequência do medidor alicate utilizado e descrito no Capítulo 3. O medidor possui uma banda passante de 10 Hz a

100 kHz. Assim, a componente contínua da corrente, bem como as frequências inferiores a 10 Hz, são perdidas.

Partindo dessa deficiência, faz-se necessário um outro procedimento para a medição de corrente, somado a um aumento na taxa de aquisição. O emprego de um *shunt* (NAVARRO, 2007) é uma boa alternativa para os problemas da banda passante e de possíveis saturações do sensor, bem como o uso de uma bobina de *Pearson*.

5.2.3 Medições de Tensão no Aterramento da Torre

Com relação ao potencial desenvolvido no aterramento da torre em virtude do fluxo de correntes induzidas ou de canais ascendentes no seu condutor de descida, nada pode ser concluído com o procedimento utilizado. A concepção adotada mostrou-se inadequada, e os resultados sugerem que os registros correspondem, na realidade, à tensão induzida pela corrente de retorno no cabo de conexão ao terra remoto.

Em primeiro lugar, a polaridade e a intensidade da queda de potencial no *loop* não correspondem à verdadeira queda de tensão no aterramento como função da corrente, segundo a equação (4.1), mesmo sabendo-se que as formas de onda de corrente, $I(t)$, e tensão, $U_0(t)$, não tenham exatamente o mesmo perfil, em virtude da impedância de aterramento, Z_G , variar com a frequência (VISACRO, 2005b).

$$U_0(t) = I(t) * Z_G \quad (4.1)$$

Embora não haja medições de corrente, esperava-se uma forma de onda de tensão com perfil próximo ao da variação rápida do campo elétrico, conforme elucidado no Capítulo 3. Com base na medição de tensão, chegar-se-ia à medição de corrente segundo a equação acima, sendo Z_G igual a 28Ω , de acordo com medições realizadas no local.

O que foi observado nas medições de elevação de potencial são sinais que corresponderiam a elevações de potencial muito maiores do que as reais esperadas, tomando-se como referência as correntes de canais ascendentes descritas na literatura.

Com o intuito de se investigar o porquê da variação da polaridade, algumas vezes oposta ao esperado, procedeu-se a elaboração da Figura 5.1, a partir dos dados apresentados no primeiro subconjunto de registros do Capítulo 4.

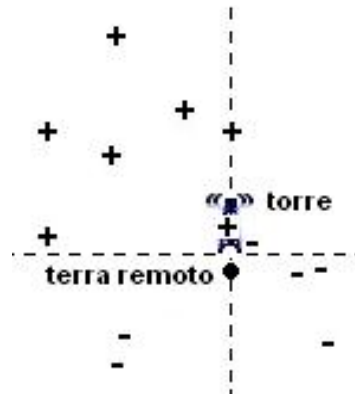


Figura 5.1 – Estudo da polaridade da diferença de potencial desenvolvida no aterramento da torre frente ao ponto de incidência da descarga atmosférica que a provocou.

Na figura acima, os símbolos de “+” e “-” correspondem à polaridade do sinal de tensão. Os símbolos “+” são também aqueles cuja polaridade do sinal coincidiu com a da variação rápida do campo elétrico. Os símbolos estão colocados na figura de forma a representarem o ponto de incidência da descarga atmosférica em relação à torre e ao aterramento remoto. Nota-se, claramente, que a polaridade dos sinais medidos está sendo influenciada pela posição do ponto de incidência. O que está havendo, por assim ser, são induções de tensão no cabo que conecta o abrigo da estação ao terra remoto, formando o *loop*. Logo, o sinal registrado, se de fato houver um fluxo de corrente no condutor de descida, é uma composição do sinal de tensão esperado com uma tensão induzida no cabo. Por esse motivo, o procedimento adotado mostrou-se incorreto para o seu propósito.

No que tange a taxa de aquisição de dados empregada, as mesmas considerações feitas no item anterior são aqui aplicadas.

5.3 Conclusões Gerais

O que se buscou nesta dissertação de mestrado foi a descrição de um método experimental de se quantificarem as grandezas físicas envolvidas no surgimento e propagação de canais ascendentes. É importante ressaltar que este trabalho é o primeiro de pós-graduação, desenvolvido no LRC, relativo à investigação de descargas atmosféricas por meio de medição e detecção de campos elétricos gerados por elas.

