



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **ESTUDOS DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A OCORRÊNCIA DE CORRENTE CONTÍNUA EM RELÂMPAGOS NATURAIS**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Leandro Zanella de Souza Campos (FEG/UNESP, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [leandro.zanella@gmail.com](mailto:leandro.zanella@gmail.com)

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba (DGE/INPE, Orientador)  
E-mail: [msaba@dge.inpe.br](mailto:msaba@dge.inpe.br)

**COLABORADOR**

Dr. Osmar Pinto Jr. (DGE/INPE)

Julho de 2007

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>3</b>
1.1 Histórico.....	3
1.2 Definição, Tipos de Relâmpagos e Características.....	4
1.3 Objetivos do Trabalho.....	15
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS.....</b>	<b>16</b>
2.1 Lista de Materiais Utilizados.....	16
2.2 Instrumentação Observacional.....	16
2.3 Local de Observação.....	22
<b>3 RESULTADOS.....</b>	<b>24</b>
3.1 Corrente de Pico da Descarga de Retorno.....	24
3.2 Tempo desde a Descarga de Retorno Anterior.....	27
3.3 Observação de Componentes-M em Correntes Contínuas Positivas.....	28
<b>4 CONCLUSÃO.....</b>	<b>29</b>
<b>ANEXO A – ARTIGO ATMOSPHERIC RESEARCH, PIBIC 2005/2006.....</b>	<b>33</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Foto de relâmpago ocorrido em São José dos Campos .....	4
Figura 1.2 – Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.....	8
Fonte: modificada de Lutgens e Tarbuck (1982, p. 244).....	8
Figura 1.3 – Ilustração (a) das características luminosas típicas de um raio que seriam capturadas por uma câmara fotográfica de filme corrido. O tempo é positivo para a direita, sendo que sua escala temporal foi distorcida para facilitar a visualização. Em (b) está o mesmo raio que seria registrado por uma câmara de filme estacionário (câmara fotográfica convencional).....	10
Figura 1.4 – (a) Fotografia em perspectiva das partes que compõem um cabo OPGW: 1- membro dielétrico central, 2–fibras ópticas agrupadas, 3-gel preenchendo espaço entre tubos soltos, 4-fitas para união, 5-tubo de alumínio, 6-Fios metálicos (b) Seção transversal do cabo OPGW. ....	13
Figura 2.1 – Fotografia da câmara <i>8000S MotionScope</i> com sua placa de <i>interface</i> com o PC. ....	16
Figura 2.2 – Relação entre responsividade do sensor CCD (A/W) e comprimento de onda do sinal eletromagnético (nm). O sensor CCD enfatiza as componentes infravermelhas em comparação com as componentes visíveis (o vermelho e o azul estão em aproximadamente 600 e 470 nm, respectivamente). ....	18
Figura 2.3 – Curvas Características da (a) Responsividade da câmara com o Filtro Infravermelho (fornecida pelo fabricante) e da (b) Transmissão do Filtro isoladamente (ensaiada no INPE). Este filtro é colocado pelo fabricante com o intuito também de equalizar as cores e, para o caso monocromático (o da câmara em questão), com o objetivo de aumentar a qualidade da imagem. ....	19
Figura 2.4 – Transmissão da lâmina de vidro substituída na câmara. ....	19
Figura 2.5 – Imagens do líder escalonado com o filtro (a) e sem o filtro infravermelho (b). ....	20
Figura 2.6 – Fotografias (a) da lamina de vidro (esquerda) e do filtro infravermelho (direita) e (b) da câmara com o sensor CCD exposto (seta).....	20
Figura 2.7 – Câmera rápida FASTCAM 512 PCI 2k em seu módulo móvel.....	21
Figura 2.8 – (a) Torre de observação do CTA/IAE/AEL e (b) “teia” colocada no software NetRaios com pontos visualmente conhecidos ao redor da torre. ....	22
Figura 3.1 – Corrente de pico da DR <i>versus</i> duração da CC para relâmpagos negativos (N=248). ....	23
Figura 3.2 – Relação $I_p$ <i>versus</i> duração de CC comparando descargas iniciais (Negative First, N=55) e subseqüentes (Negative Subseq, N=193) (a) e exibindo apenas dados das iniciais (b). ....	24
Figura 3.3 – Gráfico de $I_p$ <i>versus</i> duração de CC comparando positivos (Positive, N=27) e negativos iniciais (Negative First, N=193) e subseqüentes (Negative Subseq., N=55).....	25
Figura 3.4 – Relação entre tempo desde a DR anterior e a duração da CC.....	26
Figura 3.5 – Primeiras componentes-M positivas observadas (setas). ....	27

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CC	Corrente Contínua
DR	Descarga de Retorno
IDL	Interactive Data Language

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Histórico

A ocorrência de relâmpagos em nosso planeta é bastante comum e mais antiga do que a própria humanidade. O estudo destes fenômenos no Brasil teve início há 25 anos com a criação do ELAT (Grupo de Eletricidade Atmosférica) no INPE, e durante este período foi possível observar algumas características diferentes daquelas relatadas na literatura internacional. Este fato, por si só, justifica a continuidade dos esforços já realizados neste sentido.

O relâmpago está entre os fenômenos naturais que mais causam mortes nos Estados Unidos (Wood, 1988), sendo que no Brasil ele é responsável por 100 a 200 mortes por ano além de causar um prejuízo anual em torno de 500 milhões de dólares (Pinto e Pinto, 2000).

Vários setores de atividades são prejudicados diretamente pelos relâmpagos. Transmissão de energia elétrica e telecomunicações são os maiores afetados, mas eles também constituem uma grande ameaça para indústrias e edifícios (comerciais ou residenciais), além da própria segurança das pessoas. Os sistemas de proteção hoje utilizados são desenvolvidos a partir de observações e dados de raios obtidos em outros países (e fora da região tropical, caso em que o Brasil se encaixa), o que aumenta a importância de se possuir mais dados dos casos ocorridos em nossa região.

Os dados colhidos dos relâmpagos no Brasil são baseados em:

- Parâmetros fornecidos pela RINDAT (Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas), um conjunto de 24 sensores localizados na região sudeste do Brasil e arredores. Pertence a um consórcio de empresas com participação do INPE (Pinto, 2003).

- Raios artificiais (induzidos), cujas características são apenas equivalentes aos naturais, induzidos por foguetes lançados pelo INPE no CIPRIN (Centro Internacional de Pesquisas sobre Raios Induzidos e Naturais), localizado em Cachoeira Paulista (Saba et al, 2005).
- Imagens de câmera rápida e dados de campo elétrico de raios naturais. Ambos sincronizados e com horário universal (GPS) com precisão de milissegundo (Ballarotti et al., 2005; Saba et al., 2006).

## 1.2 Definição, Tipos de Relâmpago e Características

Um relâmpago é definido como sendo uma descarga transitória de alta corrente cujo comprimento percorrido tem dimensão de quilômetros (Uman e Krider, 1989). A rigor, uma nuvem não necessita estar envolvida com o fenômeno, mas geralmente ocorre a participação de um tipo específico de nuvem: a nuvem de tempestade, conhecida por *cumulonimbus*. A Figura 1.1 mostra uma fotografia de um relâmpago ocorrido em São José dos Campos.



Figura 1.1 - Foto de relâmpago ocorrido em São José dos Campos.

Denominamos os tipos de relâmpagos em função de sua origem e do ponto onde terminam. Eles podem ocorrer (1) de uma nuvem para o solo (chamado Nuvem-solo ou NS), (2) do solo para a nuvem (chamado Solo-Nuvem ou SN), (3) dentro da nuvem (chamado Intranuvem ou IN), (4) entre nuvens, (5) de uma nuvem para a atmosfera acima dela e, finalmente, (6) de uma nuvem para um ponto qualquer no ar (descargas no ar).

