

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 794

**AVANÇOS NA INVESTIGAÇÃO DE COMPONENTES M E DE DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS ASCENDENTES POR MEIO DE REGISTROS SINCRONIZADOS
DE CAMPO ELÉTRICO, DE CORRENTE E DE VÍDEOS**

Listz Simões de Araújo

DATA DA DEFESA: 02/08/2013

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**AVANÇOS NA INVESTIGAÇÃO DE COMPONENTES M E DE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS ASCENDENTES POR MEIO DE
REGISTROS SINCRONIZADOS DE CAMPO ELÉTRICO, DE
CORRENTE E DE VÍDEOS**

Listz Simões de Araújo

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Silvério Visacro Filho

Belo Horizonte - MG

Agosto de 2013

"Avanços na Investigação de Componentes M e de Descargas Atmosféricas Ascendentes por meio de Registros Sincronizados de Campo Elétrico, de Corrente e de Vídeos"

Listz Simões de Araújo

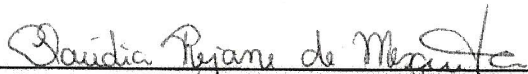
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 02 de agosto de 2013.

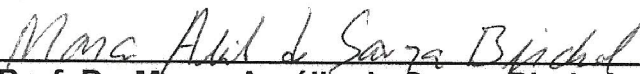
Por:



Prof. Dr. Silvério Visacro Filho
DEE (UFMG) - Orientador



Dra. Cláudia Rejane de Mesquita
Pesquisadora Associada LRC (UFMG)



Prof. Dr. Marco Aurélio de Souza Birchall
DELT (UFMG)

Agradecimentos

Ao final de mais uma vitoriosa etapa em minha vida é preciso agradecer algumas pessoas, queridas e importantes, que fizeram parte dessa longa caminhada. Sem o apoio e companheirismo delas seria impossível realizar esse sonho.

Primeiramente, agradeço a Deus por ser o meu companheiro, que me guiou com sabedoria nos momentos difíceis.

Agradeço ao meu professor orientador, Silvério Visacro, responsável incondicional por esta conquista. Ele me ensinou a relevância da pesquisa, a partir do seu conhecimento técnico e talento sobreposto a oportunidade de trabalhar na notável infra-estrutura do Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas (LRC).

Agradeço aos meus grandes e verdadeiros amigos, Miguel Guimarães e Rafael Alípio. Pessoas incríveis que fizeram parte marcante nesta caminhada.

A minha namorada Mariana Álvares, eu agradeço de forma especial, além de me motivar e apoiar, ela foi companheira, amiga e sincera em seus conselhos. Obrigado por fazer parte da minha vida.

Aos meus pais, Albenes e Lourdes, qualquer palavra escrita não traduz de forma completa a minha gratidão. Eles foram fundamentais em minha formação humana, me ensinaram que por meio da honestidade, humildade e respeito é possível alcançar grandes conquistas. Agradeço, também, as minhas irmãs, Karla e Karina, pela amizade e companheirismo em todos os momentos.

Por fim, e não menos importante, agradeço a todos os meus amigos que me apoiaram e acreditaram na minha vitória.

Resumo

Esta dissertação descreve contribuições científicas recentes para o conhecimento do fenômeno descargas atmosféricas desenvolvidas no contexto desta tese de mestrado. Notadamente, apresenta resultados e conclusões originais quanto às Componentes M das descargas descendentes e de descargas negativas ascendentes. A partir de registros sincronizados de campo elétrico, de corrente, de vídeo e de luminosidade do canal obtidos na Estação do Morro do Cachimbo, foi possível desenvolver interpretações e alcançar conclusões de relevo quanto aos dois fenômenos. No que concerne às Componentes M de descargas naturais, cujas correntes nunca haviam sido medidas, registrou-se neste trabalho, pela primeira vez, várias destas correntes. Verificou-se que seus parâmetros são consistentes com aqueles da corrente de descargas induzidas artificialmente por foguetes e que a ocorrência da Componente M em primeiras descargas de retorno é muito freqüente, diferente do que assumia a literatura internacional. Este trabalho apresenta os primeiros registros de correntes de descargas ascendentes medidas em regiões tropicais, cujos parâmetros apresentam relativa similaridades com os correspondentes às descargas das regiões temperadas, embora a carga típica transferida da nuvem para a terra dos registros obtidos tenha ordem cinco vezes inferior à média geométrica obtida dos eventos medidos em regiões temperadas. Também são apresentados resultados relativos às melhorias de um medidor especial de corrente de descargas desenvolvido no LRC, realizadas no contexto desta dissertação.

Abstract

This work describes recent scientific contributions to the knowledge of the lightning, developed in the context of this master thesis. Notably, original results and conclusions with regard to M-components of negative downward lightning and to upward lightning are presented. Relevant interpretations and conclusions were developed from the synchronized records of electric field, current, video and luminosity of lightning channels, all obtained at Morro do Cachimbo Station. Regarding the M-Components of natural lightning, their currents were never measured before this work. From the several obtained records, it was observed that all the parameters of this event are relatively similar with those from triggered lightning. Moreover, it was verified that these M-Components occur frequently in first strokes, different from the usual assumption in the international literature. With respect to upward lightning, the first measurements of this event performed in tropical regions are also presented. The parameters of all upward lightning measured at Morro do Cachimbo Station are somewhat similar to those from temperate regions, though the geometric mean of the total transferred charge measured in the latter is about five times larger than the former. Besides, results related to the improvement of a special lightning current meter developed by the LRC researchers, yielded in the context of this thesis are presented.

Sumário

1. Introdução	1
1.1. Relevância da Investigação.....	1
1.2. Objetivo	1
1.3. Organização do texto.....	2
2. Formação e Evolução de Descargas Atmosféricas e Parâmetros Associados	4
2.1. Descrição sucinta da descarga atmosférica.....	4
2.2. Parâmetros detectáveis associados aos processos envolvidos no fenômeno	6
2.2.1. Campo elétrico associado à descarga atmosférica descendente negativa	7
2.2.2. Comparação entre a convenção meteorológica e física para a medição de campo elétrico	8
2.2.3. Perfil do campo elétrico associado à ruptura inicial e evolução do canal precursor de descarga.....	9
2.2.4. Simulação de perfis de campo elétrico vertical ao nível do solo e sua comparação a perfis medidos	12
2.2.5. Variações do campo elétrico devido às correntes de retorno das descargas descendentes negativas.....	16
2.2.6. Perfil de campo elétrico associado à componente contínua	19
2.2.7. Perfil de campo elétrico da Componente M da corrente de descarga	21
2.2.8. Perfil de campo elétrico de descargas ascendentes negativas	22
3. Contribuições Científicas Recentes sobre Descargas Atmosféricas Baseadas na Medição de Campos e Correntes	24
3.1. Os recursos para medição de campos e correntes da Estação do Morro do Cachimbo	24
3.2. Contribuições científicas recentes.....	26
3.3. Contribuições relativas à Componente M	26
3.3.1. Fundamentos da Componente M	26
3.3.2. Resultados deste trabalho.....	27

3.4.	Descargas negativas ascendentes	40
3.4.1.	Descargas negativas ascendentes em regiões tropicais.....	40
3.4.2.	Análise de evento com todos os registros sincronizados.....	40
3.4.3.	Estatísticas dos eventos ascendentes medidos.....	45
3.4.4.	Análises e conclusões	46
4.	Desenvolvimentos Relativos à Medição de Correntes de Descargas	48
4.1.	Introdução	48
4.2.	O dispositivo original de medição de corrente.....	48
4.3.	O desenvolvimento de um novo <i>software</i>	53
4.4.	Modificações no circuito e na estrutura física de instalação e proteção	54
4.5.	Atuação na antena e na blindagem	55
4.5.1.	Atuação na blindagem.....	55
4.5.2.	Atuação na antena	56
4.6.	Testes realizados em laboratório	56
4.6.1.	Primeira etapa	57
4.6.2.	Segunda Etapa.....	62
4.6.3.	Terceira Etapa	66
5.	Conclusões.....	74
6.	Bibliografia	77

1. Introdução

1.1. Relevância da Investigação

A despeito de toda a evolução da ciência no campo das Descargas Atmosféricas nas últimas décadas, a complexidade dos processos físicos envolvidos na formação e evolução do fenómeno determina um cenário do conhecimento do tema que está, ainda, muito distante do requerido para a sua compreensão plena, bem como do dimensionamento da intensidade dos seus efeitos.

Neste cenário, torna-se fundamental a medição das grandezas detectadas, resultantes dos processos pertinentes ao evento para a constituição de uma base de dados que contribua para a interpretação destes processos e a estimativa dos seus impactos. Nesta perspectiva, têm destaque particularmente a medição dos campos elétricos detectados durante a formação das descargas, as correntes e campos magnéticos decorrentes do fluxo da corrente de retorno das descargas e o registro de vídeos através de câmeras rápidas.

É neste contexto que se desenvolve a presente dissertação, que é focada na medição de parâmetros da descarga e de sua corrente de retorno, em realizações para possibilitar tais medições e na interpretação dos resultados envolvidos.

1.2. Objetivo

O objetivo deste trabalho consiste na realização de contribuições para o conhecimento das descargas atmosféricas a partir da medição dos campos eletromagnéticos e correntes de retorno gerados pelos processos envolvidos no fenómeno.

Diferente da maior parte dos trabalhos desenvolvidos no LRC¹ centrados na pesquisa da corrente das descargas e dos seus efeitos, este trabalho tem por diferencial a exploração das medições de campos gerados pelas descargas para interpretação dos seus processos, seja através do uso de resultados de medição de campos ou de resultados de outros recursos associados, tais quais da medição de correntes, registros de vídeo e luminosidade.

1.3. Organização do texto

Este texto foi organizado em seis capítulos, cinco em adição à presente Introdução.

O segundo capítulo apresenta uma descrição sucinta dos processos de formação e evolução das descargas e dos parâmetros detectáveis que possibilitam a avaliação desses processos, notadamente dos campos elétricos resultantes na fase de formação do fenômeno.

O capítulo 3 apresenta as contribuições desta dissertação, mostrando inclusive os resultados e conclusões originais associados à ocorrência de Componentes M na primeira corrente de retorno e das características de descargas ascendentes em regiões tropicais.

No capítulo 4 são discutidos aspectos básicos relativos aos desenvolvimentos recentes para o aprimoramento de um dispositivo original concebido no LRC para registro das correntes de retorno das descargas atmosféricas.

¹ O LRC - Lightning Research Center - Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas é resultado da parceria entre a Universidade Federal de Minas Gerais e a CEMIG - Companhia Energética de Gerais.

As conclusões e considerações finais são apresentadas no capítulo 5 e no capítulo 6 as referências bibliográficas utilizadas, organizadas segundo a ordem de citação.

2. Formação e Evolução de Descargas Atmosféricas e Parâmetros Associados

2.1. Descrição sucinta da descarga atmosférica

A descarga atmosférica é um fenômeno natural, fonte de distúrbios nos sistemas elétricos e eletrônicos. No Brasil, o problema é intensificado pelo alto índice de incidência de descargas. Neste cenário, é evidente a necessidade do estudo e investigação do fenômeno, reconhecidamente de natureza muito complexa.

Nesta perspectiva, foram instaladas algumas estações de pesquisa em diferentes regiões do planeta, equipadas com recursos para detectar e medir parâmetros associados ao fenômeno. No Brasil foi instalada a Estação do Morro do Cachimbo (MCS), a única operante em regiões tropicais do planeta, localizada nas proximidades de Belo Horizonte e operada pela equipe do LRC.

A descrição do fenômeno é abordada em detalhes em diversos trabalhos do LRC [1]. Nesta seção procede-se apenas a uma síntese de etapas de formação da descarga para fins de contextualização dos tópicos abordados na dissertação.

A descarga atmosférica é um fenômeno que tem sua origem nas nuvens de tempestade. Tais nuvens apresentam acumulação de cargas negativas e positivas, na base e na parte superior, respectivamente. As descargas negativas descendentes

são as mais comuns (cerca de 90% dos eventos) e, por tal motivo, têm sua formação considerada a seguir.

A dinâmica dos processos macroscópicos que ocorrem na nuvem de tempestade pode determinar num certo momento a concentração de grande volume de cargas negativas na parte inferior da nuvem, gerando um campo elétrico intenso, superior à rigidez dielétrica do meio, capaz de levar à ruptura uma região consideravelmente extensa na forma de um canal ionizado de dezenas de metros, mas de raio reduzido, da ordem de centímetros.

Devido ao poder das pontas, há o deslocamento das cargas negativas para a extremidade deste canal condutor mais distante do centro de cargas, com a concentração das cargas negativas no local há intensificação do campo elétrico superposto ao campo de fundo. Tal campo elétrico na extremidade do canal pode ser suficientemente intenso para gerar uma nova ruptura, alongando o canal que também passa a ter o campo intensificado na sua extremidade mais distante do centro de cargas que originou o processo, devido ao deslocamento das cargas negativas para o local.

Esse processo pode se repetir por passos consecutivos e, em alguns casos, a evolução do canal ionizado ocorre verticalmente em direção do solo. Neste caso, o canal é denominado canal descendente.

À medida que o canal carregado se aproxima do solo por passos, a carga induzida neste meio aumenta, num efeito semelhante à aproximação dos eletrodos de um capacitor ao ser submetido a uma determinada diferença de potencial. À medida que evolui, o campo elétrico muito intenso no entorno do canal gera um efeito corona pronunciado que dá origem a um envelope de corona no seu entorno, no qual fica armazenada parte da carga negativa que se deslocou para o canal.

O canal evolui por passos e, quando a distância ao solo é reduzida, da ordem de centenas de metros, o campo elétrico no meio se intensifica enormemente,

sobretudo nas partes elevadas, e faz surgir canais ionizados designados ascendentes, que evoluem em direção ao canal descendente. No caso em que um dos canais ascendentes se conecta ao canal descendente, tem início a corrente de retorno. Esta se constitui basicamente no descarregamento para o solo da carga negativa armazenada no canal e no envelope de corona que o envolve. O fluxo de corrente de descarga pelo canal ionizado gera um aquecimento intenso e um efeito luminoso, o relâmpago. O processo também provoca a expansão do ar e uma onda sonora de choque associada, o trovão.

Uma descrição detalhada deste processo, bem como suas variações associadas aos outros tipos de descargas (positiva, ascendentes), pode ser encontrada em [1]. Vale comentar que a interpretação apresentada deriva da tradicional abordagem desenvolvida por Schonland [2]. A literatura apresenta abordagens alternativas, que contestam a primeira, com destaque para a abordagem desenvolvida por Mazur e Ruhnke [3] baseada nos conceitos de Kasemir [4].

2.2. Parâmetros detectáveis associados aos processos envolvidos no fenômeno

Os processos envolvidos na formação e evolução das descargas implicam em alguns efeitos, que podem ser percebidos à distância e que permitem desenvolver interpretação para o processo que originou o efeito, bem como estimar os impactos correspondentes. Notadamente, os deslocamentos de cargas promovem modificações no campo elétrico ao nível do solo, os processos disruptivos implicam irradiação de campos eletromagnéticos e o fluxo de cargas associado ao seu descarregamento produz correntes detectáveis na base do canal, campos magnéticos e elétricos nas imediações do canal, além de efeito luminoso. A percepção das grandezas envolvidas nestes efeitos e sua medição permitem

desenvolver propostas de interpretação dos processos das descargas que produziram tais efeitos. Sobretudo, quando diferentes grandezas de um mesmo evento são medidas de forma correlacionada, podem-se desenvolver interpretações consistentes, a despeito da percepção à distância do efeito gerado pelo processo.

A medição de correntes de descargas na base do canal tem sido objeto de vasto volume de investigações no LRC [5], [6], [7], [8] e resultados científicos expressivos têm sido alcançados. Mais recentemente, a equipe do LRC tem investigado o uso de outros recursos para pesquisa do fenômeno, particularmente a medição de campos elétricos, magnéticos, luminosidade emitida e imagens de vídeo obtidas com câmeras ultra-rápidas. Nas próximas seções, para fins de registro da experiência desenvolvida pela equipe, consideram-se especificamente interpretações de processos envolvidos na formação e evolução das descargas a partir da variação dos campos elétricos medidos ao nível do solo.

2.2.1. Campo elétrico associado à descarga atmosférica descendente negativa

O processo de formação das descargas envolve disrupções que ocorrem em tempos extremamente curtos, que irradiam, portanto, ondas eletromagnéticas, e deslocamentos relativamente lentos de cargas, perceptíveis nos perfis de campo elétrico ao nível do solo. Esta seção é dedicada aos perfis desses campos elétricos.

A expressão básica do campo elétrico produzido a uma distância r da carga elementar Q é apresentada na expressão 1, onde a constante ϵ é a permissividade do meio, que tem valor $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m no caso do ar.

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} \hat{r} [V / m] \quad (1)$$

Pode-se determinar o campo resultante de configurações complexas e extensas de cargas a partir da aplicação de superposição dos efeitos determinados

pela aplicação desta expressão elementar para os diversos elementos carregados na configuração.

2.2.2. Comparação entre a convenção meteorológica e física para a medição de campo elétrico

A interpretação do significado das curvas de campo elétrico depende da convenção utilizada. A literatura apresenta duas convenções para representação do campo elétrico: a meteorológica e a física. A convenção meteorológica é a mais utilizada nos estudos relacionados ao campo elétrico de descargas atmosféricas, sendo a adotada neste trabalho.

Como apresentado na figura 2.1, o campo elétrico, em condições de bom tempo, tem o sentido da nuvem para o solo, indicando que o solo possui um acúmulo de cargas elétricas negativas. De acordo com a convenção meteorológica ou atmosférica, o sinal de campo elétrico medido é positivo quando o vetor de campo elétrico aponta para o solo. Já a convenção física adota como referência um sistema de coordenadas esféricas com origem no centro da terra, o vetor campo elétrico apontando para tal origem tem sinal negativo [9].

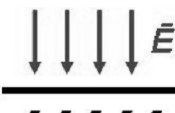
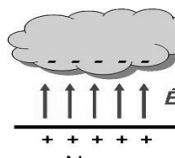
Convenção de Sinais		
FÍSICA	Direção do campo	METEOROLÓGICA
NEGATIVO	 Tempo-bom ("Fair weather")	POSITIVO
POSITIVO	 Nuvem eletricamente carregada	NEGATIVO

Figura 2. 1 – Comparação de sinais entre a convenção física e meteorológica. [10]

Em condições de bom tempo, o campo elétrico próximo à superfície da terra é de, aproximadamente, 100 V/m. Este valor pode variar de região para região. Na estação Morro do Cachimbo, em condições de bom tempo, o campo elétrico tem valor usual da ordem de 400 V/m, quatro vezes superior ao mencionado.

2.2.3. Perfil do campo elétrico associado à ruptura inicial e evolução do canal precursor de descarga

O canal precursor de descarga atmosférica descendente negativa corresponde ao processo de formação do canal que se inicia na nuvem e se aproxima do solo por passos consecutivos, que desloca carga negativa da região de origem do canal em direção ao solo. A evolução implica o aumento da intensidade do campo elétrico vertical medido ao nível do solo, pois, a cada passo, mais cargas se aproximam deste.

A ruptura inicial dá origem à formação do canal ionizado na nuvem. Segundo Rakov e Uman [9], as descargas atmosféricas têm origem neste canal formado a partir de rupturas na forma de descargas elétricas entre o principal centro de cargas negativas e o centro inferior de cargas positivas, localizados na base da nuvem. Quando o canal está direcionado para o solo, ele pode promover o desenvolvimento do canal precursor de descarga nuvem-solo.

A figura 2.2 apresenta dois perfis diferentes da evolução do campo elétrico durante a formação de uma descarga descendente negativa, medidos ao nível do solo, com o sensor posicionado a diferentes distâncias da sombra do canal precursor. O perfil de campo **(a)** representa uma medição de campo elétrico próximo (distâncias inferiores a 5 km). O perfil de campo **(b)** representa o perfil de um campo elétrico distante (distâncias superiores a 5 km). [9]

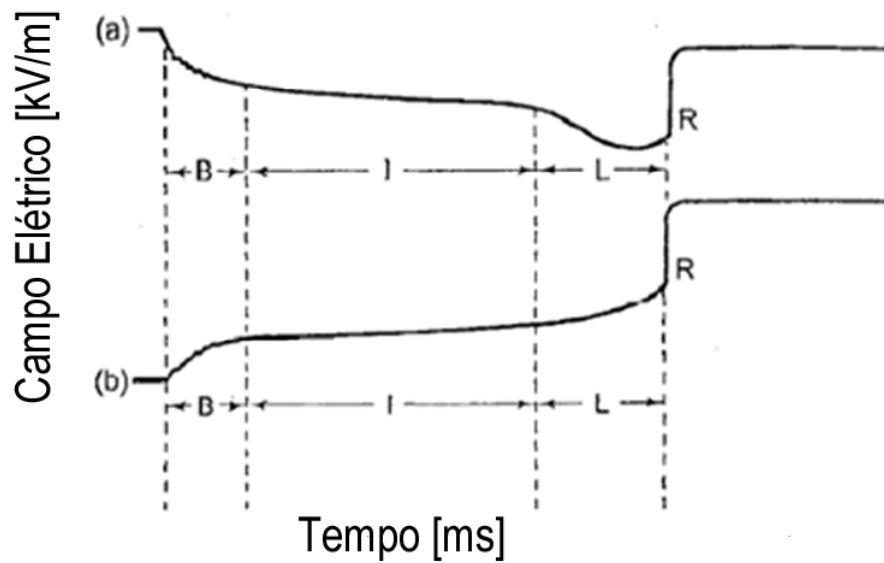


Figura 2.2 - Perfil do campo elétrico associado à fase preliminar da formação do canal descendente de acordo com a convenção meteorológica. As indicações B, I, L, e R referem-se à ruptura inicial, fase intermediária, canal precursor de descarga, e corrente de retorno, respectivamente. Adaptado de [9].

As indicações B, I, L, e R referem-se à ruptura inicial (*breakdown*), fase intermediária (*intermediate*), e evolução do canal precursor de descarga (*leader*), seguido da descarga de retorno R (*return stroke*), respectivamente. Note que, a despeito das diferenças nos perfis de campo elétrico próximo e distante, verifica-se que a variação no campo associado à corrente de retorno é positiva nos dois casos, indicando a transferência para a terra de carga elétrica negativa.