Foi descrito o Sistema de Medição implementado, bem como suas potencialidades e limitações. Foram apresentados alguns resultados preliminares. Discutiu-se a filosofia, a

forma e as deficiências de implementação, bem como os problemas ocorridos durante o curso das investigações. Algumas soluções para correção e melhoria foram propostas.

Muito há que se fazer, ainda, em termos de melhoria no sistema. De imediato, até mesmo como forma de se ampliar sobremaneira o registro de dados válidos, a redução do nível de ruídos é prioridade. Com uma base de dados mais ampla, estudos mais detalhados e consistentes poderão ser desenvolvidos com o intuito de dar seqüência na investigação de canais ascendentes iniciados em torres e estruturas elevadas.

O estudo do tema Canal Ascendente teve início neste trabalho. A experiência vivenciada permitiu traçar o caminho para estudos mais conclusivos, profundos e elaborados. Os parâmetros do fenômeno em questão devem continuar sob observação, face à sua relevância na Engenharia de Proteção, para que seja mais bem descrito e para se avaliar sua dependência com relação à configuração da estrutura da qual se originou. Tal análise é fundamental para se atestar a representatividade dos dados coletados e na efetividade de técnicas de proteção.

Estudar-se com mais detalhes o estágio inicial da descarga atmosférica é de suma importância: os resultados apresentados aqui mostram com pouca riqueza de detalhes o estágio inicial que é de algumas centenas de milissegundos (MIKI, 2002, 2003). Foram analisados apenas os 100 ms anteriores à descarga, tempo insuficiente para uma boa caracterização do fenômeno. Além disso, é necessária uma taxa de amostragem superior à utilizada, porque pulsos de alta frequência são observados antes do início da propagação dos canais ascendente e descendente.

Por enquanto, o que se pode concluir é que, aparentemente, a indução de canais ascendentes pelos estágios de desenvolvimento de descargas atmosféricas próximas não é um fato tão comum quanto se esperava. Somente descargas muito próximas da torre (talvez, algo dentro de um raio de 1 km de distância) podem ser capazes de induzir um canal, uma vez que, para que o fenômeno ocorra, a combinação do campo elétrico das nuvens e de canais descendentes tem que ser maior que 30 kV/m. Considerando-se a altura da torre da Estação do Morro do Cachimbo em relação à sua vizinhança, é muito difícil que uma descarga atmosférica incida a uma distância próxima da torre, em função de seu grande raio de atração. Contudo, mesmo não havendo registros de corrente de canais ascendentes na torre, há vários registros de medições de variação de campo elétrico que indicam o surgimento de canais ascendentes nas proximidades da estação.

O surgimento de canais ascendentes em torres e outras estruturas elevadas em função de descargas atmosféricas próximas, mesmo sendo compreendido em uma análise mais superficial, é ainda algo que merece estudos mais aprofundados. É necessário se quantificar de forma mais apurada a relação entre os processos físicos envolvidos no fenômeno em questão para o desenvolvimento e aplicação de filosofias de proteção contra as descargas atmosféricas.

5.4 Propostas de Continuidade

As atividades desenvolvidas na presente dissertação se inserem numa pesquisa mais abrangente e aprofundada da equipe do LRC sobre o fenômeno Canais Ascendentes de Descargas Atmosféricas e têm, sobretudo, um caráter prospectivo. O objetivo fundamental deste trabalho foi dar os primeiros passos no desenvolvimento de um conhecimento da natureza do fenômeno, de uma filosofia para estudá-lo e da interpretação dos principais fatores que o provocam, numa perspectiva de indicação de caminhos para aprofundamento das investigações. Nesse sentido, as realizações estão articuladas na pesquisa mais abrangente referida e sua continuidade deve ser efetivada na forma do desenvolvimento de uma tese de doutorado, dedicada a um aprimoramento do Sistema de Medição proposto, bem como a uma ampliação da base de dados de medições, dentre outros aspectos, sempre com o intuito de se obterem registros mais representativos, do ponto de vista estatístico, para a caracterização dos parâmetros dos canais ascendentes iniciados em torres e estruturas elevadas.

6

Referências Bibliográficas

CEMIG, “**Estação de Pesquisas de Descargas Atmosféricas - Projeto Cachimbo**”, Centro de Tecnologia e Normalização (relatório interno - CEMIG), Belo Horizonte, Dezembro de 1985.