Os relâmpagos IN são os mais freqüentes (cerca de 80% do número total global de relâmpagos), mas de difícil estudo por ocorrerem em meio à opacidade da nuvem. Sua investigação requer o uso de radares e antenas de rádio freqüência. Podem ser considerados como curto-circuito durante o processo de separação de cargas que ocorre durante a tempestade no interior da nuvem (Pinto e Pinto, 2000).

Os relâmpagos que envolvem o solo, nuvem-solo e solo-nuvem, embora não sejam os mais freqüentes, são os mais estudados por estarem mais acessíveis à observação visual – por conseguinte, à observação instrumentada também –, e por causa do perigo que apresentam. Os relâmpagos que envolvem o solo são denominados usualmente por **raios**. Estes, por sua vez, podem ser divididos em dois tipos: os negativos e os positivos, dependendo da polaridade predominante das cargas na região da nuvem onde se originam. Assim, existem quatro subtipos: NS negativo, NS positivo, SN negativo e SN positivo.

Os relâmpagos nuvem-solo negativos “nascem” no centro negativo de cargas próximo à base da nuvem e, em geral, são mais freqüentes que os positivos. Os relâmpagos positivos são menos conhecidos, e só foram estudados mais detalhadamente nas últimas décadas. Acredita-se que, na maior parte das vezes, eles se originam no centro positivo de cargas transportando do solo para nuvem uma carga negativa, ou seja, equivalente à transferência de cargas positivas para o solo (Saba, 1997). A polaridade da descarga é determinada, portanto, pela polaridade da carga (resultante) depositada no solo.

Os relâmpagos Solo-Nuvem são raros em comparação com os nuvem-solo, originando-se geralmente de pontos elevados tais como torres, edifícios, montanhas e árvores.

### 1.2.1 Relâmpagos NS Negativos: Etapas e Características

Um relâmpago nuvem-solo negativo segue geralmente seis etapas, nesta ordem, a saber: (a) Pulso de Quebra de Rigidez ou descarga p-N, (b) líder escalonado, (c) descarga conectante, (d) descarga de retorno, (e) líder contínuo e (f) descarga de retorno subsequente, sendo que as etapas (e) e (f) podem se repetir várias vezes ou mesmo não ocorrer (Saba, 1997):

a) Os relâmpagos negativos para o solo começam com uma **descarga entre o centro positivo menor na base da nuvem e o centro negativo** para a liberação dos elétrons ligados às partículas de água ou gelo. Esta descarga é conhecida como **Pulso de Quebra de Rigidez** (mais detalhes na seção 1.3) (Figura 1.2);

b) Uma fraca descarga luminosa (geralmente não visível) se propaga em direção ao solo, criando um canal ionizado (caminho condutor). Essa descarga, denominada **líder escalonado** (*stepped leader*), propaga-se para baixo até aproximadamente 5 a 50 m do solo, com velocidade média da ordem de  $10^5$  m/s. O líder escalonado geralmente ramifica-se, mas nem todos os seus ramos estendem-se até o solo (Figura 1.2b);

c) Uma **descarga conectante** surge com a intensificação do campo elétrico entre a parte frontal do líder escalonado e o solo. Tal descarga geralmente parte de objetos pontiagudos existentes na superfície, como árvores e edifícios, e desloca-se em direção à parte frontal do líder escalonado;

d) Quando o encontro ocorre, a descarga conectante transforma-se numa descarga forte e de intensa luminosidade, denominada **descarga de retorno** (*return stroke*). É justamente essa descarga que é vista como um clarão. Ainda que preferencialmente o relâmpago atinja os objetos mais altos, isso nem sempre acontece.



Na descarga de retorno, as cargas negativas (elétrons) presentes no canal já ionizado pelo líder escalonado são aceleradas, o que cria uma corrente ascendente (os elétrons fluem da nuvem para o solo) com picos de 30 kA. A velocidade de propagação da frente de onda (ou da luminosidade ao longo do canal) é da ordem de  $10^8$  m/s (um terço da velocidade da luz). A duração de tal descarga é de aproximadamente 70 microssegundos. Em média, ocorrem três descargas por relâmpago, mas há registros de casos com até 26 descargas (Figura 1.2d,e);

e) O **líder contínuo** (*dart leader*) se dá quando o canal do raio está fracamente ionizado e, assim, este líder deve ionizá-lo novamente. Caracteriza-se como um líder por possuir baixa intensidade de corrente. Possui velocidade característica de  $(1-2) \cdot 10^7$  m/s. Esta etapa ocorre somente quando, de alguma forma, existem cargas disponíveis próximas do canal feito anteriormente (Figura 1.2f,h);

f) Após o líder contínuo ter ionizado o canal, outra descarga ocorre, sendo esta chamada **descarga subsequente** (*subsequent stroke*). A diferença essencial entre descargas de retorno e subsequente é que a primeira é precedida de líder escalonado, pois não existe canal algum, enquanto que a segunda é precedida por um líder mais veloz, que apenas refaz um canal previamente existente (Figura 1.2g,i);

Estas sucessivas **descargas subsequentes**, em um único relâmpago, podem ser chamadas também de descargas múltiplas. Algumas vezes o olho humano é capaz de perceber essas descargas e ver o canal do relâmpago piscar. À noite, pode-se observar o “efeito estroboscópico” gerado pela luminosidade de tais descargas em objetos em movimento, como o limpador de pára-brisa de um automóvel. Em geral as descargas subsequentes são menos ramificadas do que a primeira descarga de retorno. Cerca de 50% dos casos elas não seguem uma trajetória única, formando os chamados raios de canais múltiplos, que atingem mais de um local (Saba et al, 2005a).