A análise da figura 2.2 apresentada a seguir baseia-se na interpretação de Clarence e Malan [11]. A figura 2.2 (a) corresponde ao campo elétrico vertical próximo, onde predomina a influência dos dipolos constituídos pelos centros de cargas negativas na base da nuvem e correspondentes cargas positivas induzidas no solo na região restrita basicamente à sombra da nuvem carregada. Nessa figura, o perfil de campo elétrico representado pela letra **B** corresponde à ruptura inicial, que tem duração típica de 2 a 10 ms. Frequentemente, a ruptura inicial é seguida por uma fase intermediária (**I**). Algumas vezes, tal fase intermediária não existe, ou seja, a ruptura inicial é seguida imediatamente pela fase correspondente ao desenvolvimento do canal precursor de descarga por passos (fase **L**). A fase

intermediária é interpretada como o período necessário para acúmulo de carga na base do canal formado pela ruptura inicial, no volume requerido para assegurar níveis de campo elétrico suficiente para as rupturas consecutivas na extremidade inferior do canal que formam por passos o canal precursor da descarga. À medida que o canal evolui e a carga em sua extremidade se aproxima do solo, o campo elétrico vertical ao nível do solo vai se intensificando, como observado na fase L. Na etapa final dessa fase, há o aparecimento do canal ascendente, cujas cargas podem em alguns casos, notadamente quando o sensor para medição de campo elétrico está muito próximo da sombra do canal descendente, reduzir a intensidade do campo. Logo após o encontro dos canais ascendente e descendente inicia-se o fluxo da corrente da descarga de retorno, que bruscamente reduz a intensidade do campo, pois o potencial do solo é transmitido ascendentemente ao longo do canal de descarga pela corrente de retorno, como representado pela letra R na figura 2.2 (a).

Proctor et al [12] consideram a fase intermediária e a ruptura inicial eventos associados ao desenvolvimento do canal precursor da descarga atmosférica. A ruptura representa o início do canal precursor. A fase intermediária está associada às dificuldades de se prover cargas para evolução do canal, em decorrência do percurso geométrico dos passos do canal ou de outros deslocamentos de cargas de descargas entre nuvens.

Quando se considera o perfil do campo distante (figura 2.2 (b)), prevalece o efeito da carga total da nuvem, cujo efeito global tende a se anular rapidamente, pois, a despeito das posições dos centros geométricos das cargas positivas e negativas não serem coincidentes, a carga total da nuvem é aproximadamente nula. Neste sentido, em pontos distantes, o deslocamento de parcela da carga negativa em direção ao solo e sua eliminação tende a reforçar o efeito da carga positiva, responsável pelo aumento do campo associado positivo ao nível do solo. Tal comportamento fica mais evidente quando se consideram as condições mencionadas na próxima seção.

2.2.4. Simulação de perfis de campo elétrico vertical ao nível do solo e sua comparação a perfis medidos

Como considerado na seção anterior, os perfis de campo elétrico próximo e distante são diferentes.

Nesta seção, apresentam-se resultados de simulação de campo elétrico para descarga negativa descendente, a partir de um modelo simplificado de distribuição de cargas proposto por Rakov e Uman [9], um tripolo sobre um solo perfeito, representado na figura 2.3.

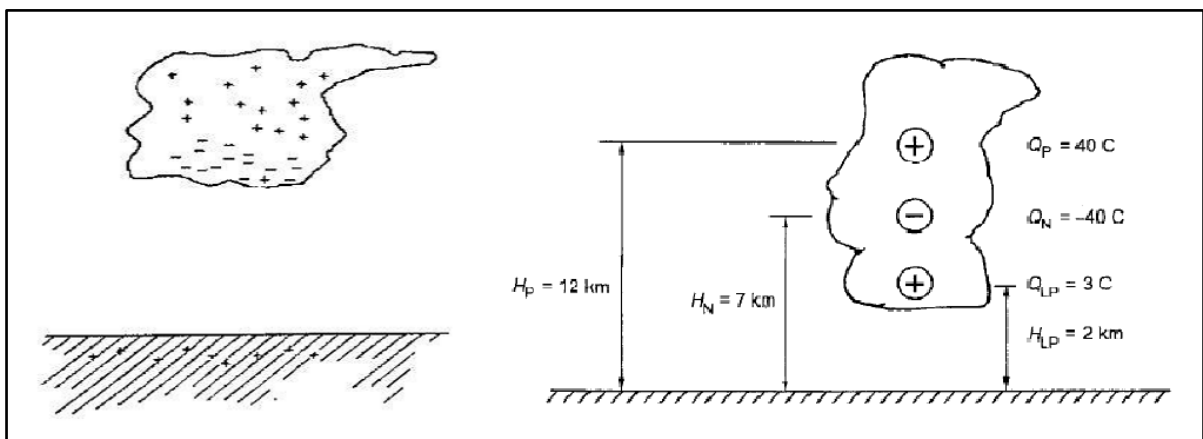


Figura 2.3 - Diagrama ilustrativo da distribuição de cargas de uma nuvem eletricamente carregada e do modelo tripolo que representa tal nuvem. Adaptado de [9].

O modelo é composto por três centros de cargas. Os termos H_P , H_N , H_{LP} representam a altura do centro de carga positivo, negativo e inferior positivo, respectivamente. Os termos Q_P , Q_N , Q_{LP} indicam o valor da carga do centro de carga positivo, negativo e inferior positivo, respectivamente. Na simulação utilizou-se o método das imagens, sendo o solo substituído por imagens de sinal contrário às cargas reais posicionadas simetricamente em relação à interface solo-ar.

A figura 2.4 mostra como o campo elétrico se distribui à medida que um observador colocado ao nível do solo se afasta da sombra do canal de descarga e indica a contribuição do campo elétrico correspondente a cada uma das 3 cargas

concentradas que representam as regiões contendo os centros de carga de diferentes sinais nas nuvens.

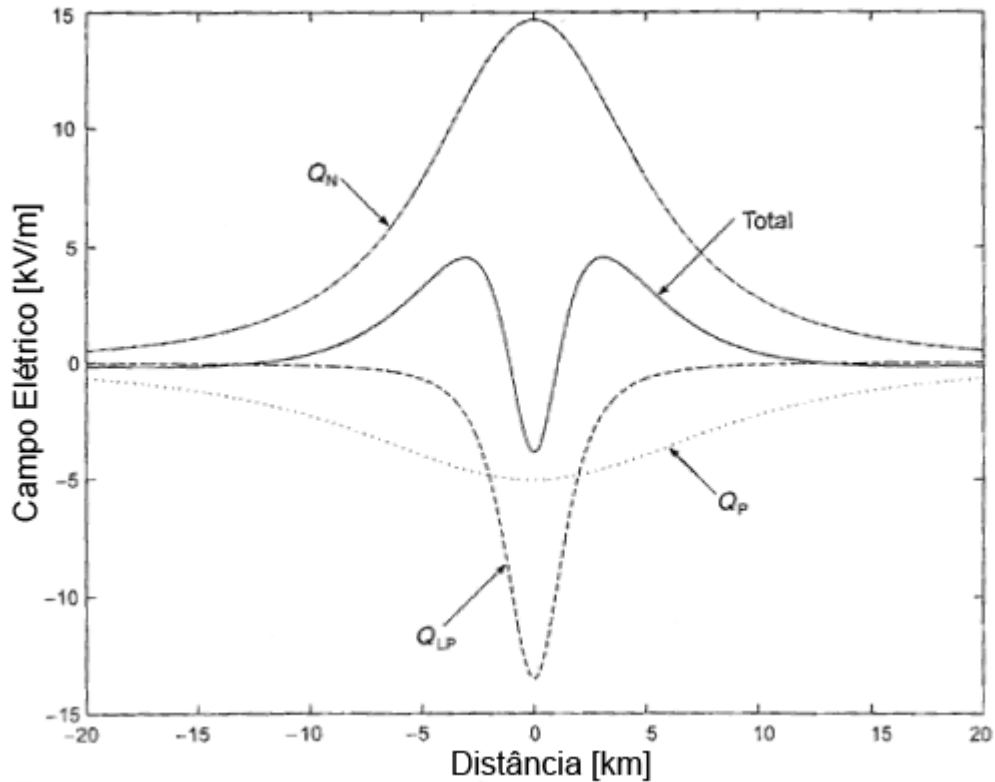


Figura 2. 4 - Perfil do campo elétrico total e das contribuições individuais ao nível do solo associado à distribuição de carga indicada na Figura 2. 3. Adaptado de [9].

Na simulação, o valor da carga dos centros positivos, superior e inferior, é mantido constante, enquanto a carga do centro negativo é subtraída de 5 C, valor típico de carga transferido por uma primeira corrente de retorno. Tal carga é deslocada continuamente em direção ao solo (imaginando que toda a carga do canal precursor de descarga fosse concentrada em sua extremidade) por passos médios de 50 m que ocorrem em média a cada 50 μ s, valores representativos de processos reais. No início da simulação, o intervalo de tempo entre os passos é maior (410 μ s), mas torna menor à medida que o canal se aproxima do solo (mínimo de 10 μ s nos últimos passos). No último passo, a carga de 5 C é desconsiderada nos cálculos, indicando a sua transferência para o solo.

Para cada condição de distribuição de cargas, calcula-se o campo elétrico vertical ao nível do solo para diferentes distâncias à sombra do canal descendente, segundo uma abordagem eletrostática. A figura 2.5 ilustra o efeito simulado do deslocamento de tal carga no tempo e compara o perfil do campo elétrico simulado e medido para um evento real, para fins de uma análise qualitativa.

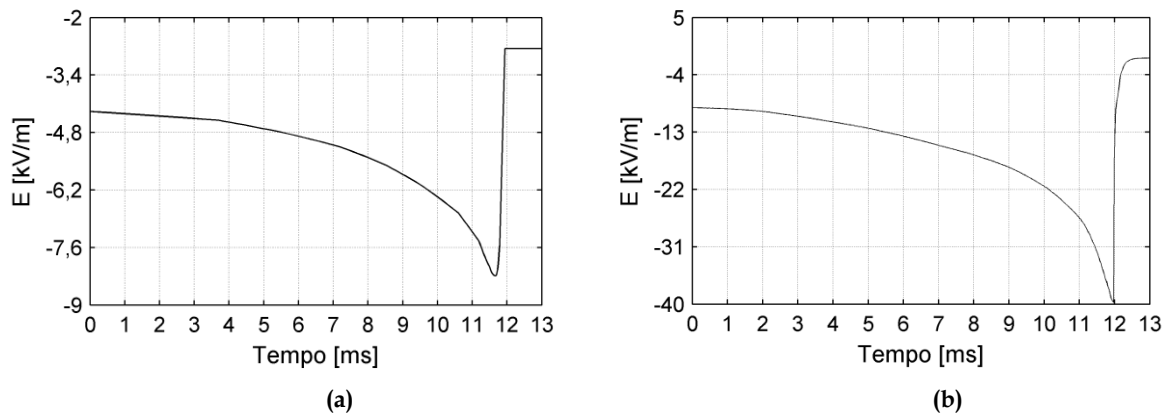


Figura 2. 5 - Comparação entre o perfil dinâmico do campo elétrico simulado e medido em função da aproximação do canal descendente do solo. (a) corresponde ao perfil simulado a uma distância de 2500 metros em relação ao ponto de incidência da descarga. (b) corresponde ao perfil real de campo elétrico, medido na estação MCS, de uma descarga que atingiu um ponto de aproximadamente 900 metros da estação.

Nota-se que o formato do perfil simulado (a) é muito similar ao da medição real (b). À medida que a carga vai aproximando do solo, o valor do campo elétrico vai se tornando cada vez menor e, no momento em que ocorre o fluxo da corrente de retorno há uma variação brusca do campo, ficando uma diferença líquida positiva entre o campo inicial e final associado ao excesso de carga positiva de 5 C resultante na nuvem. Para tornar o perfil simulado mais próximo da realidade, foi importante a consideração na simulação da velocidade de deslocamento de carga para o solo não uniforme, como descrito anteriormente.

Com o intuito de investigar a variação do perfil de campo elétrico em relação à distância, a posição do sensor de campo foi variada em relação à sombra do canal: 5000 m, 7500 m e 10000 m do ponto de incidência. A figura 2.6 mostra os resultados para distâncias de 5000 m e 7500 m, que correspondem à condição de transição entre o perfil típico de campos próximos e distantes.

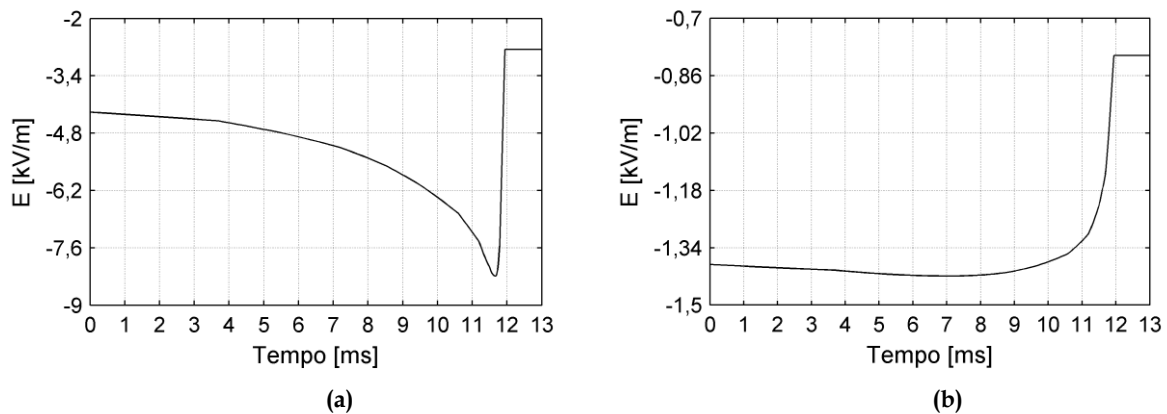


Figura 2. 6 - Perfis de campo elétrico simulado para distâncias 5000 m (a) e 7500m (b).

A simulação de 10000 m corresponde a um típico perfil de campo elétrico distante. A figura 2.7 representa a comparação entre o perfil de um campo elétrico real distante com o perfil simulado.

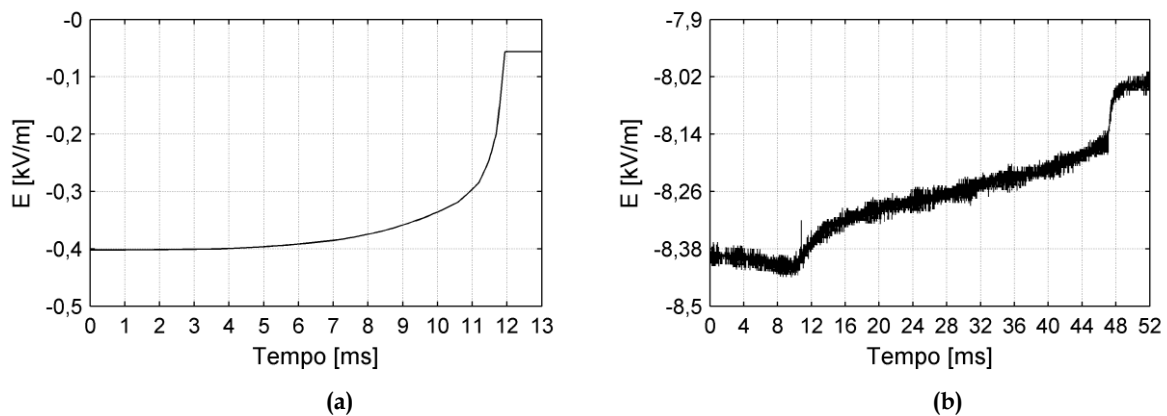


Figura 2. 7 - Comparação entre o perfil de campo elétrico simulado e medido. (a) corresponde ao perfil simulado a uma distância de 10000 metros em relação ao ponto de incidência da descarga. (b) corresponde ao perfil real de campo elétrico medido na estação MCS de uma descarga que atingiu um ponto aproximadamente de 13000 metros da estação.

O perfil de campo no registro do campo medido (figura 2.7 b), que inclui as quatro fases (BIL + R), mostra similaridade com aquele da figura 2.2 (b). O perfil do campo simulado tem aparente diferença em relação ao medido. Entretanto, quando se considera que a simulação corresponde apenas à parcela do comportamento do campo nas três fases (intermediária (I), de evolução do canal precursor (L) e da descarga de retorno (R)), a similaridade fica evidente. Tal similaridade é mais pronunciada em relação ao perfil da figura 2.2 (b) na fase L.

Os resultados de simulação mostram claramente a inversão no comportamento do perfil do campo elétrico, quando se considera o sensor próximo ou distante do ponto de incidência.

2.2.5. Variações do campo elétrico devido às correntes de retorno das descargas descendentes negativas

O perfil de campo elétrico correspondente à fase anterior da corrente de retorno foi apresentado no perfil BIL, ilustrado na figura 2.2. Esta seção considera tal perfil, mas com foco na variação do campo associada especificamente ao fluxo da corrente de retorno da primeira descarga e das descargas subsequentes (estas últimas ocorrem em cerca de 80% das descargas negativas descendentes).

A figura 2.8 apresenta um exemplo de registros de campo elétrico e da variação de campo elétrico no tempo (dE/dt) medidos num sensor distante. Tais registros correspondem a um evento que incidiu em um ponto distante aproximadamente 19 km dos sensores, instalados no Novo México. É importante lembrar que apresentação do registro segue convenção meteorológica para o campo elétrico.

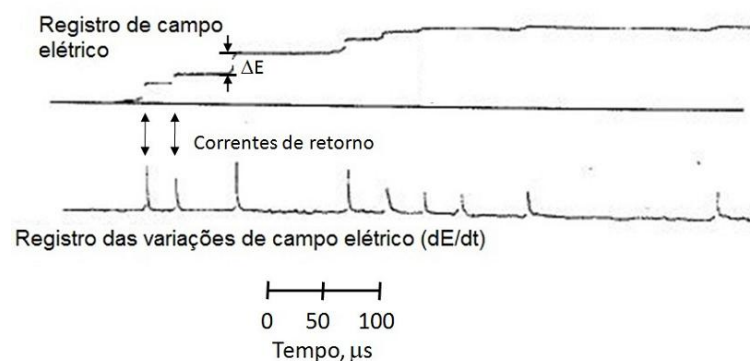


Figura 2. 8 - Exemplo de medição de campo elétrico de um evento com múltiplas correntes, a uma distância de 19 km da estação de pesquisa. A descarga atmosférica foi medida no Novo México, seguindo a convenção meteorológica. Adaptado de [9], [10].

Na figura correspondente ao perfil de campo elétrico, é possível visualizar os degraus de variação positiva do campo. A variação muito rápida decorre do tempo muito curto em que as cargas negativas são transferidas para o solo por meio da corrente de retorno.

O campo elétrico medido no Novo México se assemelha muito às medições de campo elétrico distante, realizadas na estação MCS. A figura 2.9 apresenta uma medição de campo elétrico distante e de sua variação no tempo para uma descarga negativa descendente envolvendo seis correntes de retorno. A descarga incidiu num ponto distante de aproximadamente 13 km dos sensores da estação MCS, segundo o registro correlacionado do sistema de detecção e localização de raios (LLS²), que estimou o pico da primeira corrente de retorno em -20 kA.

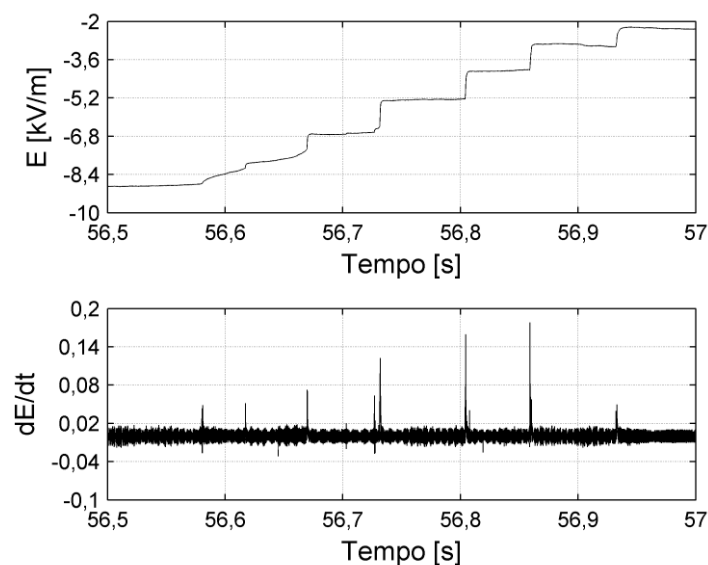


Figura 2. 9 - Medição de um perfil campo elétrico de uma descarga elétrica negativa distante da estação MCS.

² LLS, do inglês *Lightning Location System*, é um sistema constituído por estações terrestres remotas detetoras de campos irradiados pelas descargas atmosféricas e por uma central de processamento. Utilizando os dados dos sensores sensibilizados pelo campo irradiado pela descarga, a central estima a localização da descarga e a amplitude da corrente.

Já a figura 2.10 apresenta um registro de medição do campo elétrico e da variação no tempo deste, de uma descarga negativa descendente que, no dia 19 de outubro de 2012, incidiu a menos de 1 km de MCS, segundo o sistema de detecção de raios.

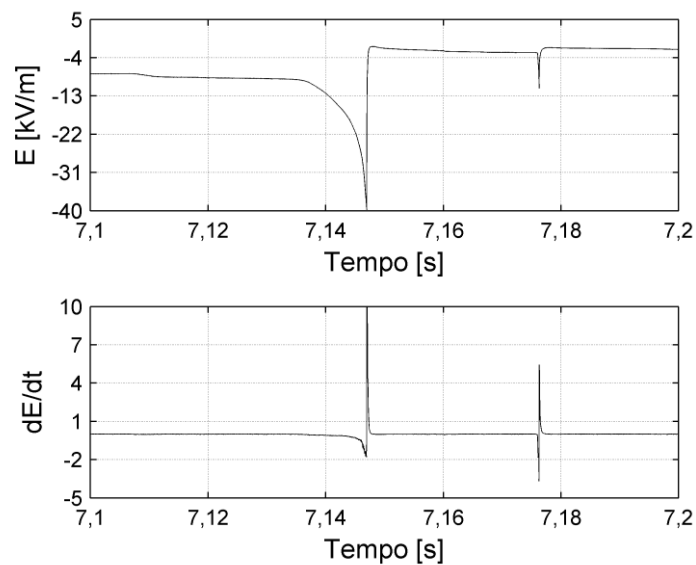


Figura 2. 10- Medição de um campo elétrico de uma descarga elétrica negativa próxima à estação MCS.

Percebe-se a similaridade do perfil de campo elétrico medido da figura 2.10 com aquele da figura 2.2 (a) para o campo próximo.

O LLS indicou a incidência a uma distância de 870 m da estação MCS e um valor de pico para a primeira corrente de retorno de aproximadamente -27 kA. Informou, também, o intervalo de tempo entre a descarga de retorno e a corrente subsequente de aproximadamente 29 ms, o mesmo intervalo observado no perfil de campo medido.

2.2.6. Perfil de campo elétrico associado à componente contínua

Outro processo importante que ocorre na evolução das descargas corresponde à componente contínua da corrente de descarga. Tal processo ocorre após o fluxo da corrente de retorno apenas em alguns eventos de descargas, sendo mais comum entre duas descargas subseqüentes. Consiste na transferência de cargas da nuvem para a terra por meio de uma pequena corrente usualmente da ordem de dezenas de amperes (correntes superiores a 100 A são também registradas em alguns casos), que ocorre enquanto o canal está ainda ativo (mantém boa condutividade). Apesar do valor reduzido da corrente, a carga transferida pode ser muito elevada, bem superior a de um pulso de corrente de retorno, pois a corrente tem longa duração, da ordem de centenas de milissegundos, ultrapassando 1 s em alguns casos. Os efeitos joulicos desta componente contínua podem ensejar prejuízos para sistemas elétricos de potência, pela produção de calor na interface do canal de descarga com condutores. São comumente atribuídos a tal corrente os danos e a eventual ruptura de cabos OPGW (*optical ground wires*) usados na blindagem de linhas de transmissão contra descargas atmosféricas [9] [1].