KASEMIR, H.W., RUHNKE, L.H., “**Antenna Problems of Measurement of the Air-earth Current**”, Pergamon Press, Grã-Bretanha, 1959.

KASEMIR, H.W., “**A Contribution to the Electrostatic Theory of a Lightning Discharge**”, Journal of Geophysical Research, vol. 65, no. 7, pp. 1.873-1.878, Julho de 1960.

LALANDE, P., CLERGERIE, A.-B., LAROCHE, P., BERARD, A.-E., BERLANDIS, J.-P., BADOR, B., BONAMY, A., UMAN, M.A., RAKOV, V.A., “**Leader Properties Determined with Triggered Lightning Techniques**”, Journal of Geophysical Research, vol. 103, no. D12, pp. 14.109-14.115, Junho de 1998.

LIN, Y.T., UMAN, M.A., TILLER, J.A., BRANTLEY, R.D., BEASLEY, W.H., KRIDER, E.P. AND WEIDMAN, C., “**Characterization of Lightning Return Stroke Electric and Magnetic Fields from Simultaneous Two-Station Measurements**”, Journal of Geophysical Research, 84, 6307-6314, 1979.

MESQUITA, C.R., DIAS, R.N., VISACRO, S., CAZETTA, F.A., “**Análise da Precisão da Localização de Descargas Atmosféricas na Região Sudeste do Brasil**”, Anais do XVIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, Paraná, Outubro de 2005.

MESQUITA, C.R., **“Nova Metodologia para Calibração de Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas”**, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Dezembro de 2006.

MAZUR, V., RUHNKE, L.H., **“Common Physical Processes in Natural and Artificially Triggered Lightning”**, Journal of Geophysical Research, vol. 98, no. D7, pp. 12.913-12930, Julho de 1993.

MAZUR, V., **“Physical Processes During Development of Lightning Flashes”**, Anais do GROUND'2002 and 3rd WAE – International Conference on Grounding and Earthing & 3rd Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 79-84, Novembro de 2002.

MAZUR, V., RUHNKE, L.H., **“Determining the Striking Distance of Lightning through its Relationship to Leader Potential”**, Journal of Geophysical Research, vol. 108, no. D14, 2003.

MAZUR, V., RUHNKE, L., OLIVEIRA, R., FELIPE, M., VISACRO, S., **“The Response of Towers and Other Structures to Nearby Lightning”**, Anais do GROUND'2006 and 2nd LPE – International Conference on Grounding and Earthing & 2nd International Conference on Lightning Physics and Effects, Maceió, Brasil, pp. 01-06, Novembro de 2006.

MIKI, M., SHINDO, T., RAKOV, V.A., UMAN, M.A., RAMBO, K.J., SCHNETZER, G.H., DIENDORFER, G., MAIR, M., HEIDLER, F., ZISCHANK, W., THOTTAPPILLIL, R., WANG, D., **“Characterization of the Initial Stage of Upward-Initiated Lightning”**, 26th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cracóvia, Polônia, pp. 14-19, Setembro de 2002.

MIKI, M., SHINDO, T., WADA, A., RAKOV, V.A., UMAN, M.A., RAMBO, K.J., SCHNETZER, G.H., DIENDORFER, G., MAIR, M., HEIDLER, F., ZISCHANK, W., THOTTAPPILLIL, R., WANG, D., **“Characterization of Pulses Superimposed on the Initial Continuous Current of Upward Lightning”**, 12th International Commission on Atmospheric Electricity (ICAE), Versailles, França, Junho de 2003.

MONTANYÀ, J., ILLA, A., HERMOSO, B., ROMERO, D., **“A Simple Method to Estimate the Return Stroke Current from Close Electric Field Measurements”**, Anais do GROUND'2004 and 1st LPE – International Conference on Grounding and Earthing & 1st International Conference on Lightning Physics and Effects, Belo Horizonte, Brasil, pp. 47-50, Novembro de 2004.

NAVARRO, A., SILVINO, J.L., VISACRO, S., **“A Contribution to the Direct Measurement of Lightning Currents by Means of Resistive Transducers”**, Paper-No.: JLR-2007-21, pp.1-4, aceito para publicação no Journal of Lightning Research, 2007.

RAKOV, V.A., "**Lightning Electric and Magnetic Fields**", Anais do 13th Int. Zurich Symp. on EMC, pp. 561-566, Zurique, Suíça, 16 a 18 de Fevereiro de 1999.