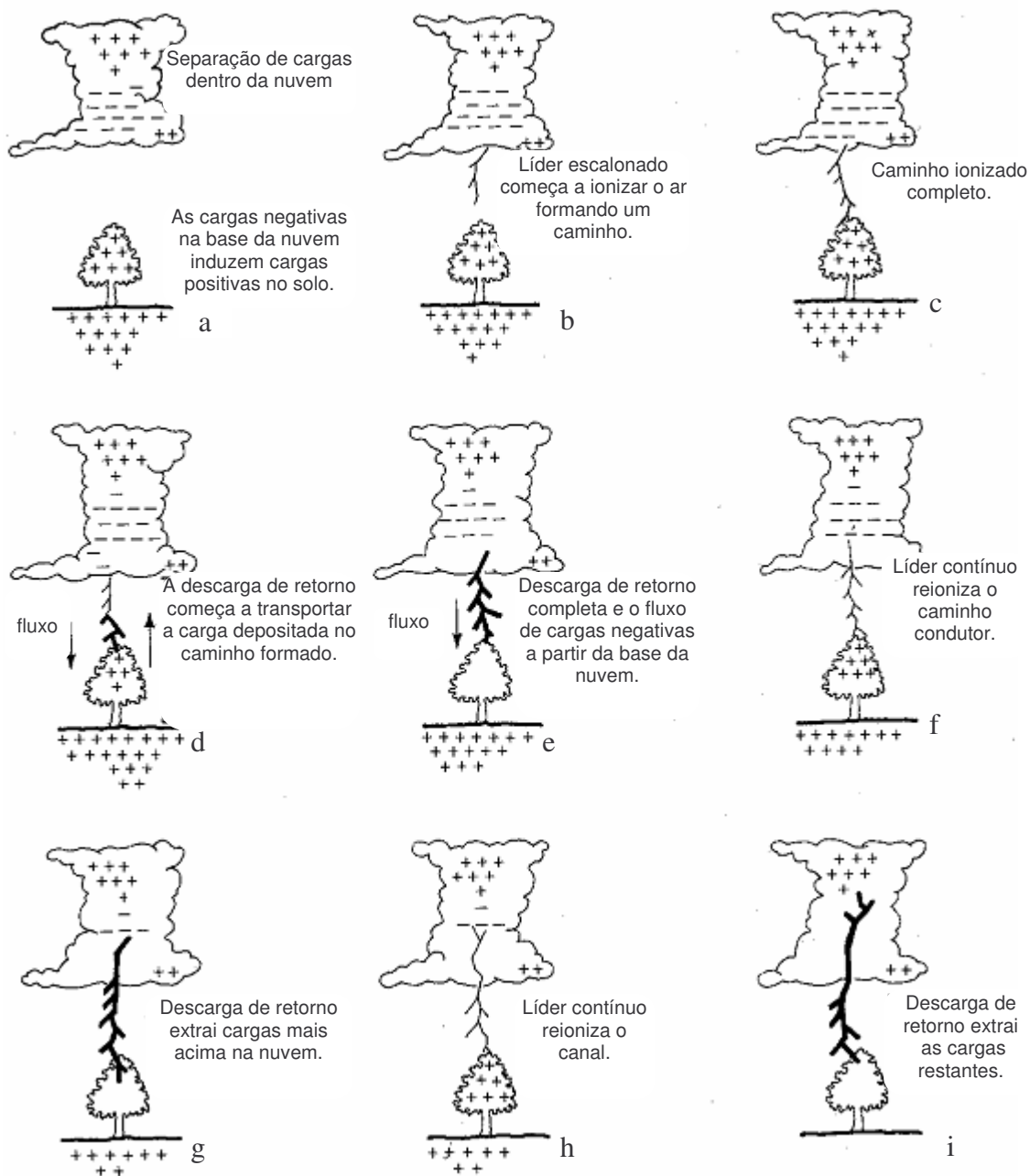


Figura 1.2 – Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.

Fonte: modificada de Lutgens e Tarbuck (1982, p. 244).

As descargas de retorno geralmente são seguida por uma **corrente contínua** (CC), que pode ser entendida como sendo “um arco quase-estacionário entre a fonte de carga na nuvem e o solo. Valores típicos de corrente são dezenas ou centenas de ampères, e de

duração de até centenas de milissegundos” (Rakov e Uman, 2003). Normalmente denomina-se corrente contínua curta quando ela dura entre 10 e 40 ms e longa aquelas que ultrapassam 40 ms. Ballarotti (2005) observou uma grande ocorrência de correntes contínuas com duração inferior a 10 ms, até então inexistentes na literatura consultada em seu trabalho, e as denominou mini-correntes contínuas. Entre o pico de corrente (dezenas de kA) da descarga de retorno e o nível quase-estacionário (centenas de ampères) da CC, pode existir uma etapa de transição, chamada de corrente intermediária, da ordem de 1 ms de duração com corrente da ordem de 1 kA (Uman, 1987). Cerca de 70% das descargas de retorno são seguidas por algum tipo de corrente contínua (Saba et al, 2005a).

Relâmpagos que contém **corrente contínua** podem ser chamados “relâmpagos quentes” e os que não a possuem, “relâmpagos frios”, apesar desta denominação não ser usual. Kitagawa et al. (1962) também os distinguiu como sendo “híbridos”, com CC, e “discretos”, sem CC. Os quentes são capazes de iniciar incêndios enquanto que os frios não. Apesar de terem a mesma temperatura, a diferença está em que ela é mantida por mais tempo nos relâmpagos quentes (décimos de segundos nos quentes e milésimos de segundos nos frios). No entanto, também os relâmpagos frios podem ser muito destrutivos já que o aumento essencialmente instantâneo da corrente dentro de um material com alta resistência à corrente elétrica causa um aquecimento súbito e uma conseqüente vaporização da parte interna do material. Como resultado, uma pressão muito alta é rapidamente gerada dentro do material, podendo levá-lo a explosão (Saba, 1997).

A Figura 1.3 ilustra as características luminosas típicas de um raio que seriam capturadas por uma câmara fotográfica de filme corrido (*streak camera* ou *Boy's camera*). Nota-se nesta ilustração os valores típicos de 30 e 40 ms entre descargas.

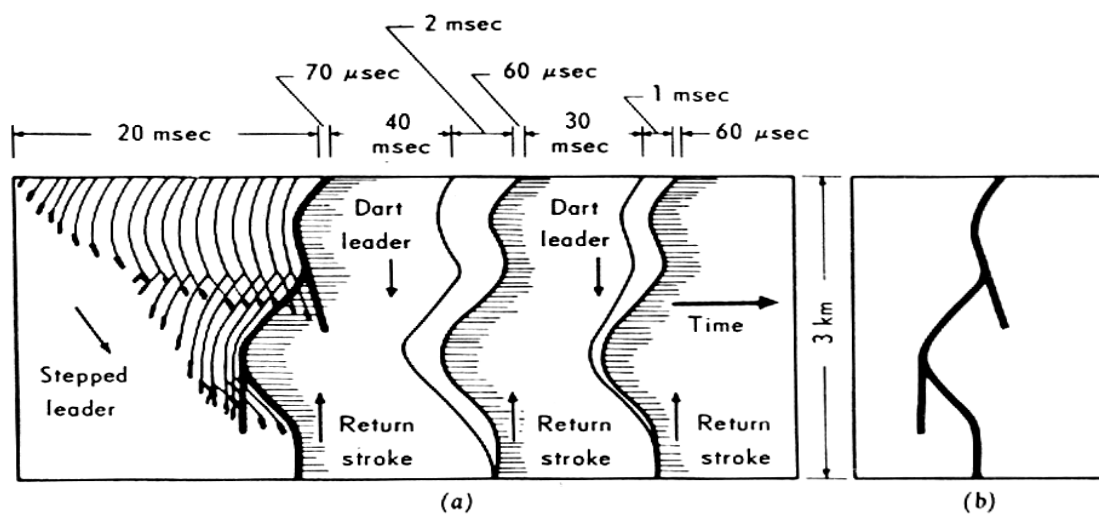


Figura 1.3 – Ilustração (a) das características luminosas típicas de um raio que seriam capturadas por uma câmara fotográfica de filme corrido. O tempo é positivo para a direita, sendo que sua escala temporal foi distorcida para facilitar a visualização. Em (b) está o mesmo raio que seria registrado por uma câmara de filme estacionário (câmera fotográfica convencional).

Fonte: Uman (1984, p. 15).

A Tabela 1.1 exibe as principais características e correspondentes valores típicos dos relâmpagos NS negativos.

Tabela 1.1 - Principais características e correspondentes valores típicos dos relâmpagos apresentados na literatura internacional (Uman, 1984; Rakov e Uman, 2003) e obtidos no Brasil (Saba et al, 2005a), sendo estes indicados por um asterisco.