A figura 2.11 mostra um perfil de campo elétrico que contém o efeito de uma componente contínua, numa descarga que apresentou quatro descargas individuais.

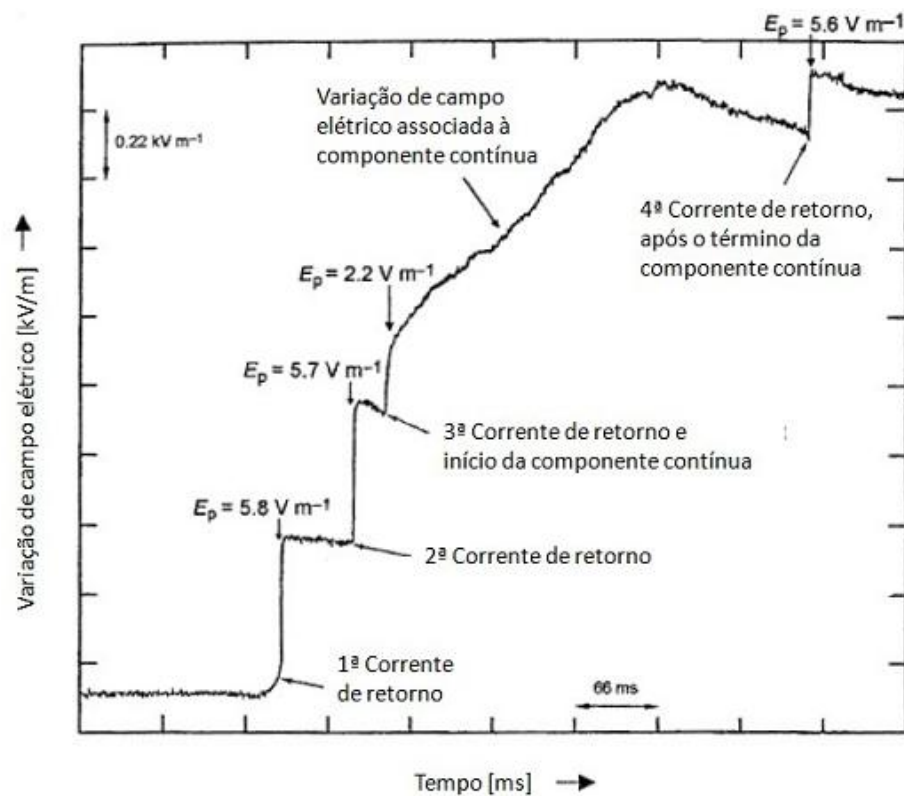


Figura 2. 11 - Perfil de campo elétrico associado à descarga atmosférica, com ênfase a componente contínua. [9]

A variação lenta de campo elétrico entre a 3ª e a 4ª correntes de retorno é associada à componente contínua. Nota-se que a variação do campo elétrico nesse período é superior à variação de campo proporcionada por qualquer uma das quatro correntes de retorno, o que indica que a componente contínua da corrente de descarga foi responsável pela transferência de carga superior àquela transferida pelas correntes de retorno individuais. Embora a corrente contínua seja reduzida, a sua duração por um intervalo de tempo da ordem de 200 ms resulta na transferência de carga maior que as correntes de retorno. Tipicamente, a primeira corrente de retorno e correntes subsequentes transferem cargas da ordem de 5 C e 1 C, respectivamente [1].

2.2.7. Perfil de campo elétrico da Componente M da corrente de descarga

A componente M é considerada uma forma de transferência de cargas da nuvem para o solo, sendo capaz de transferir cargas usuais da ordem de vários décimos de Coulombs, assim como as menores descargas subseqüentes. Em alguns eventos a carga transferida ultrapassa 1 C, ordem de grandeza da mediana da carga transferida por descargas subseqüentes.

Quando se considera o degrau na variação do campo elétrico associado à corrente de retorno numa escala muito ampliada, percebe-se, em alguns casos, notadamente quando se consideram descargas subseqüentes, um padrão típico de variação do campo de formato aproximadamente triangular que é apresentado na figura 2.12 [9].

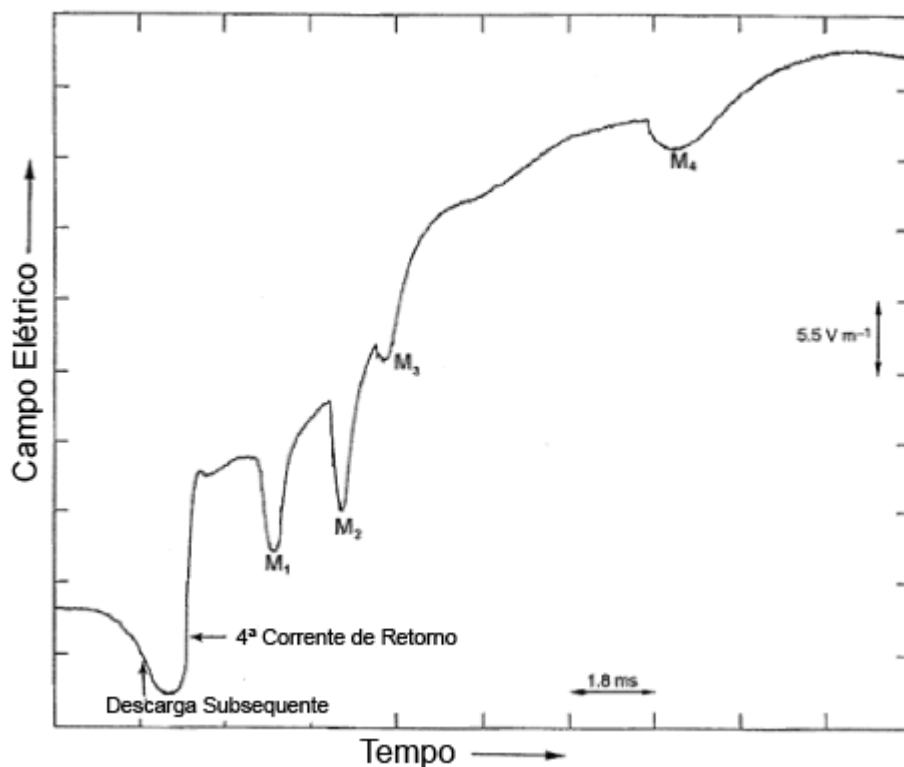


Figura 2. 12 - Perfil da variação de campo elétrico de uma descarga subseqüente e identificação da assinatura típica da Componente M. [9]

A figura 2.12 ilustra o perfil de variação de campo elétrico de uma descarga subsequente seguida por 4 Componentes M, denominadas M_1 , M_2 , M_3 e M_4 . Nota-se, no gráfico, que as Componentes M têm uma variação no perfil de campo elétrico bem definido. Mais detalhes do perfil do campo elétrico das Componentes M serão tratados no capítulo 3 deste texto.

2.2.8. Perfil de campo elétrico de descargas ascendentes negativas

A maior parte das descargas naturais é do tipo negativa descendente, ou nuvem-solo negativa, aproximadamente 90% dos casos [1]. A designação negativa decorre da transferência de carga negativa da nuvem para o solo e o termo descendente decorre da direção de formação o canal de descarga, que tem sua origem na nuvem e evolui em direção ao solo. Um pequeno número de descargas é do tipo ascendente.

Usualmente, as descargas ascendentes têm origem em estruturas muito elevadas posicionadas em destaque no relevo. Neste caso, mesmo à distância considerável, os centros de cargas da nuvem são capazes de induzir altas densidades de cargas de sinal contrário nas extremidades das estruturas e nas elevações onde estas estão situadas. Em alguns casos, podem induzir campos elétricos muito intensos capazes de causar o aparecimento e sustentar a evolução de canais de descargas ascendentes. Tais canais evoluem em direção à nuvem e transferem cargas do solo para a atmosfera. Em alguns casos, interceptam canais de descargas em desenvolvimento na nuvem, usualmente associados à indução do evento ascendente, e nesta situação pode haver o carregamento do canal ascendente, seguido de uma corrente de retorno.

Em regiões tropicais, como o Brasil, descargas ascendentes são extremamente raras, pois, devido às elevadas temperaturas, as nuvens de tempestade têm seus centros de carga muito elevados em relação ao solo.

Entretanto, em regiões temperadas da Europa, Ásia e América do Norte, onde as temperaturas são muito menores e os centros de carga das nuvens muito baixos, tais eventos são relativamente comuns, quando há estruturas muito elevadas no alto de colinas. Com frequência, isto ocorre no caso de torres de telecomunicações de altura superior a 100 m, de turbinas eólicas e de outros objetos elevados.

A figura 2.13 mostra um perfil típico do campo elétrico (a) e da corrente do estágio inicial (b) de uma descarga negativa ascendente [9]. Note como o campo elétrico e a corrente têm perfis muito diferentes daqueles das descargas descendentes negativas.

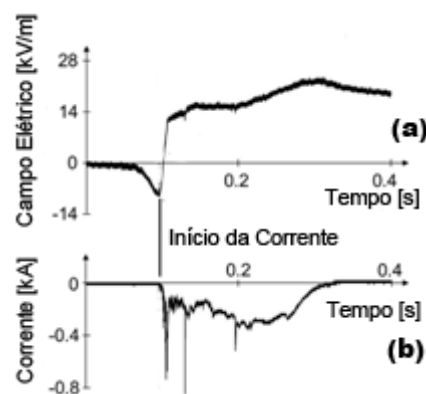


Figura 2. 13 - (a) Perfil de variação de campo elétrico de uma descarga ascendente negativa. (b) Perfil de corrente típico de uma descarga ascendente negativa. A medição de campo elétrico foi realizada a uma distância de 189 m da descarga. Adaptado de [13].

Diendorfer et al. [20] sugere um perfil típico para correntes de descargas ascendentes, figura 2.13. Tal perfil inclui o estágio inicial (IS) que é formado por uma corrente contínua (*continuous current*) ICC e pulsos I_P sobrepostos. Em alguns eventos podem ocorrer descargas de retorno (RS).

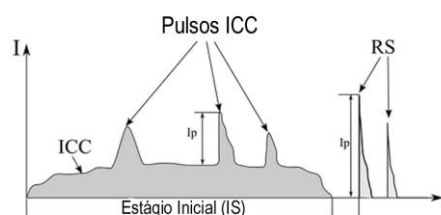


Figura 2. 14 - Perfil típico de uma corrente de descarga ascendente. Adaptado de [20]

3. Contribuições Científicas Recentes sobre Descargas Atmosféricas Baseadas na Medição de Campos e Correntes

3.1. Os recursos para medição de campos e correntes da Estação do Morro do Cachimbo

Atualmente a estação MCS dispõe de uma infra-estrutura avançada para medição de parâmetros de descargas, notadamente para obtenção de registros de corrente, de campo elétrico e de filmagem de eventos incidentes na torre ou em suas proximidades.

O sistema de medição de campos elétricos consta de duas antenas *Whip* e um sensor *Field Mill* para estabelecimento de referências de campo aplicável às variações de campo elétrico medidas pelas antenas. Os dados obtidos das descargas incidentes na torre ou próxima são digitalizados por meio de uma placa de aquisição de dados à taxa de 100.000 amostras por segundo (100 kS/s). Este sistema é descrito em detalhes em [10] e [14].

O sistema de medição de corrente consta de uma torre instrumentada de 60 metros de altura tendo como suporte cabos isolados. Na sua base há duas bobinas

3. Contribuições Científicas Recentes sobre Descargas Atmosféricas Baseadas na Medição de Campos e Correntes

de *Pearson*, que são usadas como transdutores de corrente para medição de corrente de até 9 kA e de até 150 kA. As resoluções do sistema de medição para a bobina até 9 kA e 150 kA são ± 10 A e ± 72 A, respectivamente. O nível de ruído identificado é de ± 10 A e os limites de frequência das bobinas são de 0,25 Hz e 4 MHz, 3 Hz e 1,5 MHz para a escala menor e maior, respectivamente. O sinal captado pelas bobinas é direcionado a uma placa de aquisição que está configurada para operar a uma taxa de 60 milhões de amostras por segundo (60 MS/s), com uma resolução de aproximadamente 17 ns. O sistema foi projetado para que toda corrente na torre superior ao limiar de 60 A fosse gravada. O registro de corrente de 500 ms inclui um intervalo de 15 ms anterior à ocorrência do limiar (*pré-trigger*). Com o intuito de aumentar a confiabilidade dos resultados de medição, outro sistema com configuração similar à descrita funciona em paralelo com o sistema principal, para oferecer resultados redundantes.

Para registro dos vídeos utilizados neste trabalho, foi desenvolvido um sistema que utiliza uma câmera de alta velocidade, instalada a 600 m de distância em relação à torre instrumentada. Tal câmera foi configurada para operar a uma taxa de 4.000 quadros por segundo com uma janela de tempo de aquisição de 4 s. Assim que o sistema de vídeo recebe a informação, via comunicação de rede sem fio, indicando que na torre instrumentada há um fluxo de corrente superior a 200 A, a gravação do vídeo é acionada. O registro gravado inclui um período anterior ao comando de 3,25 s. Ambos os sistemas, de corrente e de registro de vídeos, são sincronizados por GPS (*Global Positioning System*). Após a última temporada de tempestades, quando foram realizadas as medições referidas neste trabalho, a câmera em uso (4.000 quadros por segundo) foi substituída por outro modelo mais rápido. Atualmente o sistema está funcionando a uma taxa de 20.000 quadros por segundo com uma janela de tempo de aquisição de 2,5 segundos. Além do aumento na velocidade de gravação, também houve significativo aumento no campo de visão da nova câmera.

Na estação registrou-se, também, a luminosidade do canal de descarga a partir de um sensor instalado sobre telhado do abrigo principal, que aponta para o topo da torre. O sistema que inclui tal sensor permite observar as variações de luminosidade durante o período do fluxo da corrente de retorno. [14]

3.2. Contribuições científicas recentes

No contexto desta dissertação foram realizadas contribuições importantes para a evolução do conhecimento sobre as descargas atmosféricas, os processos envolvidos em sua formação e seus efeitos.

Particularmente, neste capítulo, são considerados alguns resultados originais, relativos à medição e análise de Componente M e descargas negativas ascendentes.

3.3. Contribuições relativas à Componente M

3.3.1. Fundamentos da Componente M

Segundo Rakov e Uman [9], a Componente M constitui um modo de transferência de carga da nuvem para o solo, assim como a seqüência do desenvolvimento do canal de descarga/corrente de retorno e a componente contínua da corrente de descarga.

Malan e Collens [15] foram os pioneiros na investigação do fenômeno, identificado inicialmente como um aumento da intensidade luminosa do canal da descarga quando este se encontra em fase de extinção. Alguns anos depois

identificaram este evento como uma assinatura típica com formato aproximado de um gancho (*hook like shape*) no perfil dos campos elétricos de descargas.

Mazur et al. [3] argumentam que o termo "Evento M" seria mais apropriado para descrever este processo que efetivamente se constitui na interceptação do canal luminoso conectado ao solo durante a fase em que ainda flui corrente neste, após o fluxo da corrente de retorno pelos designados *recoil leaders*. O produto desta interceptação são os surtos de corrente ao longo do canal que são as Componentes M.

As Componentes M foram investigadas em descargas naturais a partir dos campos elétricos medidos a distâncias usualmente inferiores a 10 km [14]. Foram também investigadas em descargas iniciadas artificialmente a partir de estruturas elevadas (*object-initiated lightning*) e descargas induzidas por foguetes (*triggered-lightning*) através das correntes medidas na base do canal e dos campos elétricos associados. Fundamentalmente, as Componentes M são encontradas superpostas à componente contínua após descargas subseqüentes. No caso de descargas artificiais, são também encontradas superpostas à corrente de baixa intensidade em seu estágio inicial (*continuous current*), enquanto esta cresce lentamente. A literatura reporta a expectativa de um número muito reduzido de Componentes M seguindo a primeira corrente de retorno da primeira descarga, baseado no número muito reduzido de primeiras correntes que são seguidas por componente contínua.

3.3.2. Resultados deste trabalho

A corrente de Componentes M de descargas naturais não havia ainda sido medida até recentemente. Esta seção trata de um resultado original, a medição da corrente e de sua interpretação, realizados no contexto desta dissertação: duas Componentes M de descargas naturais. Ademais, a medição refere-se à Componente M após a primeira corrente de retorno, evento considerado

3. Contribuições Científicas Recentes sobre Descargas Atmosféricas Baseadas na Medição de Campos e Correntes

extremamente raro. A medição inclui, ainda, registros correlacionados de corrente, variação de campo elétrico, de vídeo e de luminosidade.

A figura 3.1 mostra a medição da corrente de descarga na qual foram identificadas as Componentes M, realizada na base da torre instrumentada em duas escalas diferentes. Em **(a)** é apresentada uma visão geral do evento e **(b)** corresponde a um detalhamento do registro de **(a)**. Em **(b)** é identificado que o pico da corrente foi de aproximadamente -23 kA e que o nível de ruído foi muito baixo. É importante mencionar que nenhum filtro foi usado nas medições apresentadas. A qualidade alcançada nos registros se deve às melhorias realizadas no sistema de medição de MCS.

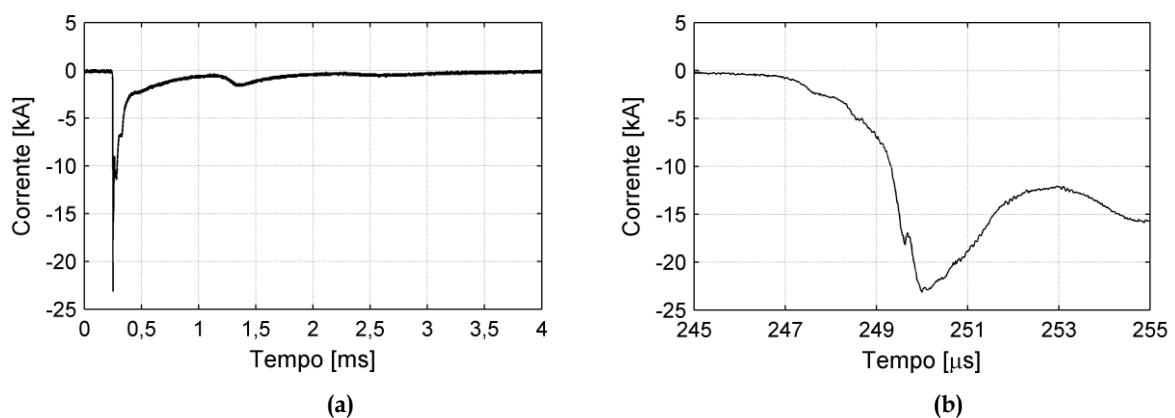


Figura 3. 1 - Forma de onda de corrente medida em 19 de outubro de 2012. (a) Visão geral do evento (b) detalhamento da frente da onda. [14]

Os registros de campo elétrico mostrados adiante indicaram duas perturbações no estágio final da variação do campo durante o fluxo da corrente de retorno com a assinatura típica de Componentes M. Também, os registros de vídeo considerados adiante mostraram o reacendimento do canal em dissipação, como é típico nessa Componente. Nos instantes de reacendimento identificou-se a forma de gancho no registro de campo elétrico.

Devido a alta resolução no sistema de medição de corrente em MCS, foi possível notar as duas perturbações na calda da onda de corrente, que ocorreram

3. Contribuições Científicas Recentes sobre Descargas Atmosféricas Baseadas na Medição de Campos e Correntes

em 0.8 ms e 2 ms depois do pico da corrente. Elas foram identificadas ainda quando fluía corrente pelo canal de descarga. As perturbações são apresentadas, em detalhe, na figura 3.2. O perfil é muito semelhante ao típico padrão de Componente M medido em descargas artificiais [9]. Os registros correlacionados de vídeo e de campo elétrico comprovam e não deixam dúvida de que se trata deste tipo de evento. [14]

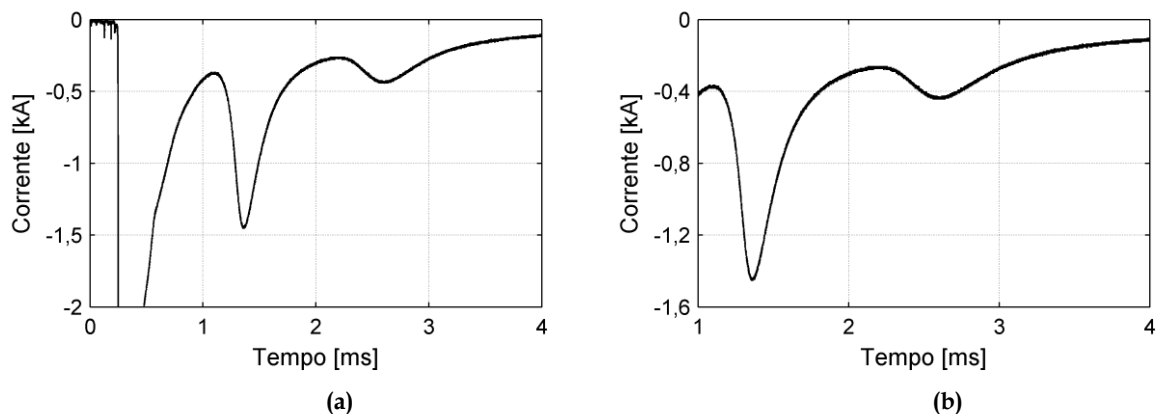


Figura 3. 2 - Forma de onda de corrente com ênfase nas perturbações. (a) ilustra as perturbações junto a fase impulsiva. (b) corresponde a um detalhamento apenas das perturbações. [14]

O perfil de campo elétrico para o mesmo evento foi sincronizado com a corrente, como mostra a figura 3.3. A assinatura típica de campo elétrico para a Componente M condiz com a medição de corrente. Nota-se, ainda, outra assinatura típica para o primeiro surto de corrente. Nesta, o pico do campo elétrico é adiantado em relação ao pico da corrente. Este fato já havia sido observado por Rakov e Uman [9] em descargas induzidas por foguetes e por Mazur e Ruhnke [3] em descargas ascendentes.