RAKOV, V.A., "**Characterization of Lightning Electromagnetic Fields and Their Modeling**", Anais do 14th Int. Zurich Symp. on EMC, Supplement, pp. 3-16, Zurique, Suíça, 20 a 22 de Fevereiro de 2001.

RAKOV, V.A., UMAN, M.A., "**Lightning: Physics and Effects**", Cambridge University Press, Reino Unido, 2003.

SABA, M.M.F., BALLAROTTI, M.G., PINTO JR., O., MIRANDA, F.J., NACCARATO, K.P., "**Simultaneous Electric Field and High-Speed Video Observations of Lightning**", Anais do GROUND'2004 and 1st LPE – International Conference on Grounding and Earthing & 1st International Conference on Lightning Physics and Effects, Belo Horizonte, Brasil, pp. 47-50, Novembro de 2004.

SCHROEDER, M.A.O., "**Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas: Aplicação às Medicões da Estação do Morro do Cachimbo**", Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Março de 2001.

SCHROEDER, M.A., SOARES, A.J., VISACRO, S.F., "**The Brazilian Experience on Measurement of Lightning Parameters by Means of Instrumented Towers**", Anais do GROUND'2002 and 3rd WAE – International Conference on Grounding and Earthing & 3rd Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 123-127, Novembro de 2002.

SCHULZ, W., LACKENBAUER, B., PICHLER, H., DIENDORFER, G., "**LLS Data and Correlated Continuous E-Field Measurements**", VIII SIPDA – International Symposium on Lightning Protection, São Paulo, Brasil, Novembro de 2005.

THOTTAPPILLIL, R., "**The Physics of Lightning Flash and Its Effects - Memorandum of Understanding for the Implementation of a European Concerted Research Action**", Suécia, Novembro de 2004.

UMAN, M.A., "**Lightning**", Editora McGraw-Hill Book Company, 1984.

UMAN, M.A., "**The Lightning Discharges**", vol. 39, International Geophysics Series, Academic Press, 1987.

UMAN, M.A., "**Natural and Artificially-Initiated Lightning and Lightning Test Standards**", Proceedings of the IEEE, vol. 76, no. 12, Dezembro de 1988.

UMAN, M.A., "**Natural Lightning**", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, no. 3, Maio/Junho de 1994.

VISACRO, S., SCHROEDER, M.A.O., SOARES, A.JR., CHERCHIGLIA, L.C.L., SOUSA, V.J., "**Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station**", Journal of Geophysical Research, vol. 109, no. D01105, 1-11, 2004a.

VISACRO, S., "**A Representative Curve for Lightning Current Waveshape of First Negative Stroke**", Geophysical Research Letters, vol. 31, doi:10.1029/2004.GL019642, abril, 2004b.

VISACRO, S., "**Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia**", Artliber Editora, Brasil, 2005a.

VISACRO, S., "**Aterramentos Elétricos – Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento**", 2ª. Edição, Artliber, pp.1-163, São Paulo, Brasil, 2005b.

VISACRO, S., "**A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents**", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.22, no.1, pp. 381-386, Janeiro de 2007.

WADA, A., ASAKAWA, A., SHINDO, T., "**Luminous Phenomenon During Upward Leader Development - Lightning Observational Results at 200m-High Chimney**", 26th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cracóvia, Polônia, pp. 3-7, Setembro de 2002.