CARACTERÍSTICA	ETAPA	VALOR TÍPICO
<b>Líder Escalonado</b>		
Comprimento dos passos		50 m
Intervalo de tempo entre passos		20 - 50 $\mu$ s
Velocidade média de propagação		$2 \cdot 10^5$ m/s
Corrente		100 A
Duração total		35 ms
<b>Descarga de Retorno</b>		
Velocidade de propagação		$(1-2) \cdot 10^8$ m/s

Pico de corrente	30 kA
Comprimento do canal	5 km
Duração	70 $\mu$ s

#### Líder Contínuo

Velocidade de propagação	$(1-2) \cdot 10^7$ m/s
Corrente	1 kA
Duração total	1 – 2 ms

#### Descarga Subseqüente

Corrente	10 – 15 kA
Velocidade de propagação	$(1-2) \cdot 10^8$ m/s

#### Corrente Contínua

Duração	100 ms
Porcentagem de Descargas de Retorno com corrente contínua	73% *

#### Características Gerais de um Relâmpago

Diâmetro do canal	1-2 cm
Número de descargas de retorno	3,8 *
Intervalo de tempo entre as descargas	62 ms *
Duração total	180 ms *
Carga total envolvida	25 C
Porcentagem de Relâmpagos com Canais Múltiplos	56% *

### 1.2.2 Breve Descrição do Relâmpago NS Positivo

“Os relâmpagos nuvem-solo positivos seguem de um modo geral as mesmas etapas descritas para os negativos, porém com algumas diferenças” (Pinto e Pinto, 2000). Em geral, iniciam-se a partir de um líder com uma luminosidade mais fraca comparada ao líder escalonado de um NS negativo; tal líder propaga-se a partir de uma região de cargas positivas dentro da nuvem, não apresentando etapas e sim uma luminosidade contínua, porém com variações periódicas de intensidade. Outra característica importante é o número de descargas de retorno: somente uma na maioria das vezes. Costumam também apresentar corrente contínua mais longa (transferem maior

quantidade de carga elétrica para o solo) do que os NS negativos, tornando-se mais destrutivos e sendo responsáveis pela maioria dos incêndios.

### **1.2.3 Componentes-M**

Componentes-M são definidas como sendo variações de curta duração da luminosidade do raio durante o período de corrente contínua. São extremamente curtas, em sua maioria durando de 1 a 4 ms. Estas variações de luminosidade estão associadas a pulsos de dezenas até centenas de ampères superpostos sobre a corrente contínua (Fisher et al., 1993). O valor típico de pico de corrente em uma componente-M encontra-se na faixa dos 200 A (Thottappillil, 2002), porém, já foi registrado um caso com 7 kA (Rakov et al, 1998). A primeira delas costuma ocorrer no máximo 4 ms após a descarga de retorno, o que indica que as componentes-M são necessárias para a forma com a qual ocorre a transferência de carga para o solo durante a corrente contínua (Thottappillil et al, 1995). Por isso, o conhecimento de suas características forma os primeiros passos para um melhor entendimento do funcionamento da corrente contínua em si.

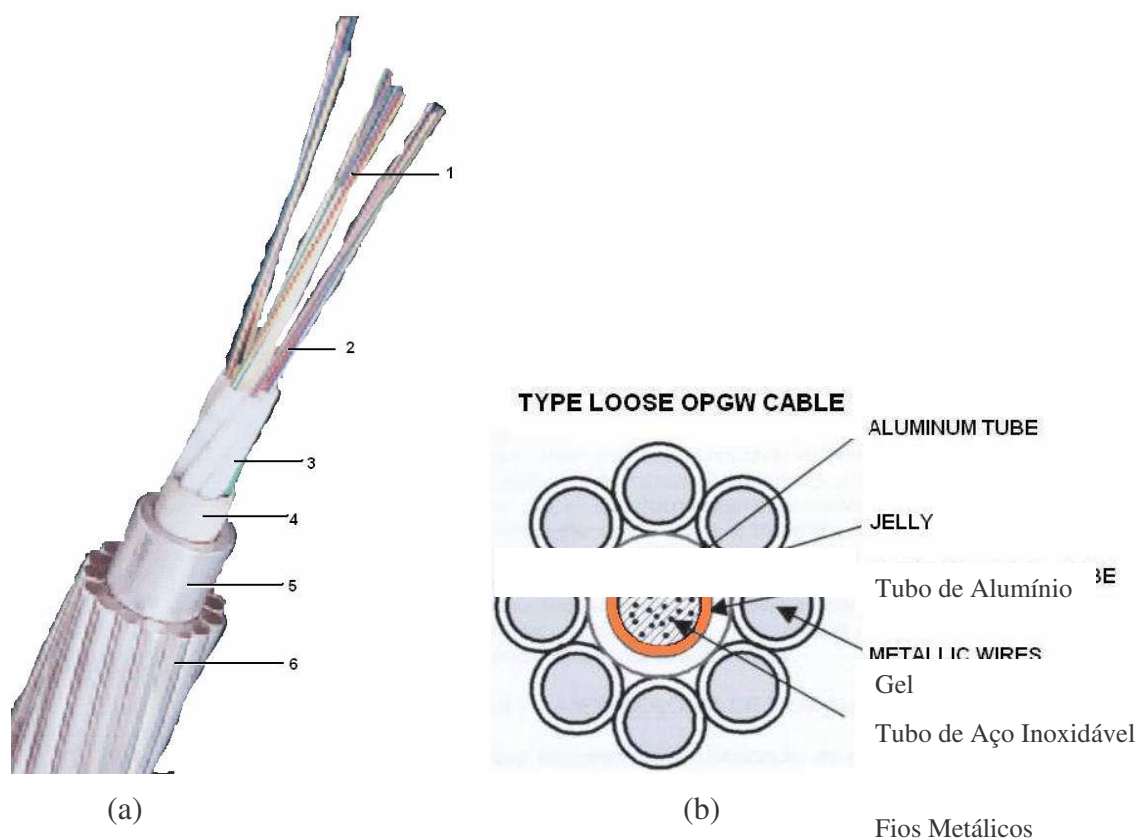
A grande maioria dos dados obtidos sobre componentes-M são baseados em medidas de corrente em raios artificiais (Thottappillil et al, 1995) ou medidas de campo elétrico em relâmpagos próximos (Thottappillil et al, 1990). Parâmetros como: tempo decorrido entre a descarga de retorno e a primeira componente-M; intervalo entre duas componentes-M durante a corrente contínua; e a duração total de uma componente-M precisam ser levantadas para raios naturais e comparados com os estudos anteriores.

### **1.2.4 Danos Causados pela Corrente Contínua e a Importância de Seu Estudo**

Conhecemos relativamente pouco a respeito do funcionamento e causas da corrente contínua nos raios. Em compensação, seus efeitos destrutivos sobre a natureza e atividades humanas são muito conhecidos e amplamente observados. Apesar do valor da corrente ser bem mais baixo do que o da descarga de retorno, a duração é extremamente longa. Isto faz com que o local ou objeto atingido sofra um aumento intenso de temperatura. Muitos materiais atingidos acabam fundindo ou entrando em combustão.

Estes efeitos são ocasionalmente responsáveis por incêndios em florestas e matas, além de serem causa de danos gravíssimos às redes de distribuição de energia elétrica, carcaças de aeronaves e construções (tanto residenciais quanto industriais).

Um ótimo exemplo de tecnologia afetada é o caso do cabo OPGW (*Optical Ground Wire Cable* – Cabo Óptico com Fio Terra), amplamente utilizado em linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, ao mesmo tempo em que serve como terra contém fibras ópticas para transmissão de dados em seu interior. A descarga de retorno do relâmpago, devido à sua curta duração, por si só costuma causar poucos danos aos condutores (Wiesinger, 1996). Porém, no caso da corrente contínua, devido à sua longa duração, tem-se como consequência um grande aumento da temperatura onde o raio está incidindo. O calor acaba por ter consequências destrutivas sobre os cabos OPGW (Alvin et al, 2002), podendo não só causar sérios danos ao fio terra, mas também ocasionar a fusão e consequente perda da fibra óptica interna. Isto traz diversos transtornos não só à transmissão de energia, mas também às telecomunicações (Internet e telefonia) que fazem uso das fibras. A Figura 1.4 traz a estrutura de um cabo OPGW (a) e a sua seção transversal (b). Segundo Ferraz et al.(2004), danos a estes cabos são extremamente frequentes no Brasil devido à grande atividade de raios no país. Eles concluem também que um conhecimento maior a respeito das correntes contínuas poderia ser usado para minimizar os danos causados por elas sobre os cabos OPGW. Os dados certamente



Fonte: adaptado de Ferraz et al. (2004, p. 3).