3. Contribuições Científicas Recentes sobre Descargas Atmosféricas Baseadas na Medição de Campos e Correntes

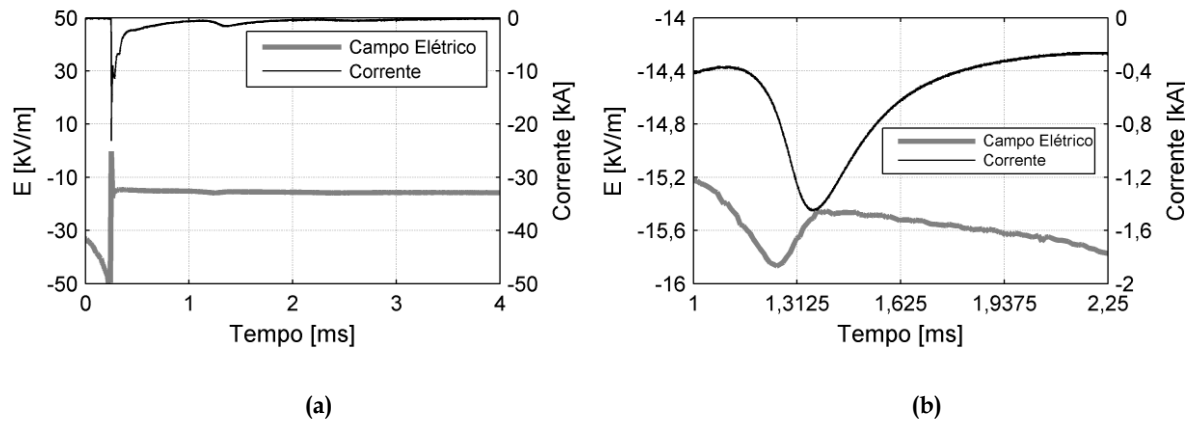


Figura 3. 3 - Perfil de campo elétrico sincronizado com a corrente medida em MCS. [14]

Para o evento em questão houve um registro de vídeo com a câmera de alta velocidade (4.000 quadros por segundo) e tal registro foi sincronizado com a corrente, como mostra a figura 3.4.

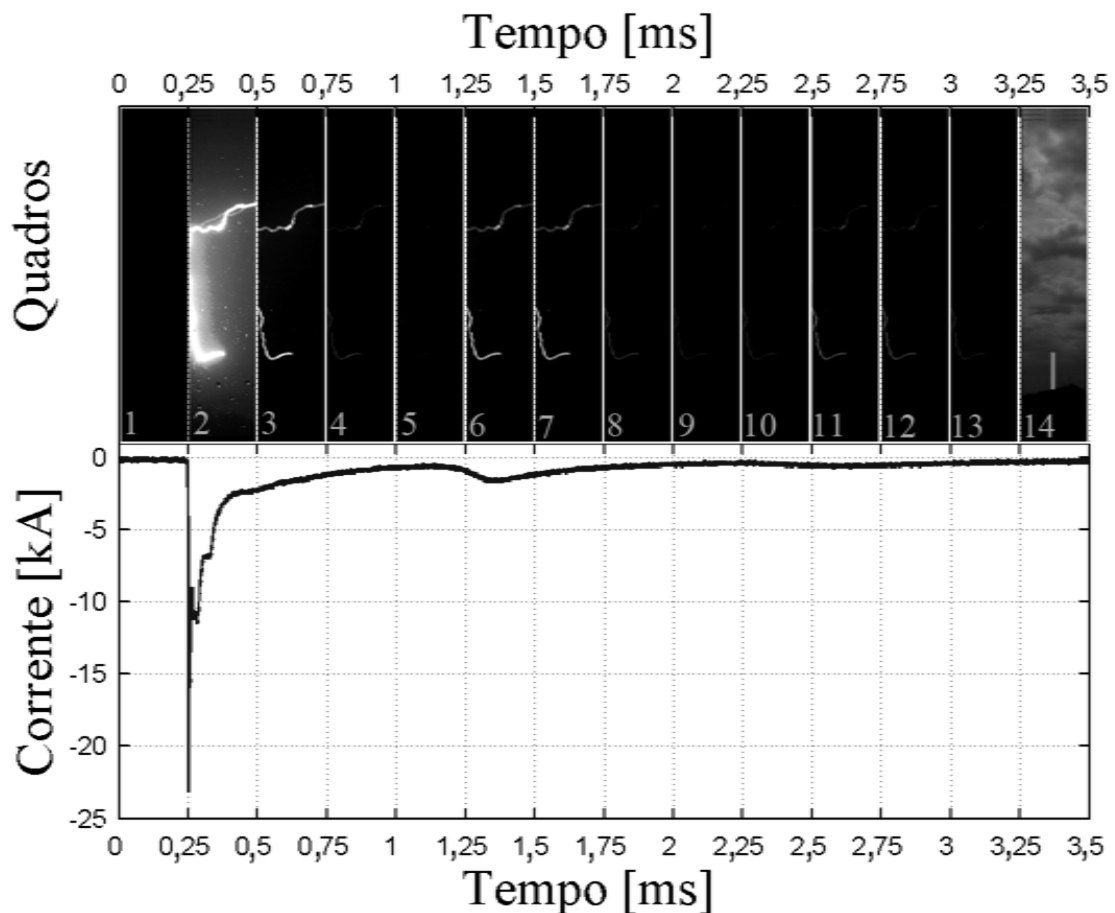


Figura 3. 4 - Sincronização dos quadros do vídeo gravado pela câmera de alta velocidade com o registro de corrente.

O quadro 14 na figura 3.4 não corresponde a um quadro real do evento, mas a uma referência para indicar a posição da torre instrumentada no campo de visão da câmera. O primeiro quadro corresponde à fase de formação do canal precursor de descarga, no qual nenhuma luminosidade foi detectada. O segundo quadro refere-se à ocorrência da parcela de maior amplitude da corrente de retorno, incluindo o seu pico, onde se verifica a maior intensidade luminosa do canal. Nos quadros seguintes, à medida que a corrente decresce, a luminosidade também diminui até que o sinal luminoso praticamente não seja detectado, como no quadro 5, apesar de ainda fluir uma corrente reduzida. O quadro 6 corresponde ao início da Componente M. Há aumento da intensidade luminosa do canal, que diminuiu

3. Contribuições Científicas Recentes sobre Descargas Atmosféricas Baseadas na Medição de Campos e Correntes

no quadro 7 quando a corrente da Componente M decresce. Praticamente não se percebe luminosidade a partir do quadro 8. Novamente, há um aumento da luminosidade do canal (quadro 11), quando ocorre o fluxo de corrente da segunda Componente M do evento. Esta teve intensidade menor do que a da primeira, o que justifica o efeito luminoso mais intenso no quadro 6 do que no quadro 11. Com a redução da corrente da segunda Componente M, a luminosidade diminui e, a partir do quadro 13, nenhuma luminosidade é percebida no registro do vídeo.

Também foram obtidos registros correlacionados de corrente das Componentes M e de intensidade luminosa relativa, por meio do sensor óptico instalado em MCS, como mostra a figura 3.5. Para efeito de comparação, a corrente medida teve a polaridade invertida. Nota-se que o sensor detectou uma luminosidade com um crescimento rápido no período referente ao pico da corrente de retorno e crescimento lento para o período das duas Componentes M. Este comportamento condiz com as observações já apresentadas em [9] para sensores apontados para a parte inferior do canal de descarga.

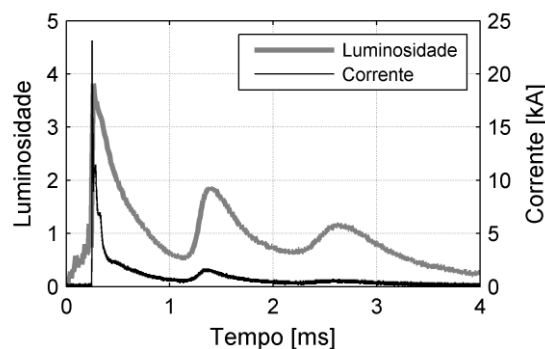


Figura 3. 5 - Registros sincronizados de corrente e de intensidade luminosa relativa.

Embora Malan e Schonland [16] já tivessem obtido medições do perfil do campo elétrico associado à Componente M de primeiras correntes de descargas, porém esta foi a primeira vez que se processou a medição da corrente de Componentes M na primeira corrente de retorno de descargas naturais. Ademais,

3. Contribuições Científicas Recentes sobre Descargas Atmosféricas Baseadas na Medição de Campos e Correntes

tal registro original de corrente de Componente M foi obtido juntamente com registros sincronizados de vídeo, de campo elétrico e de luminosidade.

Foram determinados os parâmetros das correntes das duas Componentes M medidas na descarga e estes foram comparados com aqueles de Componentes M de correntes de descargas induzidas por foguetes [17]. A figura 3.6 mostra os parâmetros analisados da Componente M e a tabela 3.1 mostra tal comparação.

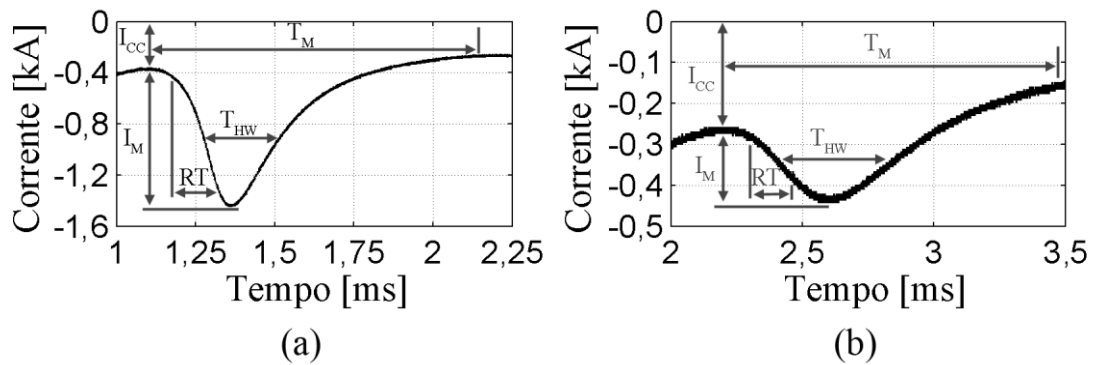


Figura 3. 6 - Parâmetros analisados das duas Componentes M. (a) primeira Componente M. (b) segunda Componente M.

3. Contribuições Científicas Recentes sobre Descargas Atmosféricas Baseadas na Medição de Campos e Correntes

Tabela 3. 1 - Comparação dos parâmetros de Componente M da primeira corrente de retorno medido no MCS e de Componentes M de descargas induzidas por foguetes [17].

Parâmetro	Componentes M de primeira corrente de retorno medida em MCS		Componentes M de descargas induzidas por foguetes.
	Primeira Componente M	Segunda Componente M	Mediana
Magnitude I_M (kA)	1,09	0,19	0,12
Tempo de Crescimento RT (ms)	0,13	0,22	0,42
Duração T_M (ms)	0,78	1,11	2
Largura de meio pico T_{HW} (ms)	0,24	0,38	0,8
Nível corrente contínua I_{CC} (A)	-362	-260	183
Carga Q (C)	0,33	0,09	0,13
Intervalo entre as Componentes M ΔT_M (ms)		1,24	4,9
Tempo após o pico ΔT_{MR} (ms) ^a	0,8	2,0	7,7

^a O tempo decorrido entre os instantes de ocorrência do pico da corrente de retorno e da Componente M.

Nota-se que todos os parâmetros da medição em MCS são compatíveis com os correspondentes das descargas induzidas. Entretanto, enquanto os parâmetros da segunda Componente M têm valor próximo à mediana daqueles das descargas induzidas, os da primeira Componente encontram-se distantes da mediana. Notadamente, a amplitude da corrente, a carga e o limiar da corrente de início da primeira Componente são muito superiores, enquanto todos os parâmetros de tempo são bem inferiores às indicações da mediana.

Outro aspecto relevante associado aos resultados obtidos refere-se à frequência de ocorrência de Componentes M seguindo a primeira corrente de retorno. A literatura aponta que a frequência de ocorrência de Componentes M em primeiras correntes de descargas é muito reduzida. Thottappillil et al. [18] sugerem uma expectativa muito baixa (de uns poucos por cento) da ocorrência de Componente M após a primeira corrente de retorno, baseada no número muito reduzido de primeiras correntes que são seguidas por componente contínua. Tal expectativa se contrapõe aos registros de Malan e Schonland [16]. Esta diferença motivou um estudo da frequência de Componentes M nas primeiras correntes de descargas medidas em MCS e no perfil de campo elétrico de descargas incidentes próximas à estação.

Com relação ao campo elétrico verificou-se, nos registros de campo de três tempestades recentes nas proximidades da Estação, que, em todas, havia percentual superior a 10% das primeiras correntes de retorno apresentando assinaturas típicas de Componente M. Na realidade, acredita-se que este percentual seja muito superior a 10%, uma vez que o sistema de medição de campo elétrico de MCS não fora ajustado para detecção de variações reduzidas de campo elétrico. Muito possivelmente, em vários registros de campo não foram percebidas Componentes M devido à resolução inadequada do sistema e, assim, estas não foram contabilizadas na estatística [14]. A figura 3.7 ilustra dois registros de variação de campo elétrico, nos quais foram identificadas as assinaturas típicas de Componente M em primeiras correntes de retorno.

3. Contribuições Científicas Recentes sobre Descargas Atmosféricas Baseadas na Medição de Campos e Correntes

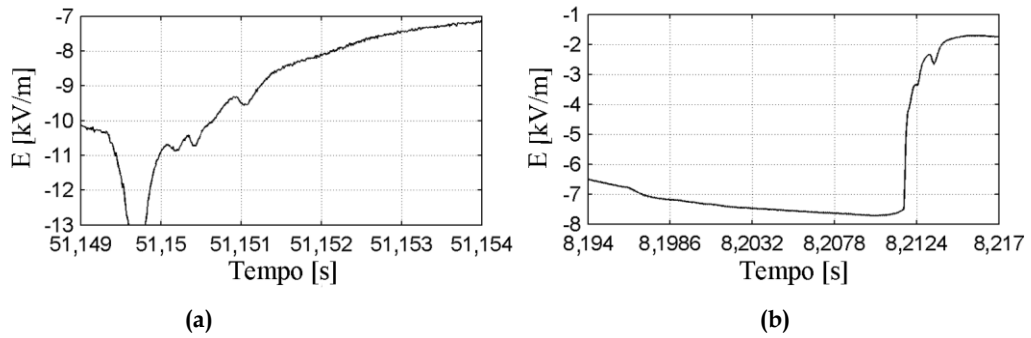


Figura 3. 7 - Registros de campos elétricos medidos próximos à estação Morro do Cachimbo referentes à primeira corrente de retorno. A figura (a) corresponde a um evento do dia 19 de dezembro de 2012 e a figura (b) corresponde a um evento do dia 07 de janeiro de 2013.

Foram determinados os parâmetros estatísticos das correntes das Componentes M das primeiras descargas de retorno medidas em MCS para fins de comparação com os parâmetros correspondentes das Componentes M das descargas induzidas por foguetes, como mostra a tabela 3.2.

3. Contribuições Científicas Recentes sobre Descargas Atmosféricas Baseadas na Medição de Campos e Correntes

Tabela 3. 2 - Comparação dos parâmetros estatísticos das Componentes M das primeiras correntes de retorno medidas em MCS e de Componentes M de descargas induzidas por foguetes [17].

Parâmetro	Componentes M de primeira corrente de retorno medida em MCS	Componentes M de descargas induzidas por foguetes.
	Média Geométrica (Valores mínimos e máximos)	Mediana
Magnitude I_M (kA)	1,65 (0,19 - 4,54)	0,12
Tempo de Crescimento RT (ms)	0,06 (0,019 - 0,22)	0,42
Duração T_M (ms)	0,41 (0,12 - 1,11)	2
Largura de meio pico T_{HW} (ms)	0,16 (0,049-0,38)	0,8
Nível de corrente contínua I_{CC} (A)	2491 (260 - 12704)	183
Carga Q (C)	0,32 (0,09 - 0,79)	0,13
Tempo após o pico ΔT_{MR} (ms) ^a	0,33 (0,09 - 2,00)	7,7

^a O tempo decorrido entre os instantes de ocorrência do pico da corrente de retorno e da Componente M.

Nota-se que a média geométrica dos parâmetros I_M , Q e I_{CC} das Componentes M das primeiras descargas são muito superiores àqueles das descargas induzidas. Por outro lado verifica-se que todos os parâmetros de tempo são menores.

Outro aspecto importante foi revelado na análise das correntes em MCS. As primeiras Componentes M das diferentes descargas surgem após um intervalo de tempo muito reduzido em relação ao instante do pico da corrente, de 0,2 ms a 0,85 ms. Tais valores são menores que a duração típica de uma corrente de retorno, que em todos os casos analisados foi superior a 0,9 ms. Isto indica que as Componentes

3. Contribuições Científicas Recentes sobre Descargas Atmosféricas Baseadas na Medição de Campos e Correntes

M ocorreram durante a corrente de retorno, ainda na fase de descarregamento da carga do canal, e não superpostas a componentes contínuas posteriores à corrente de retorno.

Dos resultados originais desta seção inferem-se algumas conclusões importantes, que são contribuições científicas de relevo sobre o conhecimento das descargas atmosféricas.

Os instantes de fluxo dos surtos de corrente correspondentes à Componente M coincidem com os instantes de aumento da luminosidade do canal de descarga detectado pela câmera de alta velocidade. Os registros de Componente M do sensor óptico e do perfil de campo elétrico estão consistentes com os registros das descargas induzidas por foguetes, incluindo o fato de que o pico da Componente M no perfil de campo elétrico é adiantado em relação ao pico da corrente. Os parâmetros de corrente das duas Componentes M são compatíveis com aqueles de descargas artificiais, como mostrado na tabela 3.1.

Cerca de 50% dos registros de primeiras correntes de retorno medidas em MCS apresentaram Componentes M. Também foi possível identificar tais Componentes em mais de 10% dos registros de campo elétrico de primeira corrente de retorno, medidos em três tempestades recentes, próximas à Estação. Tem-se a expectativa de percentual muito maior pela dificuldade do sistema de medição em identificar as Componentes M, uma vez que este foi dimensionado para perceber picos de campos.

O trabalho também revelou que as Componentes M dos registros de primeira corrente de retorno medidas recentemente em MCS ocorreram de 0,2 ms a 0,85 ms depois do pico da corrente. Tais valores são menores do que o tempo usual da corrente de retorno, que são, em todos os casos, superiores a 0,9 ms. Nenhum dos eventos apresentou componente contínua de corrente. Nos registros de campo elétrico de primeira corrente de retorno estudados por Malan e Schonland [16],

cerca de 60% das primeiras Componentes M ocorreram antes de 1 ms depois do pico da corrente de retorno. Em outras palavras, a Componente M ocorreu durante o processo da corrente de retorno e não sobreposta à componente contínua. Isto explica a discrepância entre as expectativas de Thottappillil et al. [18] e os resultados deste trabalho, onde 50% dos registros de primeiras correntes de retorno apresentaram Componentes M. A análise estatística das correntes de MCS está de acordo com os estudos de Malan e Schonland [16]. Conclui-se que a ocorrência da Componente M na primeira corrente de retorno é bem comum.

Aparentemente, também para correntes subseqüentes, as Componentes M ocorrem durante o processo da corrente de retorno e não somente sobrepostas à componente contínua. Nos estudos de Thottappillil et al. [17], em que a grande maioria de Componentes M em registros de campo elétrico ocorreram em descargas subseqüentes, os autores comentam que a maior parte das Componentes foram observadas entre 0,2 ms e 0,7 ms após o pico de corrente. Uma vez que a duração de correntes subseqüentes é tipicamente maior que 0,7 ms, há a expectativa de que a Componente M, ocorra, também, durante o processo da corrente subseqüente.

Em decorrência dos resultados e conclusões deste trabalho sugere-se uma conceituação mais completa e generalizada para a Componente M.

Esta seria conceituada como o processo de transferência de carga da nuvem para o solo enquanto o canal de descarga está ainda ativo. Ao evento está associado um aumento na luminosidade do canal devido ao surto de corrente que o percorre durante a primeira descarga e as subseqüentes, superposto à componente contínua e durante o estágio inicial em descargas iniciadas de estruturas elevadas ou induzidas por foguetes.

3.4. Descargas negativas ascendentes

3.4.1. Descargas negativas ascendentes em regiões tropicais

Como mencionado no capítulo 2, as descargas negativas ascendentes tem sua origem em canais ascendentes carregados positivamente que evoluem do solo para a nuvem, transferindo carga elétrica negativa da atmosfera para o solo.

As descargas ascendentes negativas são muito comuns em regiões temperadas, mas são eventos raros em regiões tropicais. Não se tem notícias da medição de correntes de descargas ascendentes em regiões tropicais do planeta. Na estação MCS, tais eventos não foram detectados antes de 2010.

Recentemente, foram medidas seis descargas negativas ascendentes em MCS, quatro delas em 2010, quando a temperatura na temporada de chuvas era cerca de 4 graus abaixo da média histórica do local [19]. O valor destes resultados consiste inicialmente no fato de que aparentemente estes são os primeiros registros de corrente de descargas ascendentes obtidos em regiões tropicais.

Em particular, para um único evento, além do registro de corrente foram obtidos registros sincronizados de campo elétrico e de vídeo. Tal registro é analisado inicialmente.

3.4.2. Análise de evento com todos os registros sincronizados

A figura 3.8 ilustra tal registro medido em MCS, em 16 de Novembro de 2012. Em (a) é apresentada uma visão geral do evento, que inclui o estágio inicial, como definido por Diendorfer et al. [20], e a corrente de retorno. Das seis descargas

3. Contribuições Científicas Recentes sobre Descargas Atmosféricas Baseadas na Medição de Campos e Correntes

ascendentes, esta é a única que apresentou uma corrente de retorno. A figura (b) é um detalhe do estágio inicial e a figura (c) é um detalhe da oscilação da corrente no período do estágio inicial. A figura (d) tem o foco nos pulsos de corrente que precedem o início do estágio inicial de corrente (*continuous current*).