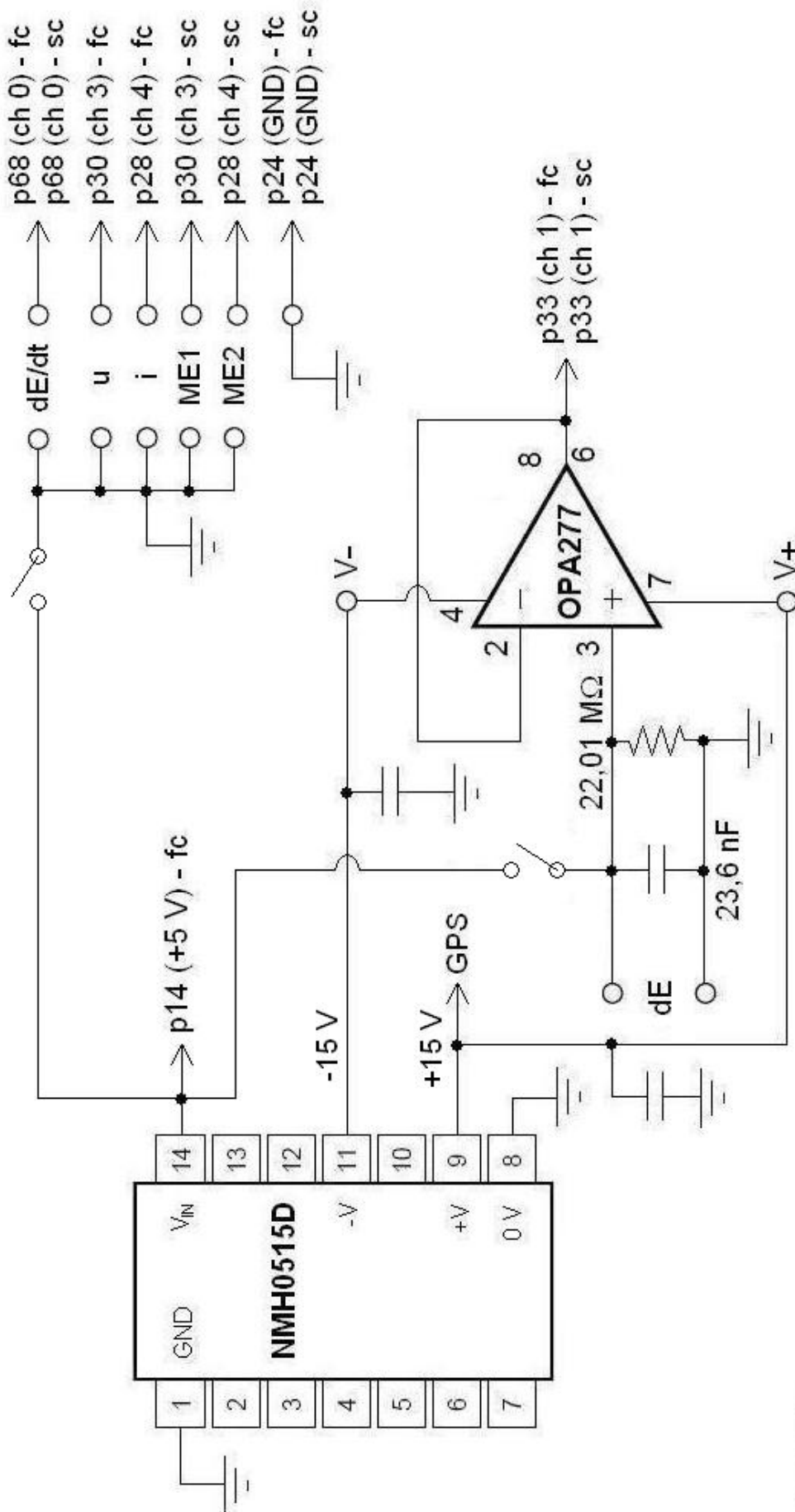
WADA, A., ASAKAWA, A., SHINDO, T., YOKOYAMA, S., "**Leader and Return Stroke Speed of Upward-Initiated Lightning**", 12th International Commission on Atmospheric Electricity (ICAE), Versailles, França, Junho de 2003.

WADA, A., MIKI, M., ASAKAWA, A., "**Types of Upward Lightning Discharges Observed at the 200-m Fukui Chimney**", 27th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Avignon, França, Setembro de 2004.

WANG, D., RAKOV, V.A., UMAN, M.A., TAKAGI, N., WATANABE, T., CRAWFORD, D.E., RAMBO, K.J., SCHNETZER, G.H., FISHER, R.J., KAWASAKI, Z.-I., "**Attachment Process in Rocket-triggered Lightning Strokes**", Journal of Geophysical Research, vol. 104, no. D2, pp. 2143-2150, Janeiro de 1999.

APÊNDICE

Diagrama de Ligação dos Componentes na Caixa de Aquisição



Legenda:

- dE: variação lenta de campo elétrico
- dE/dt: variação rápida de campo elétrico
- i: corrente no condutor de descida da torre
- u: elevação de potencial no aterramento da torre

- p: pino
- fc: placa rápida (fast card)
- sc: placa lenta (slow card)
- ch: canal (channel)

- ME1: medidor eletrônico de campo elétrico permanente
- ME2: medidor eletrônico de campo elétrico temporário