Apesar da grande importância de se efetuar estudos sobre a corrente contínua de raios naturais, estes são extremamente difíceis de realizar, logo poucos dados são conhecidos até o momento. Estudos já foram realizados em raios artificiais (Fisher et al, 1993; Thottappillil et al, 1995) e raios ascendentes em torres (Diendorfer et al., 2003). Thottappillil et al (1990) realizaram estudos para raios naturais através de medidas de campo elétrico em raios próximos do local de medida. Este método, além de ser restrito quanto à distância, ainda apresenta grandes dificuldades na identificação de variações-M. Logo, torna-se necessária uma extensão dos dados conhecidos e novos métodos de observação, para proporcionar um conhecimento mais profundo deste fenômeno.

### **1.3 Objetivos do Trabalho**

Este trabalho visa obter analisar a influência sobre as correntes contínuas pelos seguintes parâmetros como:

- Pico de corrente da descarga de retorno;
- Ordem da descarga de retorno;
- Tempo transcorrido desde a descarga de retorno anterior; e
- Polaridade.



## 2 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

### 2.1 Lista de Materiais Utilizados

- Câmeras rápidas *MotionScope* 8000S PCI, fabricada pela Red Lake; e FASTCAM 512 PCI 2k, fabricada pela Photron;
- Microcomputador com o ambiente de desenvolvimento para IDL (*Interactive Data Language*) e o software *Origin 7.0* para plotagem de gráficos.

### 2.2 Instrumentação Observacional

Estudos internacionais de relâmpagos já foram realizados com a utilização de câmera VHS juntamente com antenas de campo elétrico. Porém, este método não é adequado para efetuar uma contagem precisa das descargas, visto que o tempo entre quadros é de 33ms (30 fps, *frames* por segundo, ou seja, 30 quadros por segundo) (Rakov, 2003). Além da perda eventual de descargas de um relâmpago, o sistema VHS convencional não é capaz de registrar o líder escalonado ou correntes contínuas com resolução inferior a 33 ms.

Neste trabalho foram utilizadas duas câmeras de alta resolução temporal com sincronização GPS. Uma foi configurada de tal forma a gerar filmes com 1000 fps e a outra entre 4000 e 8000 fps (maiores detalhes nas próximas sessões), o que possibilita uma análise bastante detalhada do raio e o acompanhamento de sua corrente contínua de forma bastante eficiente.

#### 2.2.1 Câmera Rápida *MotionScope* 8000S

Utilizamos o Sistema de Imageamento Digital de Alta Velocidade (ou câmera rápida HS-1, forma abreviada utilizada neste trabalho, ou ainda *High Speed Digital Imaging System*, nomenclatura usada pelo fabricante) “*MotionScope* 8000S PCI” do fabricante *Red Lake*, modelo *8000S*. Este sistema está baseado num sensor CCD (*Charge Couple Device*) para a captura das imagens. Este adquire e grava uma seqüência de imagens digitais de um evento a uma taxa ajustável de 60 a 8.000 quadros por segundo, sendo que os arquivos de saída, com extensão *avi*, podem ser visualizados em um PC. Possui

sincronização de tempo via GPS (*Global Positioning System*), possibilitando comparação com outros instrumentos em análises de um mesmo evento. A Figura 2.1 mostra duas fotografias: uma do sistema, que é composto essencialmente de uma câmera e de seu *hardware* de *interface* com o PC.



Figura 2.1 – Fotografia da câmera 8000S MotionScope com sua placa de *interface* com o PC.

Fonte: Red Lake (2002).

A taxa de aquisição está configurada para 1.000 fps. Não foi usada a máxima (8.000 fps) porque há um compromisso entre taxa de aquisição e ângulo de abertura (ou, equivalentemente, área utilizável do CCD). Assim, a 1.000 fps, a resolução da imagem é de 240 x 210 pixels (a total do sensor CCD é de 656 x 496 pixels), onde cada pixel possui 7,4  $\mu\text{m}$  x 7,4  $\mu\text{m}$ . Para esta taxa, os ângulos de abertura são 23,72° na vertical e 26,99° na horizontal; o tempo total de gravação é de 2,0 segundos; cada arquivo gerado pela câmera possui 2.000 quadros; e o tempo de exposição de cada quadro é aproximadamente 1,0 ms (é aproximado porque existe um tempo de *refresh* do CCD entre dois quadros, que o fabricante diz ser desprezível e não fornece). Ou seja, em termos práticos, o sistema funciona ininterruptamente. Tal configuração se mostrou bem ajustada para a filmagem dos relâmpagos naturais.

Este sistema é operado basicamente da seguinte forma: (1) a câmera é direcionada para a tempestade em observação. (2) A luminosidade é ajustada para que se tenha um contraste luminoso adequado do cenário. (3) Ao visualizar um raio, o operante aperta um botão de *trigger* (acionamento) do sistema; aqui, é utilizado um recurso computacional chamado **Fila Circular**, que consiste em gravar dados continuamente em uma determinada região de memória e, quando o ponteiro (que indica a posição de

memória a ser utilizada) chega na sua última posição, o programa aponta para a primeira posição da memória. Assim, ao se acionar o pulso de *trigger*, as imagens serão gravadas, consistindo de imagens passadas e futuras em relação ao momento do *trigger*. Ou seja, ao configurar o *trigger* em 50%, a gravação do filme registrará 1,0 segundo de imagens anteriores e 1,0 segundo de imagens posteriores ao momento do *trigger*. Como o tempo de resposta típico dos operadores (intervalo de tempo este entre os momentos do evento e o do acionamento manual) está em torno de 400 ms, geralmente registramos 0,6 s antes da ocorrência da 1ª descarga de retorno e 1,4 s após esta ocorrência. Dado que a duração máxima de um raio está em torno de 1,0 s, tal ajuste de 50% mostrou-se o mais eficaz na captura de todas as fases do raio.

Outro aspecto importante deste sistema está na sua sensibilidade para os diferentes comprimentos de onda. A Figura 2.2 mostra o gráfico fornecido pelo fabricante que relaciona Responsividade (em inglês, *Responsitivity*<sup>1</sup>) e comprimento de onda do sinal de entrada. Originalmente, a câmera possuía um Filtro Infravermelho com curva característica exibida na Figura 2.3. Tal filtro foi substituído por uma lâmina de vidro, que tem sua Curva de Transmissão Ótica exposta na Figura 2.4. O levantamento das curvas de transmissão do filtro e do vidro foi realizado pelo Laboratório Associado de Sensores do Centro de Tecnologias Especiais do INPE. Nota-se, nas Figura 2.3a e 2.3b, uma diferença significativa para a faixa de comprimento de onda entre 300 e 350 nm. [Parece que, pelo fato do CCD ser muito pouco sensível para esta faixa (Figura 2.2), o fabricante não levou em conta a baixa transmissão do filtro nestes comprimentos de onda]. Pode-se notar, portanto, que o vidro é compatível com o CCD, ou seja, não filtra nenhum comprimento de onda que sensibilize o CCD.