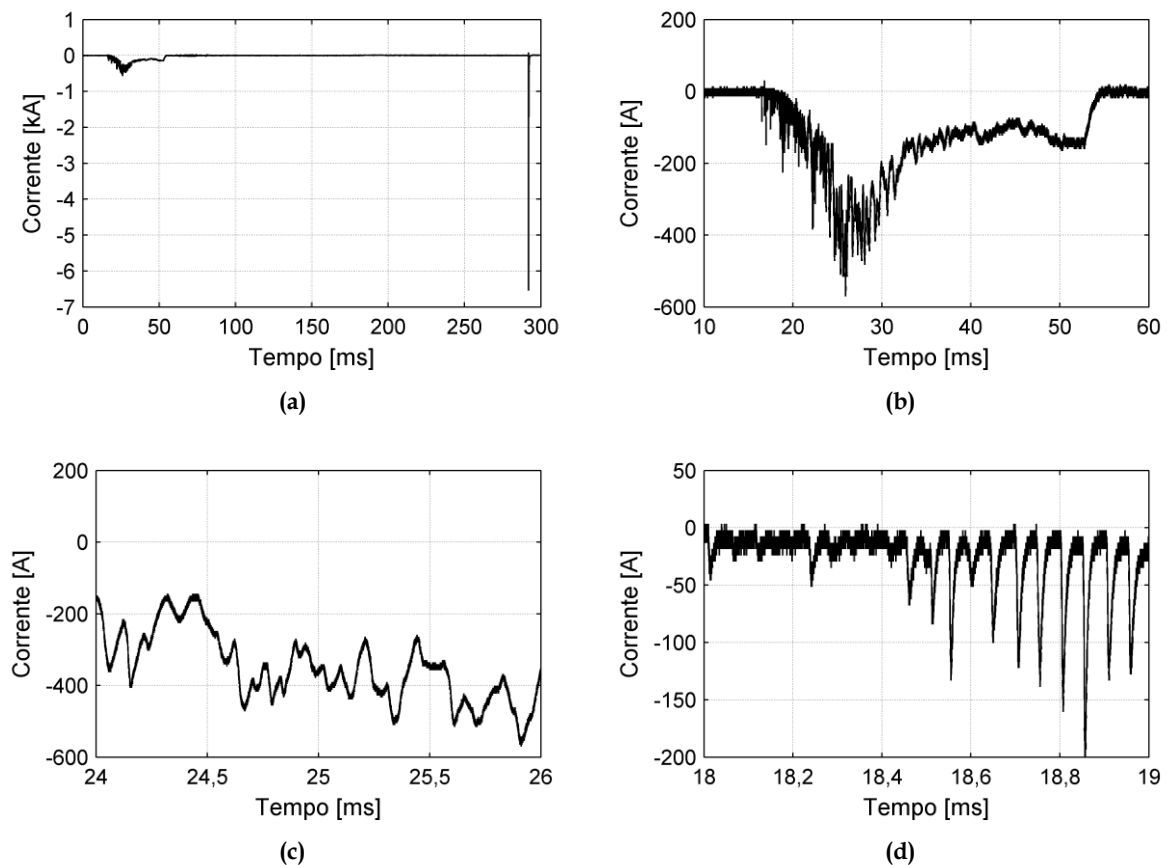
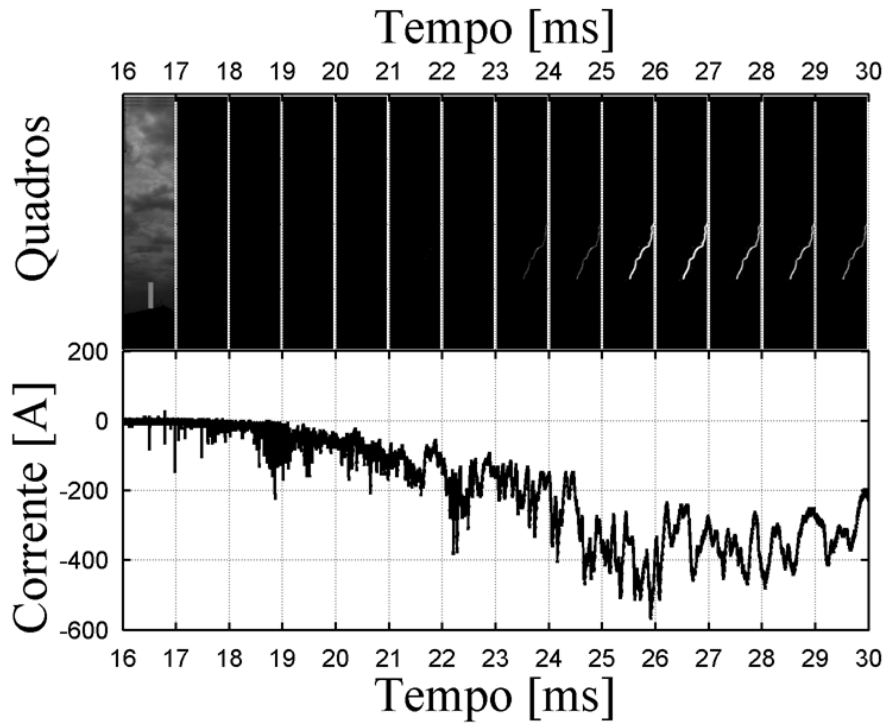


Figura 3. 8 - Registro de corrente de uma descarga ascendente negativa medida em MCS, em 16 de Novembro de 2012. (a) visão geral do evento, que inclui o estágio inicial e a corrente de retorno. (b) detalhe da fase inicial. (c) detalhe da oscilação da corrente. (d) detalhe dos pulsos de corrente que precedem o início da corrente contínua. Adaptado de [19].

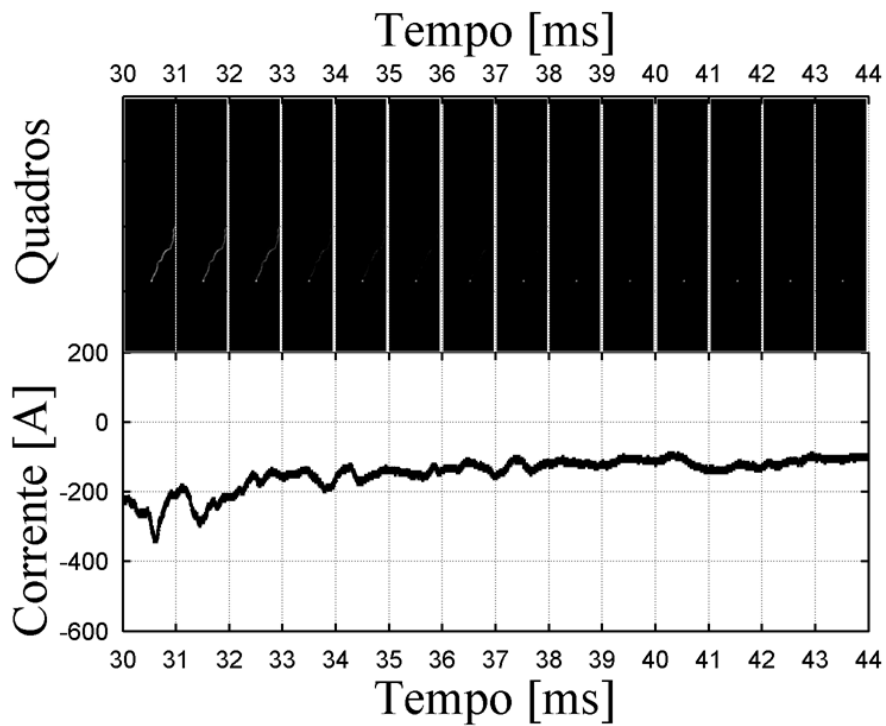
A carga transferida no estágio inicial, de 6 C para o evento em questão, é maior que o valor da mediana de carga transferida em uma descarga descendente negativa típica do Morro do Cachimbo, que é 5,2 C. [1]

A figura 3.9 mostra os registros sincronizados de corrente e vídeo desta descarga ascendente. O vídeo foi obtido com a câmera de alta velocidade, operando com taxa de 4.000 quadros por segundo.

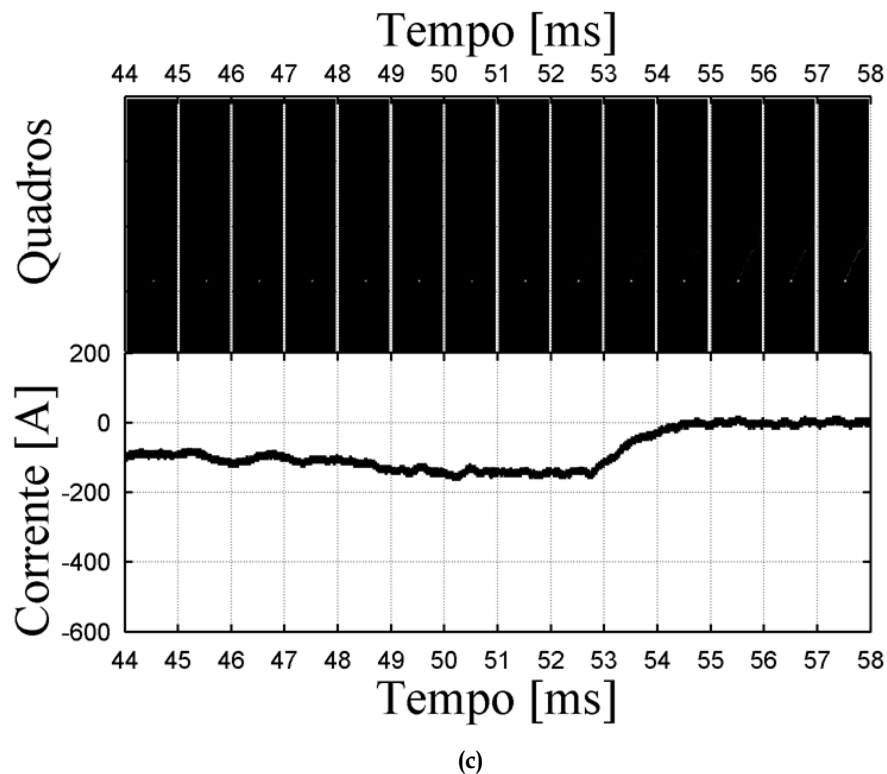
3. Contribuições Científicas Recentes sobre Descargas Atmosféricas Baseadas na Medição de Campos e Correntes



(a)



(b)



(c)
Figura 3. 9 - Sincronização dos quadros do vídeo gravado pela câmera de alta velocidade com o registro de corrente. Adaptado de [19].

O primeiro quadro apresentado em 16 ms não faz parte do evento em questão, o quadro original, que não apresentou efeito luminoso, foi substituído por um quadro que indica a posição da torre instrumentada no campo de visão da câmera em dia de bom tempo. A figura indica que a corrente contínua começa em 17 ms e cresce até o valor máximo de 600 A em 26 ms. Depois a corrente decresce e praticamente cessa, em 55 ms. O efeito luminoso é percebido inicialmente em 23 ms e se torna mais intenso quando a corrente atinge o seu máximo, em 26 ms. À medida que a corrente diminui de intensidade, o efeito luminoso decresce. Em 36 ms não é mais observado o efeito luminoso do canal, sendo percebido apenas um ponto luminoso no topo da torre. Este é atribuído a um intenso efeito corona na extremidade da estrutura. Nos três últimos quadros, o efeito luminoso do canal volta a ser perceptível. A análise do registro revela que o reinício do efeito luminoso coincide com uma intensa oscilação da reduzida corrente que flui pelo

3. Contribuições Científicas Recentes sobre Descargas Atmosféricas Baseadas na Medição de Campos e Correntes

canal. Depois de alguns milissegundos o efeito luminoso desaparece totalmente, logo após a mudança de polaridade da corrente, que indica o deslocamento da carga remanescente na torre e no canal, para o solo.

O registro sincronizado de corrente e campo elétrico para esse evento é mostrado na figura 3.10.

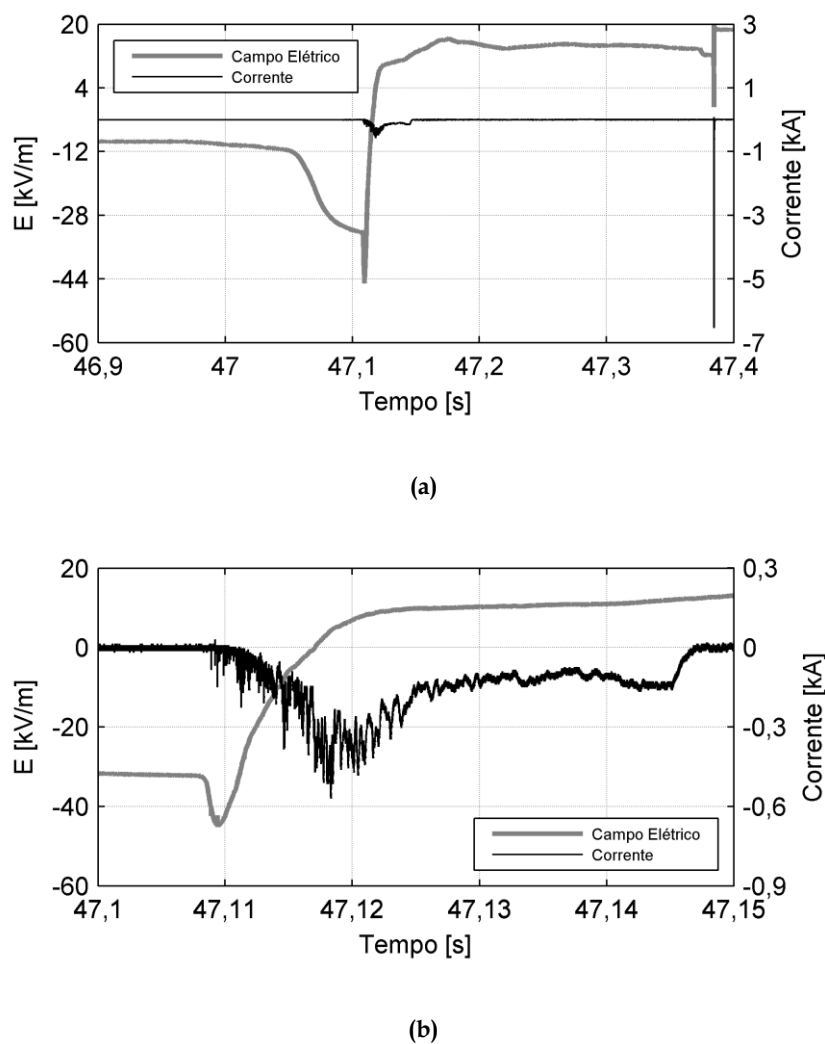


Figura 3. 10 - Registro de campo elétrico simultâneo à medição de corrente de uma descarga ascendente negativa. Evento medido na estação Morro do Cachimbo. (a) registro completo, incluindo a descarga de retorno. (b) detalhamento do início do canal ascendente. Adaptado [19].

Ao observar o perfil do campo elétrico para uma descarga ascendente, nota-se que este se assemelha ao perfil da descarga descendente negativa. Na fase inicial, antes dos pulsos de corrente, há um decaimento do campo, indicando que há um

acúmulo de cargas elétricas positivas no solo, próximo à torre instrumentada. Quando tal campo, induzido pelas nuvens, atinge valores que podem romper a rigidez dielétrica do ar, então é iniciado o canal ascendente transferindo carga elétrica negativa da atmosfera para o solo. O mínimo valor do campo elétrico corresponde ao mesmo instante que surge os primeiros pulsos na corrente. A partir dos primeiros pulsos é possível visualizar uma grande variação de campo elétrico, de -44 kV/m a 10 kV/m. A variação positiva do campo elétrico indica a transferência de cargas elétricas negativas da atmosfera para o solo, fato que é comprovado pela corrente medida.

3.4.3. Estatísticas dos eventos ascendentes medidos

Após considerar em detalhes o evento para o qual foram obtidos registros correlacionados de corrente, campo elétrico e vídeo, foram analisadas as demais correntes ascendentes medidas. Na tabela 3.3 são apresentados parâmetros estatísticos do estágio inicial das correntes destas descargas e, em seguida, processa-se a uma análise destes parâmetros em relação àqueles de descargas ascendentes medidas em regiões temperadas.

Tabela 3.3 - Parâmetros do estágio inicial das correntes medidas das descargas ascendentes em MCS.

Evento	Δ_{TP} (μ s)	Pulso I_{cc} (kA)/ Duração(μ s)	T_d (ms)	I_P (A)	I_{av} (A)	Q (C)	W ($10^3 A^2 s$)
2010-11-01	25 – 30	1,66 / 50	7,3	2500	818	-5,97	6,2
2011-11-13	40 – 45	Sem pulsos	70	160	90	-6,04	5,8
2011-12-16	40	0,73 / 50	13	1500	495	-5,98	4,2
2011-12-26	50 – 62	0,7/400	17	1400	362	-5,92	3,4
2011-12-26	50 – 66	0,5 / 70	6,5	760	198	-0,99	0,21
2012-11-16	50	Sem pulsos	40	570	150	-5,94	1,3
Média Geométrica			18	845	271	-4,43	2,3

Na tabela 3.3, o parâmetro " Δ_{TP} " indica o intervalo entre picos dos pulsos unipolares do estágio inicial na fase compreendida em 1 ms antes do início da corrente contínua (*Continuos Current*); O parâmetro "Pulso Icc" indica o maior valor do pico do pulso de corrente sobreposto a corrente contínua (*Continuos Current*); " t_d " representa a duração do estágio inicial em milissegundos; " I_{av} " corresponde à corrente média obtida pela divisão da carga Q pelo tempo de duração t_d ; " I_p " indica a corrente máxima de pico de cada descarga ascendente; "Q" é a carga transferida pela descarga, o sinal negativo significa a transferência de carga elétrica negativa para o solo e "W" indica energia por unidade de resistência de cada evento.

3.4.4. Análises e conclusões

Embora somente algumas amostras estejam disponíveis para análises, levando-se em conta a falta de dados na literatura de correntes de canais ascendentes em regiões tropicais, é interessante desenvolver algumas avaliações preliminares dos parâmetros de tais eventos, comparando-os com os de eventos medidos em regiões temperadas, em particular, as torres Gaisberg e Peissenberg.

A média geométrica da duração do estágio inicial, carga, energia por unidade de resistência e a média de corrente medida em Gaisberg são 266 ms, 33 C, $7 \cdot 10^3$ A²s e 113 A, respectivamente [21]. Os mesmos parâmetros para Peissenberg são 290 ms, 38,5 C, $3,5 \cdot 10^3$ A²s e 133 A, respectivamente [26].

Neste contexto, o primeiro comentário diz respeito à porcentagem de canais ascendentes que apresentaram corrente de retorno. As medições de MCS apresentaram um valor percentual inferior a 20%, que é menor do que os 30% a 50% indicados em regiões temperadas, mas consistente com a faixa apresentada de 20% a 25% de San Salvatore, como indicado por Rakov e Uman [9].

3. Contribuições Científicas Recentes sobre Descargas Atmosféricas Baseadas na Medição de Campos e Correntes

Com relação ao valor da carga de todas as descargas ascendentes negativas medidas em MCS, dos 6 eventos, 5 apresentaram uma transferência de carga na ordem de 6 C, apesar dos tempos de duração e amplitude da corrente de cada evento serem muito diferente.

Parece que existe uma tendência de balanço entre o tempo de duração do evento com a amplitude da corrente. A média geométrica da carga transferida de -4,43 C é cerca de 7 vezes menor que a média de regiões temperadas. A principal razão para isso se deve ao fato da curta duração dos eventos em MCS, cuja média geométrica (18 ms) é menor que a duração dos eventos reportados em regiões temperadas (266 ms e 290 ms). A curta duração prevalece, apesar da média geométrica das correntes de 271 A, em MCS, ser aproximadamente duas vezes maior que a média de eventos de regiões temperadas (113 A - 133 A).

Finalmente, apesar da carga transferida em MCS ser muito menor, a média geométrica da energia por unidade de resistência de $2,3 \cdot 10^3 \text{ A}^2\text{s}$ dos eventos de MCS é compatível com aqueles eventos medidos em regiões temperadas. [19]

4. Desenvolvimentos Relativos à Medição de Correntes de Descargas

4.1. Introdução

A realização das contribuições apresentadas no capítulo 3 envolveu, no contexto desta dissertação, desenvolvimentos experimentais, notadamente aqueles requeridos para assegurar a implantação e ou operação confiável dos sistemas de medição de campo elétrico, de corrente, de detecção de luminosidade e da câmera rápida. Tais desenvolvimentos envolveram toda a equipe do LRC e, portanto, não são abordados neste texto.

Entretanto, há um desenvolvimento particular realizado no contexto deste trabalho que merece citação. Este corresponde às realizações experimentais e de programação para aprimoramento do funcionamento de um dispositivo de medição e registro de correntes de raios, concebido e desenvolvido no LRC, anteriormente. Houve intensa dedicação a esta atividade nos períodos da dissertação fora das temporadas de tempestades.

4.2. O dispositivo original de medição de corrente

A figura 4.1 ilustra o princípio de operação do dispositivo, instalado a uma distância da ordem de 10 m de altas estruturas isoladas posicionadas em locais elevados.

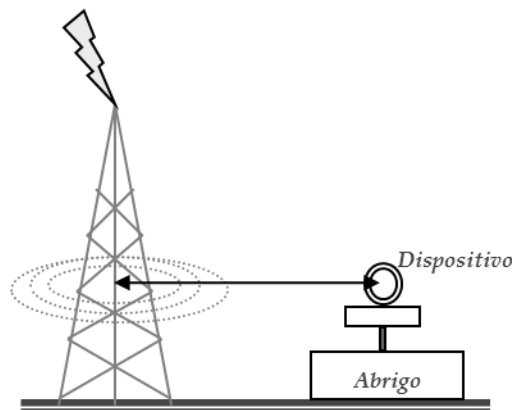


Figura 4. 1 - Ilustração do esquema de funcionamento do dispositivo. [22][23][24][25]

O princípio básico do dispositivo, descrito em detalhes em [22], [23], [24] e [25] consiste na detecção da tensão induzida em uma antena (*loop*) pelo campo magnético gerado pela corrente da descarga atmosférica que flui pela estrutura em direção ao solo, a uma distância conhecida do medidor.

A figura 4.2 mostra um esquema básico do projeto do dispositivo. A alimentação do dispositivo é realizada a partir de bateria. O sinal da antena é continuamente integrado pelo circuito analógico, condicionado e digitalizado pelo conversor analógico-digital do DSP (*Digital Signal Processors*). Naturalmente, o projeto do medidor é muito complexo por envolver a medição de grandeza de variação muito rápida no tempo, capaz de gerar efeitos induzidos extremos nas partes condutoras próximas (incluindo os circuitos de sistemas de medição) e cuja ocorrência não tem instante definido: o dispositivo deve permanecer pronto para registro durante todo o ano.

Após o condicionamento do sinal de tensão induzida, este é integrado para se obter uma onda de corrente fiel a onda de corrente real. Os dados medidos são armazenados em uma memória de um micro-controlador e, posteriormente, são descarregados em um microcomputador. O sinal digitalizado é armazenado ciclicamente na memória RAM (*Random Access Memory*) do DSP e comparado a um limiar pré-definido de tensão (que corresponde a um limiar de corrente). Somente quando ultrapassado o limiar, o circuito é acionado para registro da onda de

corrente e os dados da onda são transferidos da memória RAM do DSP para a memória RAM auxiliar. O dispositivo possui um receptor GPS que disponibiliza dados precisos de instante de tempo. No momento do evento, o instante é extraído e os dados encaminhados à memória RAM do dispositivo. Posteriormente, tal informação juntamente com os dados de onda de corrente são transferidos da memória RAM auxiliar para a memória *flash*. A transferência para o computador dos registros armazenados ocorre através da porta serial RS232.