Nesta substituição, o registro do Líder Escalonado e da Descarga de Retorno (etapas do raio) foi intensificado na imagem por possuírem ambos componentes infravermelhos nos seus espectros de emissão, resultando num imageamento mais sensível e de acordo com as necessidades do trabalho. É possível notar tal diferença na Figura 2.5, que exhibe imagens registradas do líder escalonado para dois diferentes eventos, com e sem o filtro

---

<sup>1</sup> *Responsitivity*: razão entre a saída elétrica e a entrada ótica, num fotodetector (geralmente expressa em A/W ou V/W).

infravermelho. A Figura 2.6 mostra duas fotografias: uma da lâmina de vidro e do filtro e outra da câmera com seu sensor CCD exposto.

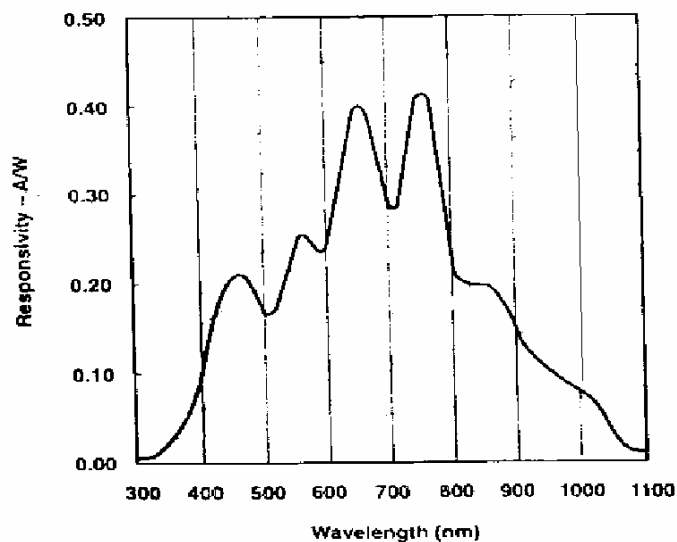


Figura 2.2 – Relação entre responsividade do sensor CCD (A/W) e comprimento de onda do sinal eletromagnético (nm). O sensor CCD enfatiza as componentes infravermelhas em comparação com as componentes visíveis (o vermelho e o azul estão em aproximadamente 600 e 470 nm, respectivamente).

Fonte: adaptada de Red Lake (2002, p. 1-2).

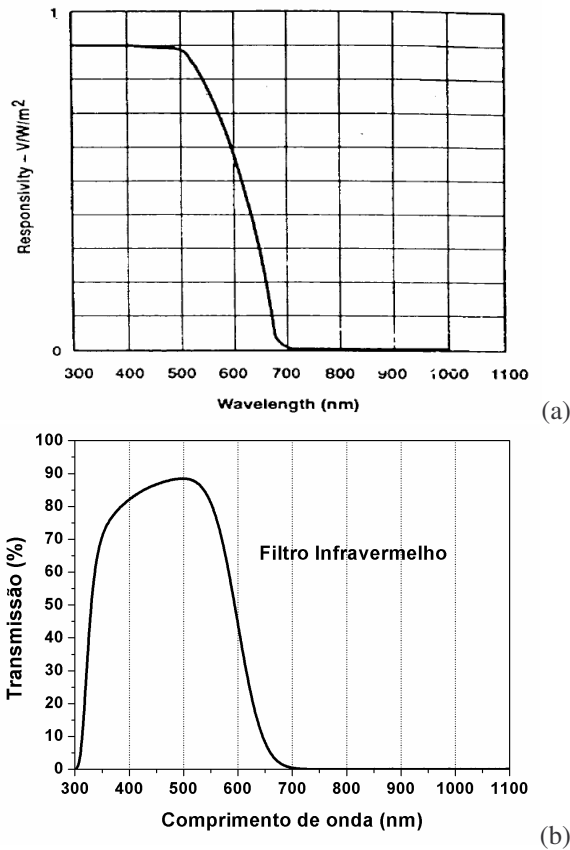


Figura 2.3 – Curvas Características da (a) Responsividade da câmera com o Filtro Infravermelho (fornecida pelo fabricante) e da (b) Transmissão do Filtro isoladamente (ensaiada no INPE). Este filtro é colocado pelo fabricante com o intuito também de equalizar as cores e, para o caso monocromático (o da câmera em questão), com o objetivo de aumentar a qualidade da imagem.

Fonte (a): Red Lake (2002, p. 1-2).

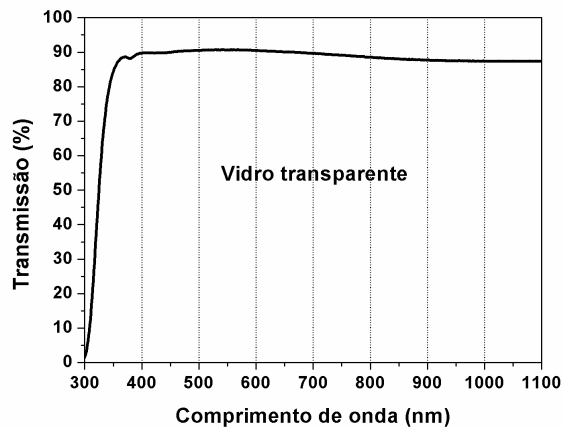


Figura 2.4 – Transmissão da lâmina de vidro substituída na câmera.

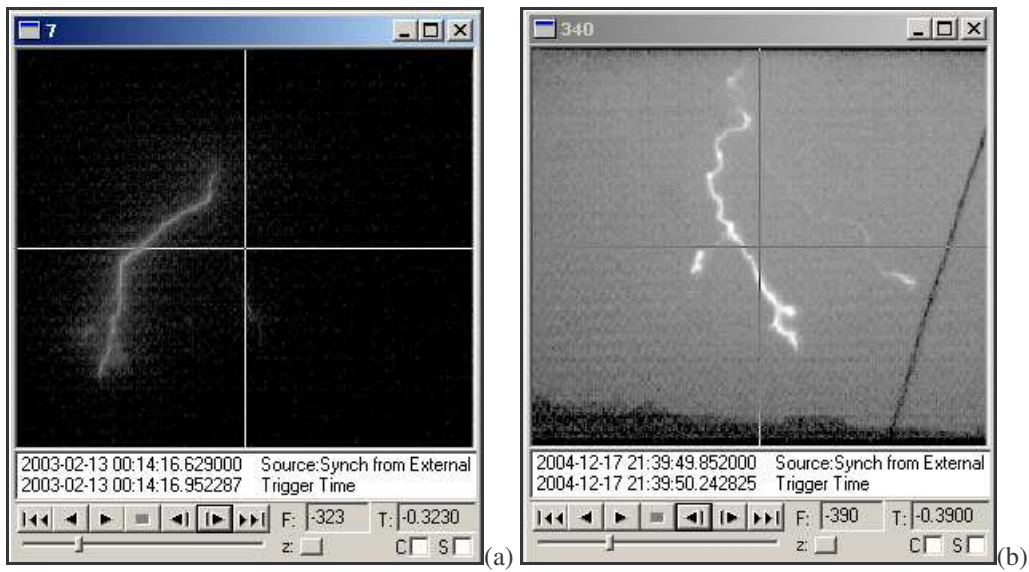


Figura 2.5 – Imagens do líder escalonado com o filtro (a) e sem o filtro infravermelho (b).

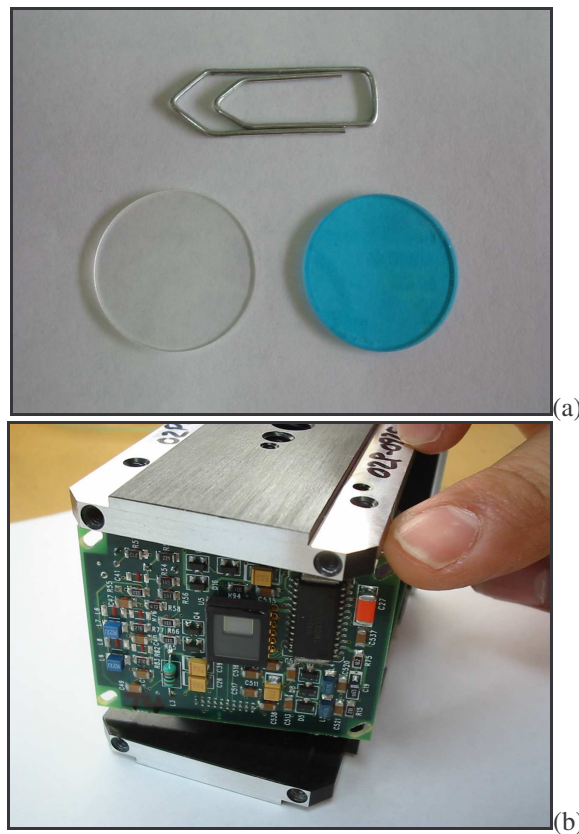


Figura 2.6 – Fotografias (a) da lamina de vidro (esquerda) e do filtro infravermelho (direita) e (b) da câmera com o sensor CCD exposto (seta).

### 2.2.2 Câmera Rápida FASTCAM 512 PCI 2k

Utilizamos também a câmera rápida “FASTCAM 512 PCI 2k” (doravante abreviada como HS-2), do fabricante *Photron*. Sua taxa de gravação de imagens é superior à da câmera HS-1, indo de 50 a 32.000 quadros por segundo. Para este trabalho utilizamos, dependendo da abertura vertical que o cenário exigiu, sempre 4.000 (para uma abertura maior) ou 8.000 (para uma abertura menor) quadros por segundo. Seu funcionamento é praticamente idêntico ao da HS-1, realizando gravações com o método da fila circular (salvando 1 s antes e 1 s depois do *trigger* ser ativado) e sincronizando seus vídeos com tempo GPS.

A Figura 2.7 mostra a HS-2 montada no módulo móvel que utilizamos durante a coleta de dados.



Figura 2.7 – Câmera rápida FASTCAM 512 PCI 2k em seu módulo móvel.

### 2.3 Local de Observação

O local de observação, no município de São José dos Campos, SP, é a Torre de Antenas do IAE/AEL no CTA, cedida ao INPE-DGE-ELAT para a realização dos experimentos. Com cerca de 20 m de altura e localizada em relevo propício, a torre permite a realização de observações ao longo de quase todos os seus arredores (exceto em um pequeno trecho ocupado por uma floresta de eucaliptos). Para a campanha do verão de 2006/2007, criamos uma “teia” ao redor da torre no software NetRaios (desenvolvido pelo ELAT, exibe dados da BrasilDAT, Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas, em tempo real), onde marcamos pontos facilmente identificáveis

visualmente ao longo do campo acessível por ela. A Figura 2.8 mostra uma fotografia da torre (a) e a “teia” com alguns relâmpagos ocorridos na região de São José dos Campos (b).

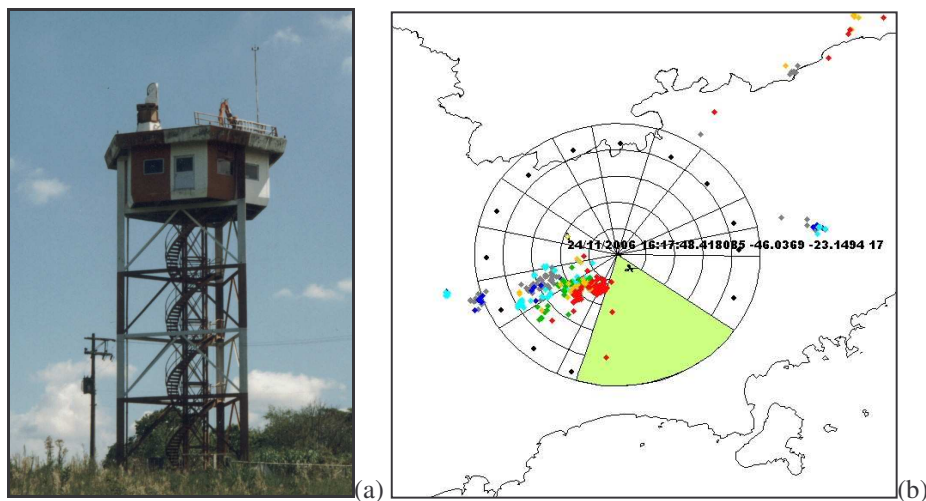


Figura 2.8 – (a) Torre de observação do CTA/IAE/AEL e (b) “teia” colocada no software NetRaios com pontos visualmente conhecidos ao redor da torre.



### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Corrente de Pico da Descarga de Retorno

É conhecido na literatura que as descargas de retorno (DR) seguidas por corrente contínua (CC) longa possuem picos de corrente ( $I_p$ ) relativamente baixos (Brook et al., 1962; Rakov e Uman, 1990). Porém, nenhum estudo quantitativo e com um grande dataset havia sido feito.

Um total de 248 CC negativas e 27 positivas observadas por pelo menos uma das duas câmeras rápidas e detectada pela BrasilDAT foram consideradas para este estudo. A Figura 3.1 mostra um gráfico de corrente de pico da DR ( $I_p$ , dada em kiloampères e fornecida pela BrasilDAT juntamente com sua polaridade) *versus* duração de CC para os 248 casos negativos observados.

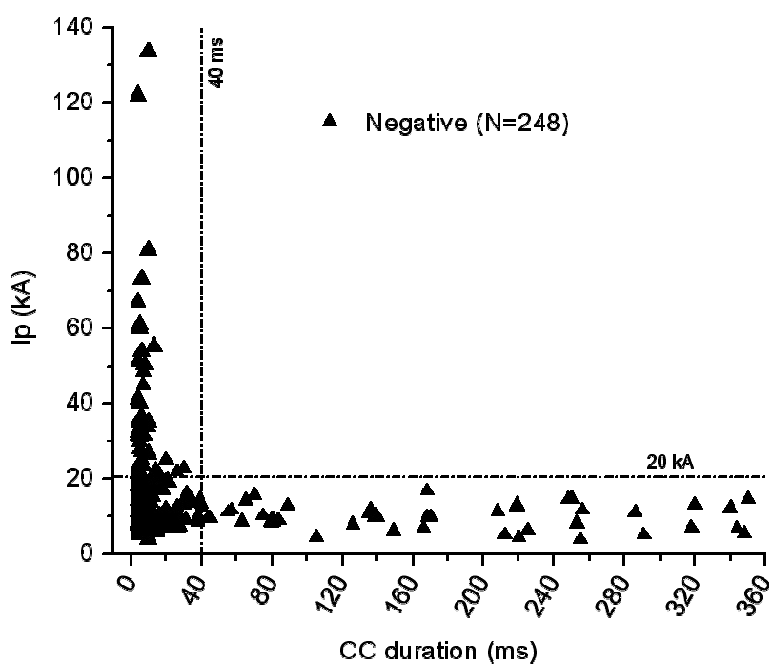


Figura 3.1 – Corrente de pico da DR *versus* duração da CC para relâmpagos negativos (N=248).

Nota-se claramente que existe uma “zona de exclusão” na Figura 3.1, em que CC longa (duração acima de 40 ms) não possui  $I_p$  superior a 20 kA. Este fato explica a baixa eficiência de detecção por parte de redes como a BrasilDAT para correntes contínuas mais longas (Saba et al., 2006).