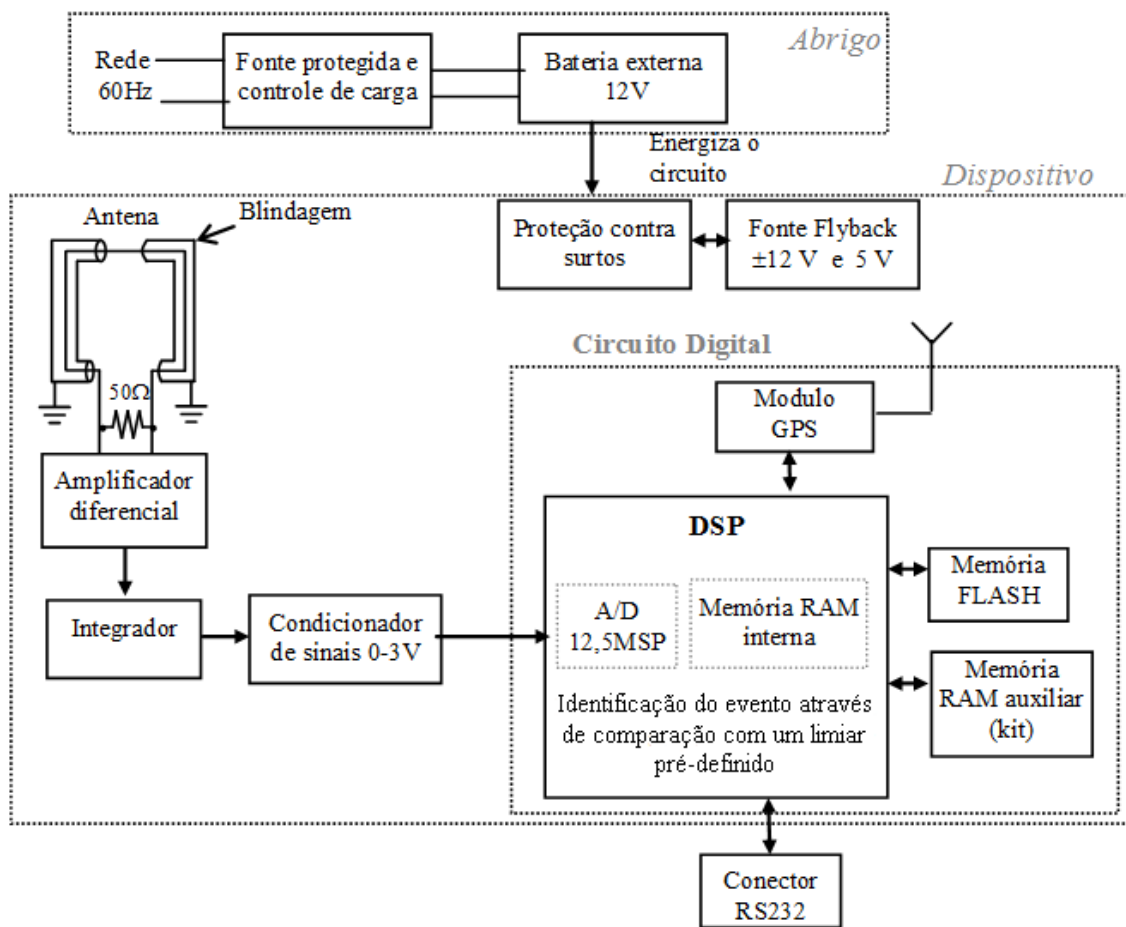


Figura 4. 2 - Diagrama de blocos do dispositivo registrador de corrente.

Vários dispositivos, em seu formato original, desenvolvidos e testados nos laboratórios do LRC, encontram-se, atualmente, em operação. Estão distribuídos em um conjunto de estações de telecomunicação de Furnas instaladas em Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro, além de um exemplar, instalado em MCS.

Após as primeiras medições de corrente de descargas reais efetuadas, constatou-se a necessidade de melhorias para obtenção de resultados de maior qualidade e que apresentassem nível de ruído muito reduzido nos registros.

As figuras 4.3 e 4.4 apresentam resultados de medições de correntes de descargas reais realizadas nos dias 19/10/2012 e 13/04/2013, respectivamente com o dispositivo instalado em MCS e sua comparação com os correspondentes registros obtidos do sistema de medição de alta exatidão instalado na torre, como detalhado no capítulo 3.

As figuras 4.3 (a) e 4.4 (a) mostram o registro completo enquanto que as figuras 4.3 (b) e 4.4 (b) mostram detalhes da onda no intervalo referente à frente de onda. As ondas medidas foram submetidas a um processo de filtragem para redução de ruídos.

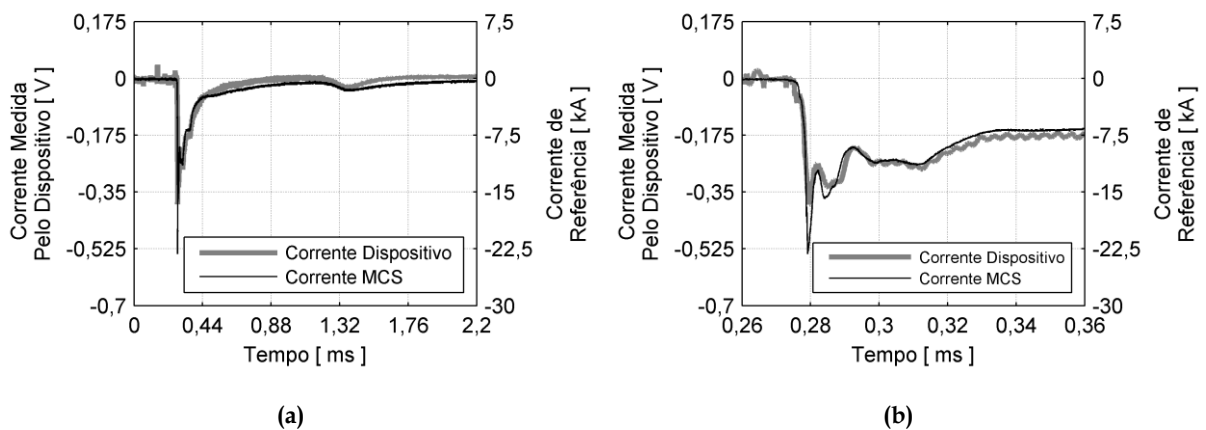


Figura 4. 3 - Comparação entre a medição feita pelo dispositivo e pela corrente de referência registrada pela torre instrumentada. Medição do dia 19/10/2012. Resultados com filtro.

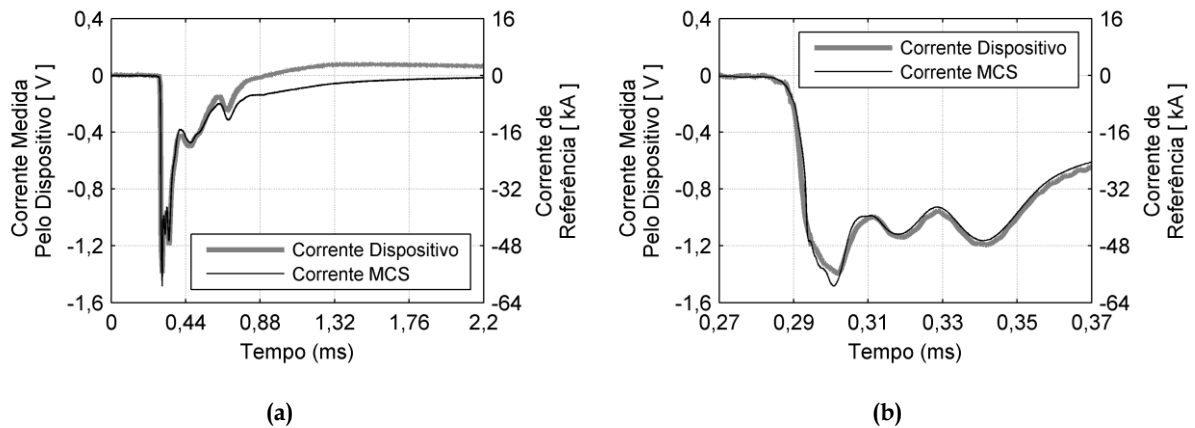


Figura 4. 4 - Comparação entre a medição feita pelo dispositivo e pela corrente de referência registrada pela torre instrumentada. Medição do dia 13/04/2013. Resultados com filtro.

O registro do dispositivo foi apresentado em unidades de tensão para mostrar que a forma de onda medida pelo dispositivo é uma imagem da corrente medida pela torre instrumentada.

Nota-se que, mesmo após a filtragem, no registro apresentado na figura 4.3, foi detectada a presença de um sinal oscilatório no período correspondente à frente da onda. Tal oscilação, que ocorreu de forma pronunciada para correntes com menores tempos de frente de onda, dificulta a inferência dos principais parâmetros da corrente.

A análise de todo o conjunto de correntes medidas revelou que, a despeito da originalidade do dispositivo, sua aplicação contínua para obtenção de resultados de qualidade em condições de campo iria ainda requerer alguns aprimoramentos no seu funcionamento, particularmente:

- Melhoria no código de processamento embarcado, para alcance da máxima frequência de amostragem (12,5 MHz) e redução da perda de pontos amostrados da onda registrada, além de conferir maior confiabilidade na gravação dos dados referentes à data e ao instante de medição obtidos do GPS e a minimização da perda de eventos de correntes subsequentes.
- Modificações no circuito e na estrutura física de instalação e proteção para redução do nível de ruído e minimização de interferências nos circuitos

internos devido ao intenso campo eletromagnético variável no tempo associado à corrente de descarga em medição;

- Atuação no projeto da antena e na blindagem de cabos externos e outros componentes para eliminar as oscilações presentes na frente de onda.

Nas próximas seções, são consideradas as contribuições desenvolvidas no contexto desta dissertação para os aprimoramentos do dispositivo, citados acima.

4.3. O desenvolvimento de um novo *software*

Para atuar na melhoria do código embarcado foi realizado um estudo específico sobre a plataforma DSP, pois a concepção e desenvolvimento da versão original do dispositivo fora feita anteriormente a este trabalho por outra equipe do LRC.

Após este estágio verificou-se que seria mais eficiente reescrever todo o código em lugar da modificação da versão anterior. O DSP foi programado na linguagem C e alguns problemas foram detectados na programação já desenvolvida.

Foi desenvolvida uma nova estrutura para o código do DSP, que permitiu resolver integralmente as questões do alcance da máxima frequência de amostragem, da redução da perda de pontos da onda registrada e de eventos subseqüentes, além do registro seguro dos dados do GPS.

Foi também desenvolvida uma interface mais amigável para interação do usuário com o DSP e deste com computador, utilizando-se o *Matlab*. A nova tela de comunicação é mostrada na figura 4.5.



Figura 4. 5 - Interface do programa de controle.

4.4. Modificações no circuito e na estrutura física de instalação e proteção

Após testes sistemáticos, verificou-se a necessidade de alterar a estrutura do circuito. A primeira alteração foi a substituição do amplificador de diferenças na entrada de medição do dispositivo por um amplificador de instrumentação, com a finalidade de diminuir o efeito de carga.

Também foi verificado que a proteção do dispositivo, na versão antiga, provocava alteração na forma de onda dos sinais medidos. Tal proteção foi modificada a fim de evitar tais alterações. A partir das modificações no circuito uma nova estrutura física do bloco de condicionamento de sinais foi desenvolvida em uma placa de circuito impresso, incluindo a separação física do terra de referência do sinal digital com a referência do sinal analógico.

Após as realizações das modificações o bloco de condicionamento do sinal passou a funcionar da seguinte forma: inicialmente o sinal captado pela antena

passa por um filtro para retirar as componentes de alta frequência que tornam o sinal ruidoso. Em seguida há um amplificador de instrumentação para captar a tensão nos terminais da antena, sem introduzir ao sistema efeito de carga. Em seguida o sinal é integrado por um integrador ativo para que se consiga retornar a forma de onda original de corrente. Por último, há uma proteção para impedir que o sinal de saída não ultrapasse os limites de tensão impostos pelo fabricante, na entrada do DSP.

4.5. Atuação na antena e na blindagem

Testes laboratoriais mostraram que as oscilações verificadas na frente de onda dos sinais de correntes mais rápidos eram devidas a duas fontes: (i) interferência eletromagnética (indução) nos cabos de alimentação de energia a partir da bateria e do GPS e (ii) de surtos induzidos na antena. Tais identificações indicaram onde atuar para mitigar os respectivos efeitos, como considerado a seguir.

4.5.1. Atuação na blindagem

As interferências nos cabos conectados ao dispositivo eram transmitidas ao circuito de condicionamento de sinal em sua entrada e causavam oscilações nas medições e instabilidade na operação do DSP. Em situações críticas, a intensa interferência fazia com que o dispositivo deixasse de operar, impedindo o registro de eventos.

Constatou-se que a primeira fonte de interferência no dispositivo seriam os cabos de alimentação ou de comunicação que interligam o meio externo ao meio interno da caixa de metal, onde o circuito de condicionamento foi instalado. A

solução encontrada para evitar tais oscilações foi a utilização de cabos blindados com uma malha externa metálica em todos os circuitos externos.

4.5.2. Atuação na antena

Verificou-se que a configuração da antena era também fonte de oscilações na frente de onda dos sinais registrados. A atuação na antena não é simples, pois a modificação da sua constituição e geometria pode alterar de forma significativa o sinal de tensão induzida. As tentativas de minimizar as oscilações baseadas na introdução de filtros passa-baixa ativos e passivos não lograram melhorias significativas. A minimização das oscilações na frente de onda dos registros gravados foi obtida através da alteração da geometria da antena bem como a substituição da configuração de cabos utilizados para constituir a espira (*loop*) do dispositivo.

4.6. Testes realizados em laboratório

Durante os desenvolvimentos das melhorias no dispositivo ou após a sua realização foram desenvolvidos testes experimentais sistemáticos em laboratório para verificar a consistência das soluções adotadas, tanto ao nível de *software* quanto de *hardware*. Devido à importância destas realizações experimentais, estas são consideradas a seguir.

O dispositivo de medição foi estruturado fisicamente em dois blocos para a implementação dos testes: circuito completo e somente o DSP.

A fase de testes foi dividida em três etapas, devido à complexidade do dispositivo. A primeira etapa consistia em avaliar o desempenho do dispositivo quanto à gravação correta dos dados, sem distorção do sinal. Para isso, foi utilizado como fonte de sinal um gerador de funções e o descarregamento de capacitores.

A segunda etapa teve como foco aplicar ondas impulsivas de diferentes formas a partir de um gerador portátil de ondas impulsivas. Esta etapa foi muito importante para o ajuste fino do sistema de condicionamento de sinal.

A terceira etapa teve o objetivo de se conseguir uma situação mais próxima da realidade. Para isso foi utilizado nos testes, como fonte de corrente, um gerador de impulso (HAEFELY) que pode atingir até 600 kV.

4.6.1. Primeira etapa

a) Teste do DSP

Um gerador de funções foi programado para gerar ondas senoidais aplicadas à entrada do conversor analógico digital do DSP, tendo em conta os limites de tensão de 0 a 3 V admissíveis para o DSP.

Um osciloscópio, conectado em paralelo com a entrada do conversor analógico/digital, efetuava a mesma medição do DSP, para comparação de resultados. Ambos dispositivos foram configurados para que se um determinado sinal ultrapasse um limiar pré-definido, a forma de onda fosse registrada.

O gerador foi ajustado para fornecer em sua saída, uma onda, senoidal com frequência de 1 MHz com uma componente contínua constante de 1 V, de forma a evitar que o valor mínimo do sinal senoidal fosse negativo, respeitando o limite de tensão do DSP.

A figura 4.6 apresenta os dados medidos simultaneamente pelo DSP e osciloscópio. Nota-se que, logo após o disparo do gerador, o sinal gerado apresenta, por alguns ciclos, deformidades na onda senoidal, como mostra a figura 4.6 (b), que cessam após alguns ciclos.

A janela de medição total do evento corresponde a 1,2 ms e 1 ms, no DSP e no osciloscópio, respectivamente. As figuras 4.6 (a) e (b) mostram a medição completa e o detalhamento do evento, respectivamente.

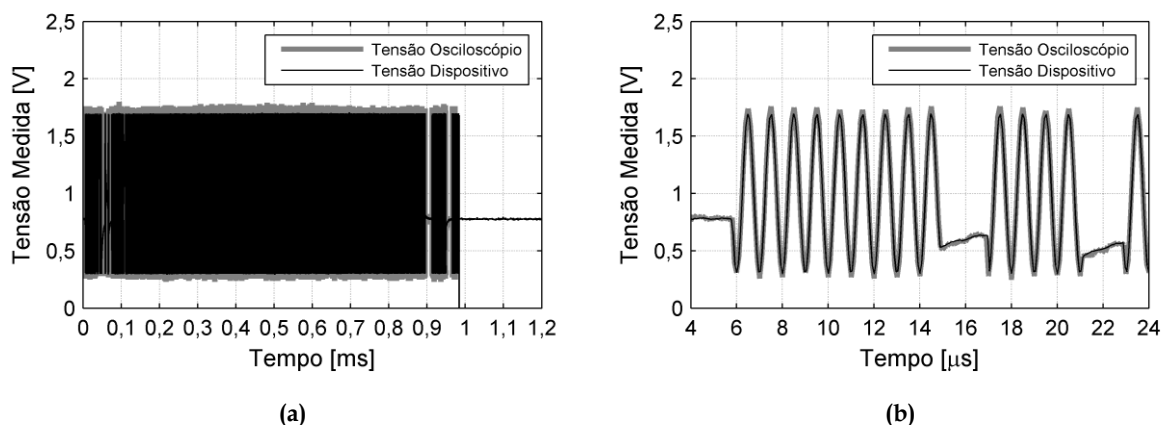


Figura 4. 6 - Comparação entre os resultados medidos pelo DSP e osciloscópio. Foi aplicado um sinal senoidal de 1,8 V pico a pico, com uma frequência de 1 MHz. (a) corresponde à medição completa do evento e (b) corresponde ao detalhamento do evento apresentado em (a).

Analisando o gráfico da figura 4.6 (b) é observado que o disparo para a gravação se iniciou aproximadamente no instante 6,3 μ s, pois o limiar definido para esta situação foi de 1 V. A deformação na onda gerada possibilitou uma verificação mais apurada do funcionamento do DSP. As variações no sinal associadas às deformações do sinal foram detectadas perfeitamente pelo dispositivo, como pode ser visualizado no período compreendido entre 14 μ s e 18 μ s, e entre 20 μ s e 24 μ s. Nota-se que o ruído medido pelo DSP é menor que o registrado pelo osciloscópio. O intervalo de tempo anterior a 6 μ s corresponde à fase anterior ao disparo, nesta medição. Tal período é importante para recuperar as informações anteriores ao sinal de disparo.

A frequência de 1 MHz é uma das componentes mais altas do espectro de frequências existente nas primeiras correntes de descargas atmosféricas. O teste com um sinal de 1 MHz permitiu visualizar a capacidade do equipamento em realizar medições sem provocar distorções no sinal.

A figura 4.7 apresenta os dados medidos simultaneamente pelo DSP e pelo osciloscópio, quando ocorre o acionamento do sinal no gerador de ondas. As figuras 4.7 (a) e (b) mostram a medição completa e o detalhamento do evento, respectivamente. O gerador foi ajustado para fornecer em sua saída uma onda senoidal com frequência de 250 kHz com uma componente contínua constante de 1 V.

A figura 4.7 (b) apresenta deformações no sinal senoidal produzido pelo gerador, assim como apresentado na figura 4.6 (b). Também foi verificado que o DSP registrou corretamente todo o sinal, com um ruído menor do que o medido pelo osciloscópio.

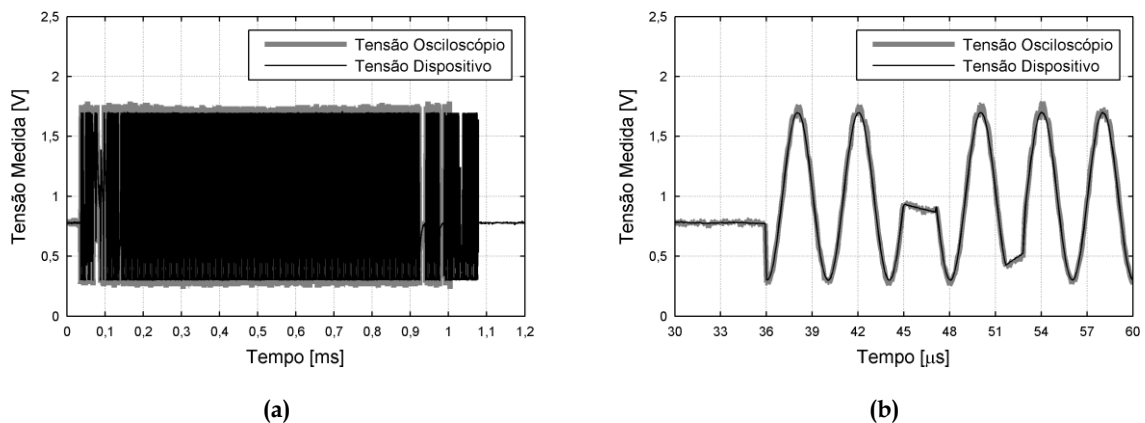


Figura 4. 7 - Comparação entre os resultados medidos pelo DSP e osciloscópio. Foi aplicado um sinal senoidal de 1,8 V pico a pico, com uma frequência de 250 kHz. (a) corresponde à medição completa do evento e (b) corresponde ao detalhamento do evento apresentado em (a).

b) Circuito Completo

Após a verificação do correto funcionamento da programação do DSP, foram feitos testes com o circuito completo. Para se ter um resultado mais representativo de uma situação real, em vez de se usar o gerador de sinais como fonte, foi gerado um sinal a partir do descarregamento de um capacitor em uma bobina de fio, com 10 espiras.

O capacitor foi carregado com uma tensão de 30 V e descarregado na bobina, posicionada muito próximo à antena de medição do dispositivo. A corrente de

descarregamento do capacitor, que flui pela bobina, produz um campo magnético que gera uma tensão induzida na antena do dispositivo. A força eletromotriz gerada pela antena foi integrada e assim obtida a forma de onda da corrente de descarregamento do capacitor. Novamente, o osciloscópio foi conectado em paralelo à entrada do conversor analógico/digital, para que a medição feita pelo DSP fosse comparada ao resultado fornecido pelo osciloscópio. Ambos dispositivos foram programados para que se um determinado sinal ultrapasse um limiar pré-definido, fosse registrado a forma de onda.

A figura 4.8 apresenta a medição da corrente de descarregamento do capacitor, realizada pelo osciloscópio e pelo DSP, quando os terminais da bobina foram conectados aos terminais do capacitor. A figura 4.8 (a) mostra a medição completa e as figuras 4.8 (b) e (c) mostram o detalhamento do evento.

A forma de onda vista não se assemelha a um descarregamento puro de um circuito RC, RLC, RL ou LC. As diferenças vistas podem ser atribuídas à má conexão do cabo da bobina no terminal do capacitor. Outro fator que altera a forma de onda é o fato da bobina apresentar uma resistência muito baixa, menor que 1Ω . Com isso há um fluxo intenso de corrente fluindo pelo capacitor. O próprio capacitor altera a forma de onda de corrente, em condições de corrente de curto circuito, como é o caso em questão.

Estas características do circuito apresentadas também podem explicar o fato da corrente registrada pelo osciloscópio ter uma componente negativa. Tal componente não é vista na medição do DSP porque a proteção atuou para que não houvesse prejuízo ao funcionamento do dispositivo, mantendo o nível de sinal na faixa de 0 a 3 V.

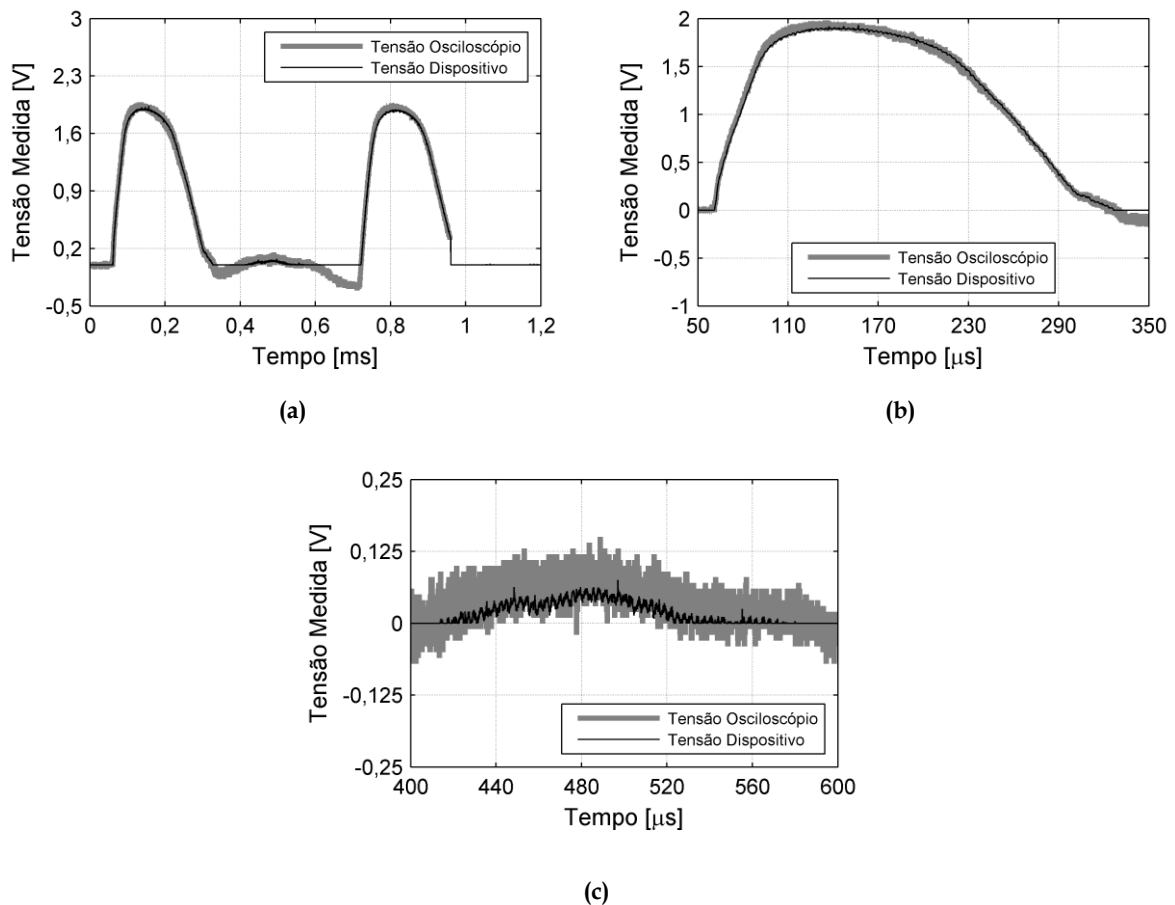


Figura 4. 8 - Comparação entre os resultados medidos pelo DSP e osciloscópio. (a) corresponde à medição completa do evento, (b) e (c) corresponde ao detalhamento do evento apresentado em (a).

A figura 4.8 (b) mostra uma forma de onda muito lenta quando comparada as ondas de correntes de descargas atmosféricas, mas comprova que o equipamento é funcional para ondas de correntes mais lentas.

Além de registrar ondas rápidas, o dispositivo será capaz de registrar a componente contínua da descarga atmosférica, que contém componente de frequências mais baixas.

O ruído observado no registro de corrente pelo DSP é baixo e é menor que o registrado no osciloscópio, como mostra a figura 4.8 (c).

4.6.2. Segunda Etapa

Verificado que o DSP estava registrando com precisão os sinais colocados em sua entrada, a segunda etapa foi dedicada à avaliação da qualidade do registro da onda de corrente (em intensidade e forma) no conjunto que constitui o dispositivo.

Um gerador portátil forneceu ondas de tensão impulsiva de corrente. Este gerador, desenvolvido no LRC, tem capacidade de atingir, em sua saída, tensões de até 1500 V, com correntes impulsivas de até 12 A, e diversos tempos de frente de onda, obtidos a partir da atuação em alguns de seus componentes. Usando este tipo de fonte, foi possível medir a corrente que o gerador faz circular pelo circuito, por meio de um resistor de carbono, colocado em série, no circuito. Nos testes, o circuito foi ajustado para operar com uma tensão de 600 V, com uma corrente impulsiva de 9,75 A de pico.

a) Medições de corrente impulsiva com tempo de frente de 1 μ s

O gerador portátil foi configurado para fornecer ondas impulsivas de correntes com tempo de frente de aproximadamente 1 μ s. Tal tempo de frente representa uma descarga subsequente.

A figura 4.9 apresenta a comparação entre o registro de corrente medido pelo DSP e a corrente do gerador portátil. A figura 4.9 (a) mostra a medição completa do evento e as figuras 4.9 (b) e (c) mostram o detalhamento de (a).

As formas das ondas apresentadas seguiram a mesma tendência. Em alguns intervalos, é difícil distinguir uma curva da outra. Há apenas uma pequena diferença entre as curvas no período lento, que corresponde ao intervalo 0.14 ms a 0.26 ms, como pode ser visto na figura 4.9 (b).

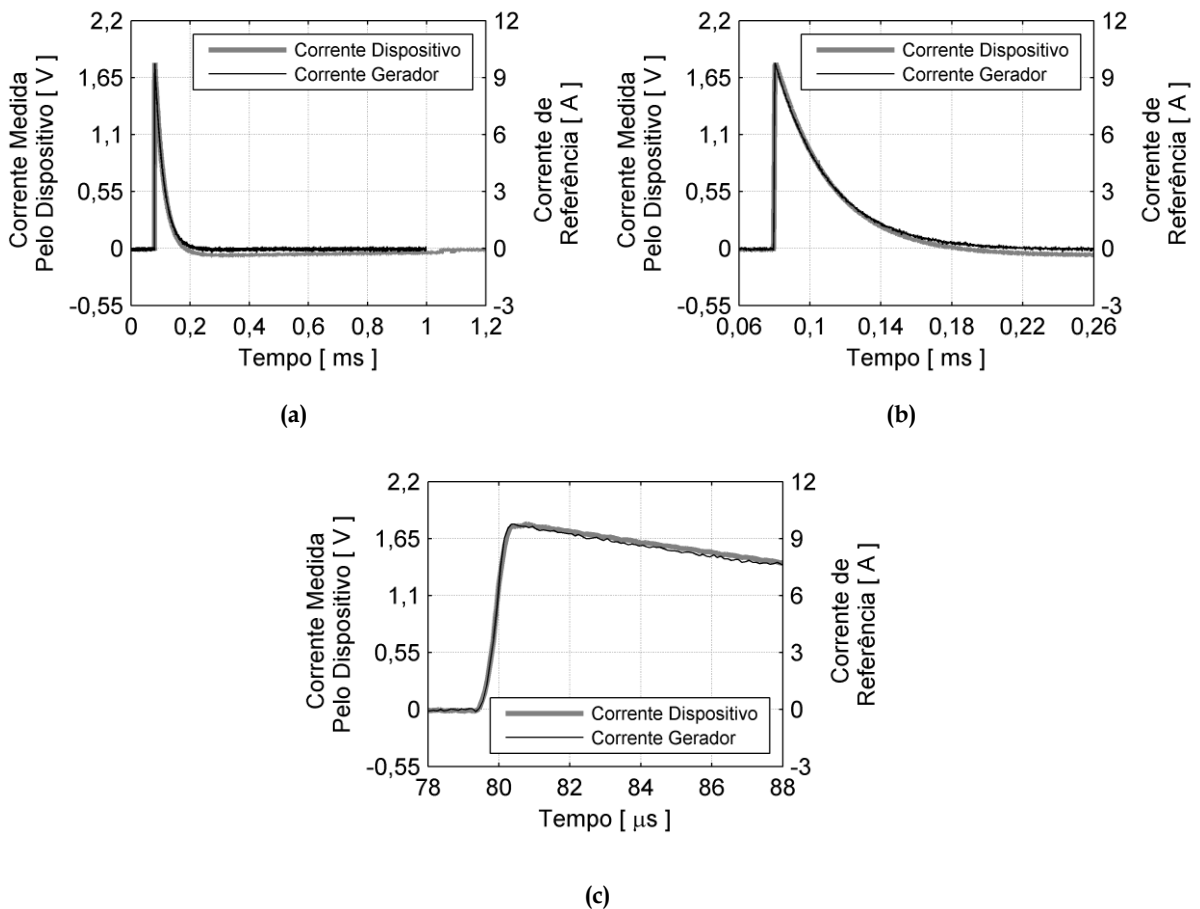


Figura 4.9 - Comparação entre os resultados medidos pelo DSP e osciloscópio. (a) corresponde à medição completa do evento, (b) e (c) correspondem ao detalhamento do evento apresentado em (a).

A figura 4.9 (c) apresenta a medição da frente da onda de corrente, realizada pelo dispositivo. A forma de onda e o tempo relacionado à frente da onda são os parâmetros mais importantes e difíceis de serem obtidos, pois, na frente de onda, há componentes de alta frequência que normalmente provocam distúrbios ao sistema de medição.

Na figura é possível detectar, com clareza, o tempo de frente e o valor de pico da onda. Para que se conseguisse alcançar os resultados aqui apresentados, vários ajustes foram feitos no circuito de condicionamento de sinal, até que o circuito operasse de forma correta. Uma seqüência de testes foi realizada e, em nenhum dos casos, foi detectada qualquer distorção do sinal.

b) Medições de corrente impulsiva com tempo de frente de 4 μ s

O gerador portátil foi ajustado para fornecer uma onda de corrente impulsiva com tempo de frente de aproximadamente 4 μ s. Tal tempo de frente foi escolhido para avaliar o desempenho do dispositivo para ondas impulsivas mais lentas, em relação aos testes anteriores, pois estas ondas simulam uma primeira corrente de retorno.

A figura 4.10 apresenta a comparação entre o registro de corrente medido pelo DSP e a corrente do gerador portátil. A figura 4.10 (a) mostra a medição completa do evento e as figuras 4.10 (b) e (c) mostram o detalhamento de (a). A qualidade dos resultados alcançados é atestada pela coincidência (em termos práticos) entre as curvas. Na figura 4.10 (c) é possível visualizar com clareza o tempo de frente da onda, bem como o valor de pico. Nenhuma distorção do sinal foi provocada pelo condicionamento do sinal.

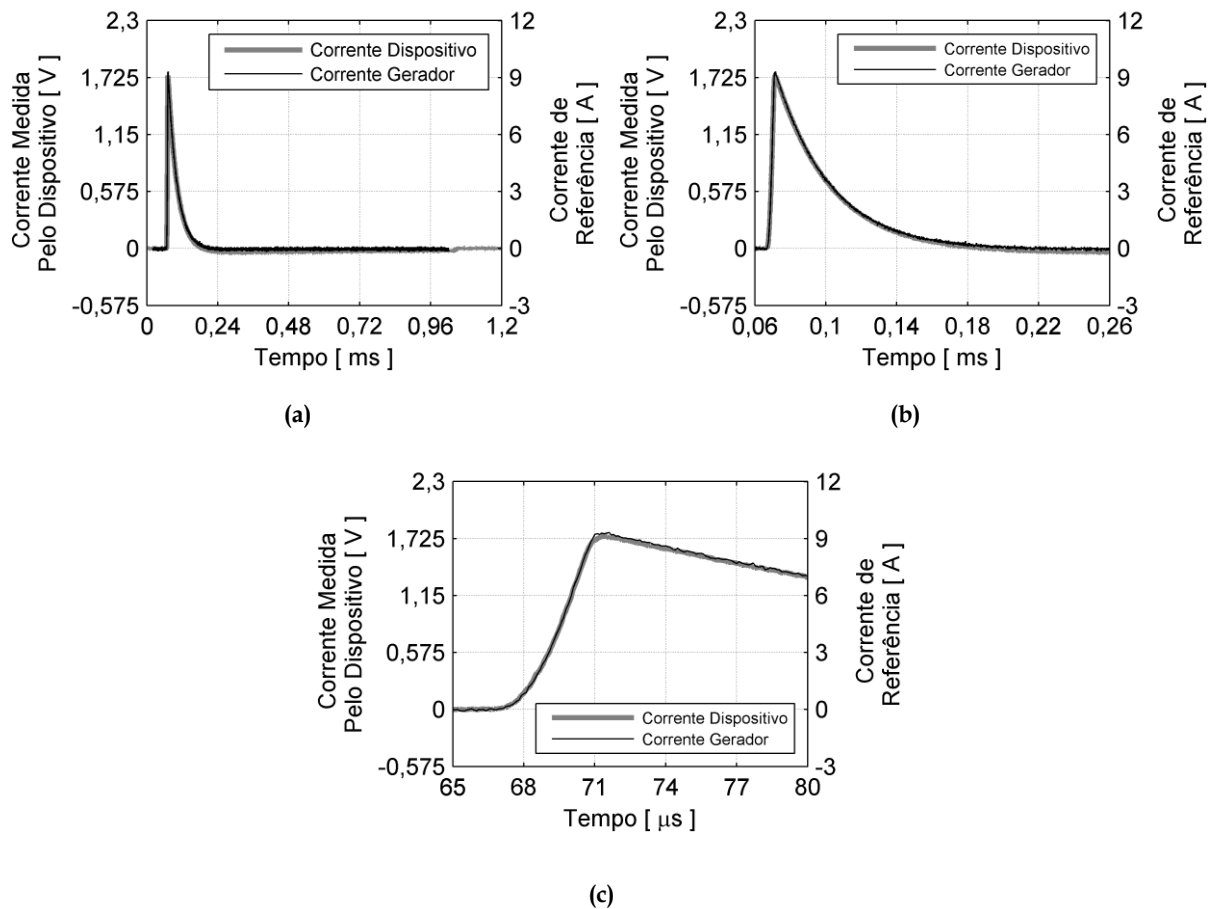


Figura 4. 10 - Comparação entre os resultados medidos pelo DSP e osciloscópio. (a) corresponde à medição completa do evento, (b) e (c) correspondem ao detalhamento do evento apresentado em (a).

As formas de ondas apresentadas nas figuras 4.9 e 4.10 são resultados obtidos diretamente do dispositivo. Não foram aplicados filtros ou técnicas de processamento de sinal para gerar os resultados apresentados nestas figuras.

Além do condicionamento do sinal ter funcionado corretamente, o código, em operação no DSP, não apresentou falhas. Não foi constatado nenhum problema de perda de dados por erros na programação. Em todos os testes houve a gravação correta do evento.

4.6.3. Terceira Etapa

A terceira etapa de testes consistiu em avaliar o desempenho do equipamento sobre condições mais próximas da realidade de operação. Para atender tal objetivo, foi utilizado um gerador de tensões de impulso de 600 kV de pico.

Nos testes, o gerador foi configurado para fornecer ondas impulsivas com o tempo de frente e de meia onda de aproximadamente $2,5 \mu\text{s}$ e $45 \mu\text{s}$, respectivamente. A figura 4.11 mostra o perfil da corrente fornecida pelo gerador. Um sistema em escala reduzida foi montado no laboratório do LRC, representado pela figura 4.12.

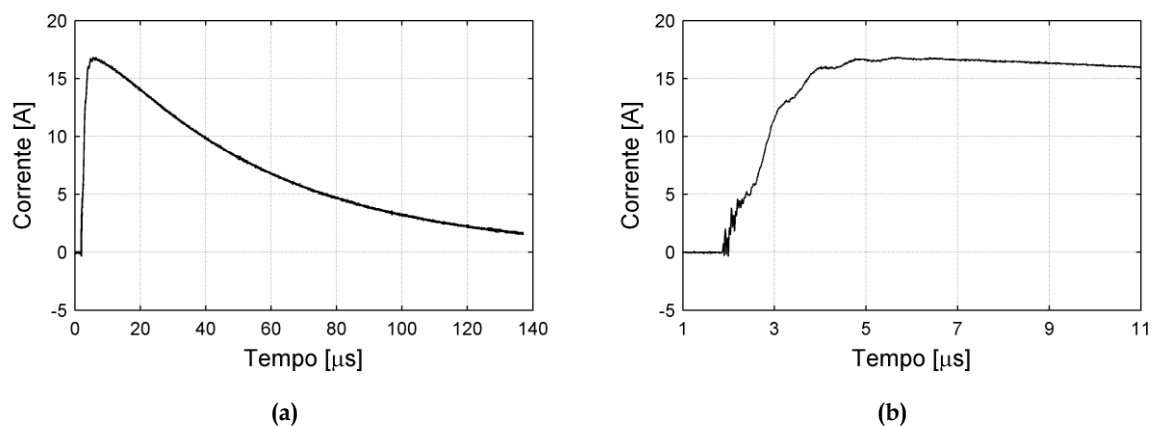


Figura 4. 11 - Forma de onda de corrente fornecida pelo gerador de impulso de 600 kV. (a) registro completo de corrente e (b) detalhe da frente da onda de corrente mostrado em (a).

A partir do condutor de corrente do gerador, foi construída uma bobina com 10 espiras, denominada, na figura, como *bobina de corrente*. Tal bobina tem a finalidade de aumentar a intensidade do campo magnético próximo ao dispositivo de medição de corrente. Este dispositivo foi posicionado a 20 cm da bobina. Então, o campo magnético que é gerado pelo fluxo de corrente impulsiva do gerador, faz produzir uma tensão induzida na antena do dispositivo.

Os primeiros testes desta etapa mostraram que a operação do dispositivo era instável, quando submetido a altas intensidades de campo eletromagnético. Os

testes realizados foram divididos em blocos para facilitar a identificação dos problemas. Primeiramente, foram feitos testes somente com o DSP, sem o circuito de condicionamento de sinal. Posteriormente, os testes foram feitos apenas no circuito de condicionamento de sinal.

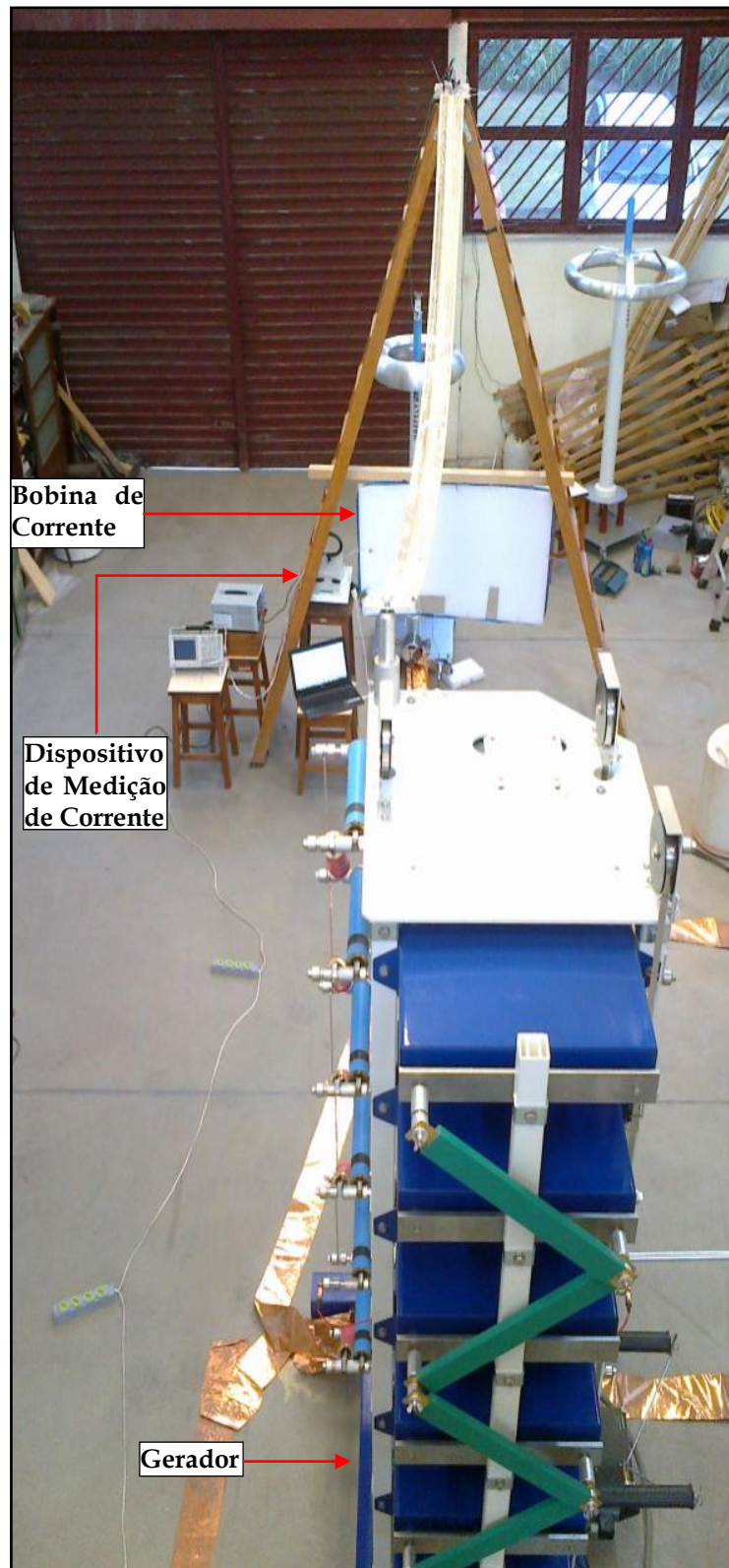


Figura 4. 12 - Estrutura de testes em escala reduzidas realizadas em laboratório.

a) Teste com o DSP

A bobina de Pearson tem sido utilizada há muito tempo na estação MCS como o principal transdutor na medição de correntes de descargas [14]. Devido ao bom comportamento em medições reais, uma bobina foi instalada no circuito do gerador. A bobina fornece, com alta qualidade, a forma de onda da corrente que flui por seu núcleo. Os terminais da bobina foram conectados a atenuadores e a uma proteção, tomando cuidado para se evitar altas tensões e tensões negativas no DSP.

A partir do teste constatou-se que as interferências eletromagnéticas eram intensas e não permitiam que o DSP operasse corretamente. Após testes sistemáticos, verificou-se que a blindagem dos cabos de alimentação do circuito e a separação dos terras, analógico e digital, permitiram obter um grande avanço na redução dos efeitos da interferência eletromagnética no aparelho.

b) Teste com o circuito de condicionamento de sinal

O teste com o circuito de condicionamento de sinal teve que ser subdividido, devido a fortes interferências eletromagnéticas no circuito. O primeiro bloco testado foi a antena posicionada próxima à bobina de corrente, e então os terminais da mesma foram conectados ao osciloscópio.

Os primeiros testes indicaram que havia problema com a antena do dispositivo (*loop*). O sinal medido pela antena era completamente ruidoso, impossibilitando a recuperação do sinal da corrente. Diversas variações de filtros passivos e ativos foram testadas sem sucesso, indicando que o problema da antena poderia ser ressonância.

A ressonância não foi identificada nos testes com o gerador portátil porque o sinal gerado por este não continha componentes de frequência na faixa de ocorrência de ressonância e, tampouco, apresentava ruídos com componentes nesta faixa. Já no caso do gerador de 600 kV, além do campo magnético gerado pela

corrente que fluía pela espira de corrente, há também um intenso campo eletromagnético irradiado pela descarga nos *gaps* do gerador. O arco elétrico formado no *gap* é uma fonte de ruídos de alta frequência, sendo esses identificados como os responsáveis pela ressonância na antena.

Várias configurações de antena foram testadas com o intuito de alterar os seus parâmetros, tais como indutância e capacitância, e, a cada teste, a frequência de ressonância da antena foi alterada. A configuração responsável pelas melhores medições está ilustrada na figura 4.13. Os terminais 1 e 2, indicados na figura, foram conectados aos terminais da antena. Os gráficos apresentados nas figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17 são medições da força eletromotriz (FEM) nos terminais do capacitor e da integração no tempo da força eletromotriz medida.

As ondas de correntes que fluíram pela espira de corrente conectada ao gerador, em todos os testes, foram exatamente iguais, pois os parâmetros do gerador continuaram os mesmos. O tempo de frente da corrente foi de aproximadamente 2,5 μs , enquanto que o tempo de meia onda foi de aproximadamente 45 μs , como mostra a figura 4.11.

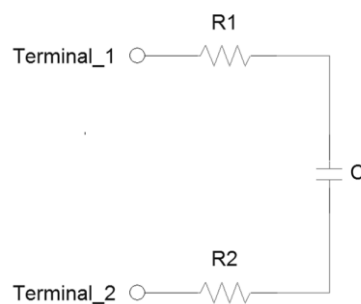


Figura 4. 13 - Circuito conectado aos terminais da antena. Os resistores R1 e R2 são iguais de 22 k Ω .

Inicialmente o valor do capacitor C da figura 4.13 era 100 pF. A figura 4.14 apresenta a medição da tensão sobre esse capacitor. O valor da tensão induzida atingiu aproximadamente 90 V, com um ruído não perceptível na frente de onda, como apresentado em 4.14 (b). A curva cinza representa a integração no tempo da

tensão induzida na antena. A integração, realizada com uso do *Matlab*, resulta na forma de onda de corrente que gerou a tensão induzida na antena. Também é possível observar, na figura 4.14 (b), que o tempo de frente da onda integrada ($2 \mu\text{s}$) se aproxima ao valor do tempo de frente da corrente do gerador, que é de $2,5 \mu\text{s}$. A integral da força eletromotriz apresentou um tempo de meia onda de $5,3 \mu\text{s}$ contra os $45 \mu\text{s}$ da onda de corrente original, este fato indica que houve um ganho no sinal nas componentes de frequências mais altas do espectro das descargas atmosféricas.

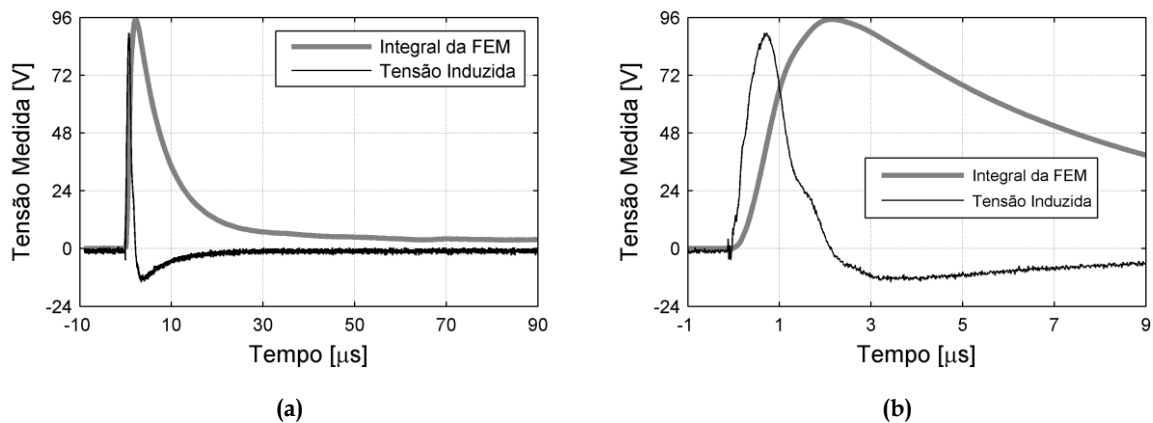


Figura 4. 14 - Medições utilizando capacitor de 100 pF. (b) é um detalhamento de (a).

A figura 4.15 apresenta a medição da tensão induzida, quando é substituído o capacitor de 100 pF por outro de 200 pF. No registro, não houve ruído perceptível que alterasse a forma de onda medida, como na situação anterior. Também foi visto que a substituição do capacitor não alterou o tempo de frente da onda integrada. Ela continua com o tempo de frente de aproximadamente $2 \mu\text{s}$, como mostra a figura 4.15 (b). A principal diferença observada foi em relação ao tempo de meia onda, onde houve um aumento do tempo de $5,3 \mu\text{s}$ para $9,7 \mu\text{s}$, quando comparado ao teste apresentado na figura 4.14, mas ainda é muito diferente do tempo de meia onda da corrente real, que gerou a tensão induzida na antena.

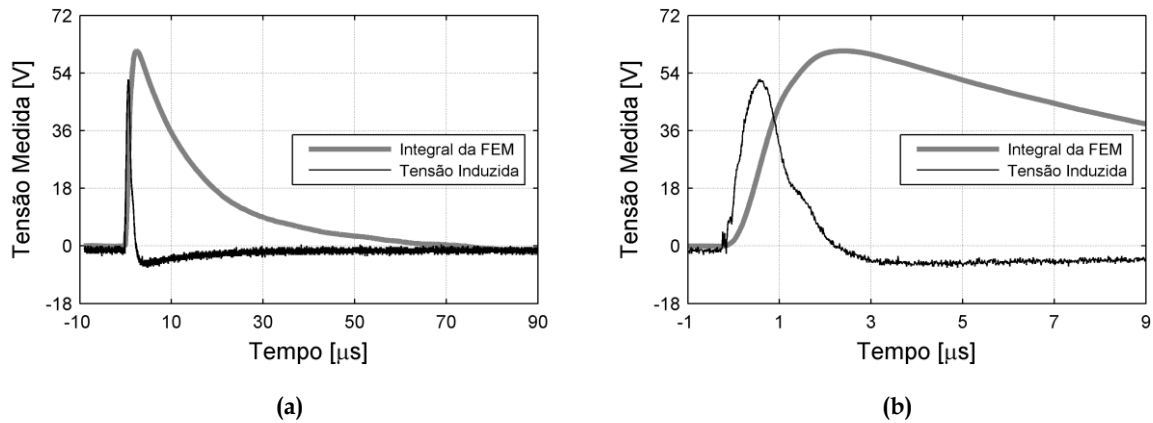


Figura 4. 15 - Medições utilizando capacitor de 200 pF. (b) é um detalhamento de (a).

Com o objetivo de encontrar uma onda integrada mais próxima da onda de corrente real, foi realizado outro teste em que o capacitor de 200 pF foi substituído por outro capacitor de 300 pF, representado na figura 4.16.

Em 4.16 (b) é visto que o tempo de frente aumentou, com valor de aproximadamente 2,5 μs . No teste o tempo de meia onda foi de 15 μs , maior que o valor do teste anterior, mas ainda é um valor distante do tempo de meia onda esperado (45 μs) para a curva de corrente.

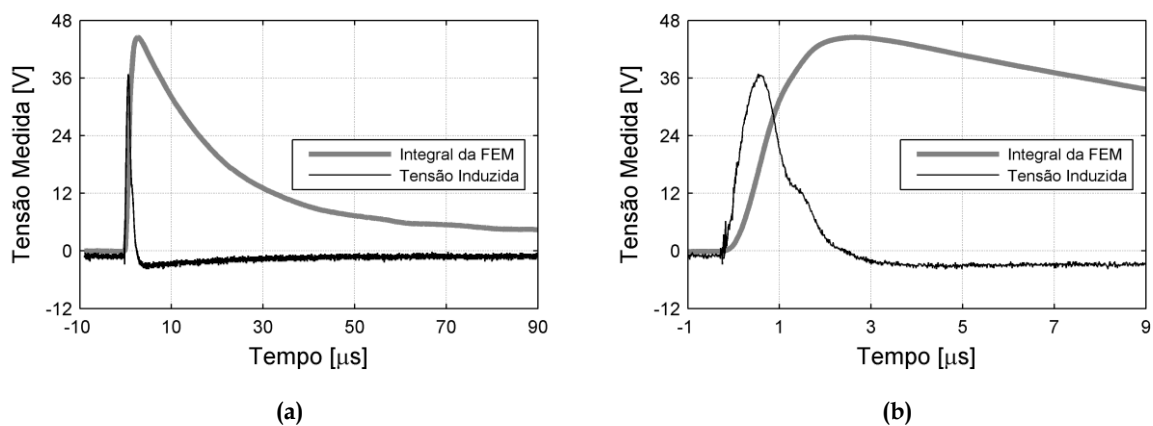


Figura 4. 16 - Medições utilizando capacitor de 300 pF. (b) é um detalhamento de (a).

As medições indicam que, com o aumento do valor da capacitância, houve um aumento do valor do tempo de meia onda. A partir desta constatação foi feito mais um teste, o capacitor de 300 pF foi substituído por um de 500 pF.

A figura 4.17 mostra os resultados para essa configuração. Nesta situação o tempo de frente na onda integrada se manteve em aproximadamente $2,5 \mu\text{s}$, como mostra a figura 4.17 (b). O tempo de meia onda, na onda integrada, foi de $33 \mu\text{s}$, ainda é um valor distante dos $45 \mu\text{s}$ esperado.

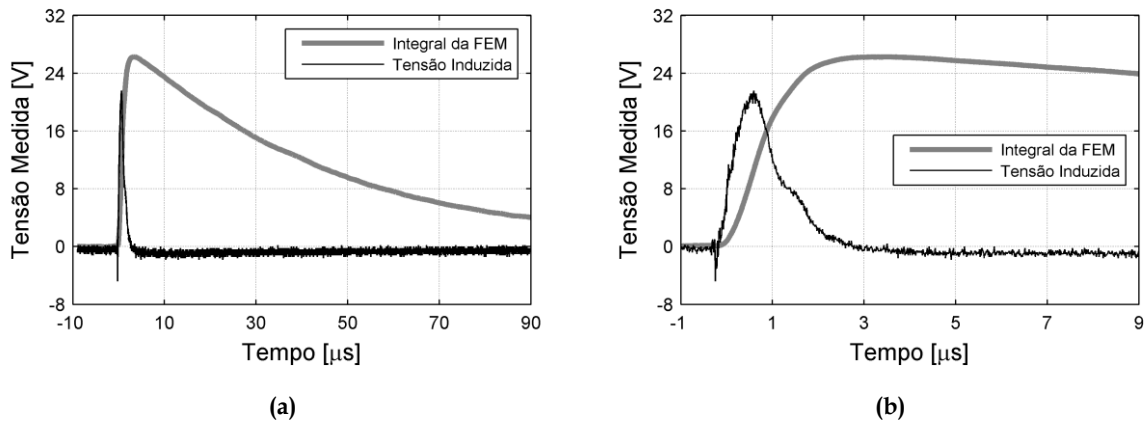


Figura 4. 17 - Medições utilizando capacitor de 500 pF. (b) é um detalhamento de (a).

Outros testes mostraram que para capacitores com capacitância maiores que 500 pF o ruído começa a prevalecer, distorcendo a onda de tensão induzida.

A fase de testes utilizando o gerador de alta tensão ainda está no início. Os resultados aqui apresentados representam um grande avanço nos estudos de aprimoramento do dispositivo, pois, nesta etapa de testes, foi possível se deparar com problemas de medição que, normalmente, seriam encontrados apenas em situações de campo. A conclusão do projeto depende de muitos outros testes e, nos próximos, espera-se incluir o restante do circuito de condicionamento do sinal e conseqüentemente, o circuito completo, para se obter uma medição de corrente fiel a partir do dispositivo.

5. Conclusões

Como mostra o texto desta dissertação, foi realizado o objetivo proposto para este trabalho que consistiu na realização de contribuições para o conhecimento das descargas atmosféricas a partir da exploração de recursos integrados para medição de grandezas associadas aos efeitos dos processos envolvidos na formação e evolução das descargas, notadamente os campos eletromagnéticos, as correntes e registros de vídeo e de luminosidade.

Em particular, consideram-se importantes as contribuições relativas ao conhecimento das componentes M e das descargas ascendentes medidas na Estação do Morro do Cachimbo.

No que concerne às componentes M, no contexto deste trabalho e de forma original, foram medidas, pela primeira vez, correntes de componentes M de primeiras correntes de retorno de descargas naturais. Foram obtidos registros simultâneos completos, envolvendo o campo elétrico, a corrente, o vídeo e a luminosidade de dois eventos de componentes M, o que possibilitou desenvolver interpretações sobre o fenômeno e sua frequência. Um resultado muito importante deste trabalho consiste na conclusão de que a ocorrência de componentes M em primeiras correntes de descargas naturais é muito comum, diferentemente do que apontava a literatura internacional até o momento.

No contexto deste trabalho foram medidas as primeiras correntes de descargas negativas ascendentes em regiões tropicais. Embora seja comum a medição deste evento em regiões temperadas, não havia registro, até o momento, de medição das suas correntes nas regiões quentes entre os trópicos, onde as nuvens e respectivos centros de cargas positivas e negativas têm posição mais elevada, devido às típicas maiores temperaturas. Isto torna o evento menos

freqüente nestas regiões. Foram medidas seis correntes de descargas negativas ascendentes em MCS e, para um dos eventos, foram obtidos registros simultâneos de campo elétrico, corrente e vídeo, o que possibilitou o desenvolvimento de interpretações sobre o fenômeno.

Embora o número reduzido de amostras não possibilite ainda desenvolver uma caracterização do evento, um resultado importante e intrigante obtido, foi a constatação de transferência de uma carga muito próxima de 6 C da nuvem para o solo por 5 das 6 descargas medidas. Esta carga é muito menor do que aquela transferida por descargas ascendentes nas regiões temperadas e tem valor próximo ao valor mediano das cargas transferidas por correntes de descargas descendentes negativas em MCS. Esta observação parece ter significado físico e a verificação da tendência merece acompanhamento nas medições futuras deste tipo de evento em MCS.

O trabalho de dissertação compreendeu, ainda, o desenvolvimento de soluções para melhoria de funcionamento e desempenho do medidor original de corrente de descargas baseado na detecção do campo magnético próximo, anteriormente concebido e desenvolvido no LRC. Por meio de ensaios laboratoriais, verificou-se que as modificações introduzidas ao nível de *software* e *hardware* contribuíram para significativa melhoria de desempenho do medidor.

Como continuidade natural deste trabalho, propõe-se a instalação de sistemas para medição de campo elétrico distante em MCS, a princípio próximo à estação remota onde se localiza a câmera rápida. A disponibilidade de registros simultâneos do campo elétrico distante e das demais medições (de corrente, campo elétrico próximo, vídeo e luminosidade) amplia, em muito, a capacidade de interpretação do evento de descarga.

No que concerne ao medidor portátil de correntes de descargas, recomenda-se a implementação das melhorias desenvolvidas em laboratório nos dispositivos instalados e distribuídos na rede de medição já configurada e sua aplicação para obtenção de novos registros de correntes de corrente para se aferir o impacto destas melhorias na qualidade dos registros de correntes reais.

6. Bibliografia

- [1] VISACRO S., "**Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem em Engenharia**", livro, pp.1-272, Artliber Editora Ltda, São Paulo, SP, 2005.
- [2] SCHONLAND B.F.J., "**The lightning discharge**", In Handbuch der Physik 22, pp 576-628, Berlin: Springer-Verlag, 1956.
- [3] MAZUR V., RUHNKE L. H., "**Physical processes during development of upward leaders from tall structures**", Journal of Electrostatics, vol 69, no. 2, pp 97-110, doi:10.1016/j.elstat.2011.01.003, 2011.
- [4] KASEMIR H.W., "**Model of lightning flashes triggered from the ground**", International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Dayton, Ohio, pp. 39-I., 1986.
- [5] VISACRO, S., SOARES A. Jr., SCHROEDER M. A. O, CHERCHIGLIA L. C. L., Sousa V. J., "**Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station**", Journal Geophysical Research, vol 109, issue D01105, doi:10.1029/2003JD003662, 2004.
- [6] VISACRO S., VALE M. H. M., CORREA G., TEIXEIRA A., "**Early phase of lightning currents measured in a short tower associated with direct and nearby lightning strikes**", Journal Geophysical Research, vol 115, issue D16, DOI: 10.1029/2010JD014097, 2010.

- [7] VISACRO, S., MESQUITA, C. R., DE CONTI, A. R., SILVEIRA, F. H.. **"Updated statistics of lightning currents measured at Morro do Cachimbo Station"**. Atmospheric Research, v.117, pp.55 - 63, doi: 10.1016/j.atmosres.2011.07.010, 2012.
- [8] MESQUITA C. R., DIAS R. N., VISACRO S. **"Comparison of peak currents estimated by lightning location system and ground truth references obtained in Morro do Cachimbo station"**, Atmospheric Research, vol 117, pp.37-44, doi:10.1016/j.atmosres.2011.07.005, 2012.
- [9] RAKOV V. A., UMAN M.A., **"Lightning - Physics and Effects"**, Livro, Cambridge Univ. Press, New York. 2003.
- [10] CORREA G. M. , **"Medição e Análise de Campos Elétricos Associados à Correntes de Descargas Atmosféricas"**, dissertação de mestrado, orientador: prof. Silvério Visacro, 2010.
- [11] CLARENCE, N.D., MALAN, D.J. **"Preliminary discharge processes in lightning flashes to ground"**, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol 83, issue 356, pp 161-172, doi: 10.1002/qj.49708335603, 1957.
- [12] PROCTOR, D. E., UYTENBOGGOARDT, R. e MEREDITH, B. M., **"VHF radio pictures of lightning flashes to ground"**, Journal of Geophysical Research, vol. 93, issue D10, pp. 12683 - 12727, doi: 10.1029/JD093iD10p12683, 1988.
- [13] HEIDLER F. H., MANHARDT M., STIMPER K., **"The Slow-Varying Electric Field of Negative Upward Lightning Initiated by the Peissenberg Tower"**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 55, no. 2, doi: 10.1109/TEMC.2012.2209121, 2013.

- [14] VISACRO S., ARAUJO L., GUIMARÃES M., MURTA M. H. V., "**M-Component Currents of First Strokes in Natural Negative Cloud-To-Ground Lightning**", *Journal Geophysical Research*, Em revisão.
- [15] MALAN D.J., COLLENS H., "**Progressive Lightning III: The Fine Structure of Return Lightning Strokes**", *Proc. R. Soc. Lond., A* (162), DOI: 10.1098/rspa.1937.0175, 1937.
- [16] MALAN, D.J., SCHONLAND, B. F. J., "**Progressive Lightning VII: Directly-Correlated Photographic and Electrical Studies of Lightning from Near Thunderstorms**", *Proc. R. Soc. Lond., A* (191), DOI: 10.1098/rspa.1947.0129, 1947.
- [17] THOTTAPPILLIL R., GOLDBERG J. D., RAKOV V. A., UMAN M. A., FISHER R. J., SCHNETZER G. H., "**Properties of M components from currents measured at triggered lightning channel base**", *J. Geophys. Res.*, 100 (D12), 25711–25720, DOI:10.1029/95JD02734., 2005.
- [18] THOTTAPPILLIL R., RAKOV V. A., Uman M. A., "**K and M changes in close lightning ground flashes in Florida**", *J. Geophys. Res.*, 95 (D11), 18631–18640, DOI:10.1029/JD095iD11p18631., 1990.
- [19] ARAUJO L., GUIMARÃES M., PEREIRA C., MESQUITA C. VISACRO S., "**Assessing Currents of Upward Lightning Measured in Tropical Regions**", *Atmospheric Research*, Em revisão.
- [20] DIENDORFER G., PICHLER H., MAIR M., "**Some parameters of negative upward-initiated lightning to the Gaisberg tower (2000–2007)**". *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, (51), pp. 443-52. 2009.

- [21] DIENDORFER G., ZHOU H., PICHLER H., **"Review of 10 years of lightning measurement at the Gaisberg Tower in Austria"**. In Proc. 3rd Int. Symposium on Winter Lightning (ISWL), Sapporo, Japan. 2011.
- [22] VISACRO S., SILVINO J. L., MESQUITA C. R., DIAS R. N., CHERCHIGLIA L. C., SOUZA V. J., **"Nova metodologia de medição indireta da corrente de descarga atmosférica para fins de calibração SLTs"**, II Congresso de Inovação Tecnológica Energia Elétrica, Salvador, 2003.
- [23] SILVINO J. L., MESQUITA C. R., VISACRO S., **"Non-direct Lightning Current Measurement for LLS Gauging Purpose"**, Proc. of International Conference on Ground and Earthing & Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity (GROUND' 2002 & 3rd WAE), Rio de Janeiro, 2002.
- [24] SILVINO J. L., MESQUITA C. R., VISACRO S., **"Non-direct Lightning Current Measurement for Lightning Location Systems Calibration"**, IEE Electronics Letters, vol 39, no 6, pp 504-505, 2003.
- [25] MESQUITA C. R., **"Nova Metodologia para Calibração de Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas"**, Tese de Doutorado, 2006.
- [26] MIKI M., RAKOV V. A., SHINDO T., DIENDORFER G., MAIR M., HEIDLER F., ZISCHANK W., UMAN M. A., THOTTAPPILLIL R., WANG. D., **"Initial stage in lightning initiated from tall objects and in rocket-triggered lightning"**. J. Geophys. Res., 110, D02109, doi:10.1029/2003JD004474., 2005.
- [27] ARAUJO L. S., GUIMARÃES M. B., PEDROSA A. G., VALE M. H. M., VISACRO S., **"Assessing Events of Upward Lightning Measured At Morro do Cachimbo Station"**. International Conference on Lightning Protection (ICLP 2012), Viena, Áustria. 2012

- [28] ARAUJO L. S., GUIMARÃES M. B., CASTRO R. V., VISACRO S., VALE M. H. M., **"Revealing features and details of a recent negative downward lightning event measured at Morro do Cachimbo Station"**. International Conference on Grounding and Earthing & 5th International Conference on Lightning Physics and Effects (GROUND 2012), Bonito, MS. 2012.
- [29] ARAUJO L. S., BATISTA M. P. P., VISACRO S., **"Signatures of an Upward Leader measured at Morro do Cachimbo"**. International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE 2011), , RJ, Brazil. 2011