A Figura 3.2 mostra o mesmo gráfico distinguindo entre DR iniciais ou subseqüentes (a) e mostrando apenas as iniciais (b).

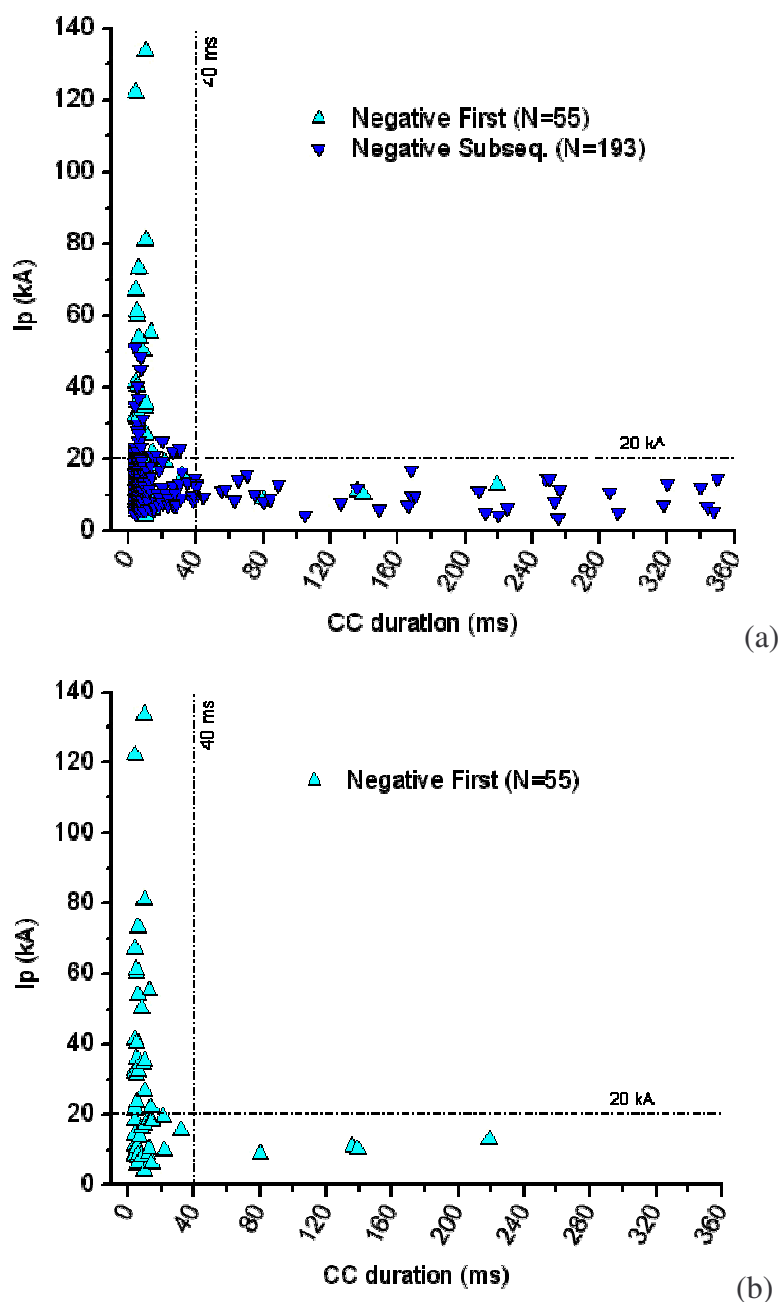


Figura 3.2 – Relação  $I_p$  versus duração de CC comparando descargas iniciais (Negative First, N=55) e subseqüentes (Negative Subseq, N=193) (a) e exibindo apenas dados das iniciais (b).

Mais uma vez, nota-se claramente, pela Figura 3.2, que a “zona de exclusão” também é válida para descargas iniciais.

Estendendo o estudo para relâmpagos positivos, acrescentamos dados de 27 DR positivas seguidas por CC. A Figura 3.3 mostra estes dados juntamente com os negativos.

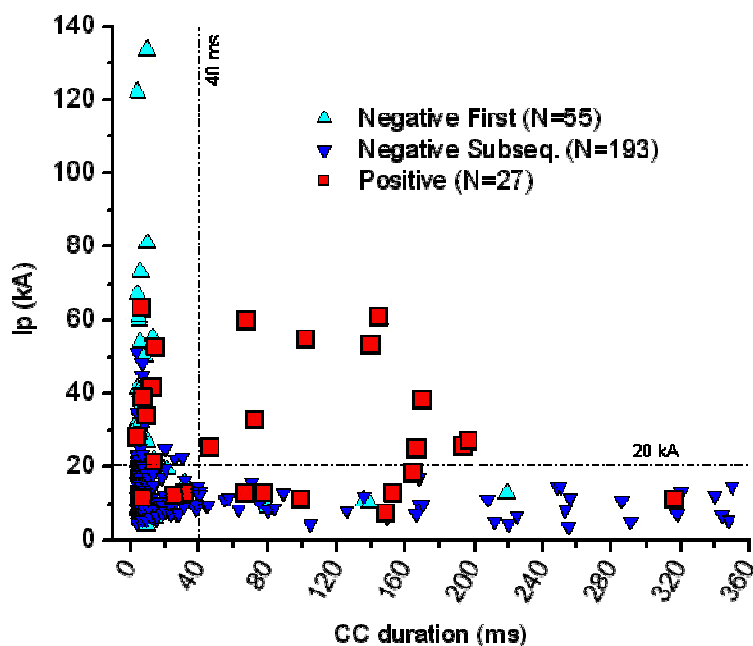


Figura 3.3 – Gráfico de  $I_p$  versus duração de CC comparando positivos (Positive,  $N=27$ ) e negativos iniciais (Negative First,  $N=193$ ) e subsequentes (Negative Subseq.,  $N=55$ ).

É fácil notar na Figura 3.3 que as CC positivas não seguem a Zona de Exclusão observada para negativos. Um total de 10 casos entre 27 localizou-se dentro dela, como, por exemplo, uma CC extremamente longa, com 140 ms de duração, seguindo uma DR intensa com  $I_p = 60$  kA.

Estes resultados indicam, para relâmpagos negativos, uma causa física para a baixa eficiência de detecção para casos com CC longa (baixa corrente de pico da DR), e mostram que estes apresentam apenas uma forma de ameaça, ou seja, ou um pico de corrente elevado ou uma longa corrente contínua, nunca ambos ao mesmo tempo.

Por outro lado, tornou-se claro que as correntes contínuas positivas possuem um comportamento bastante peculiar, não seguindo os mesmos parâmetros observados para

os casos positivos. Isto reforça a necessidade de uma descrição física distinta para estes relâmpagos que, conforme notamos neste trabalho, podem apresentar as duas formas possíveis de ameaça ao mesmo tempo.

### 3.2 Tempo desde a Descarga de Retorno Anterior

Os resultados da seção 3.2 indicaram que relâmpagos com CC longa são menos intensos. Partindo deste conhecimento, pode-se argumentar que (nos casos subsequentes) estes possuem uma dependência maior da ionização remanescente no canal utilizado por descargas que os antecederam para que possam vir a ocorrer. Para verificar esta afirmação, estudamos a relação entre a duração da CC e o tempo transcorrido desde a DR anterior. Um total de 297 CC subsequentes foi utilizado para este estudo, sendo, entre elas, 65 CC longas (duração igual ou superior a 40 ms).

A Figura 3.4 mostra um gráfico do tempo desde a descarga de retorno anterior *versus* duração da corrente contínua.

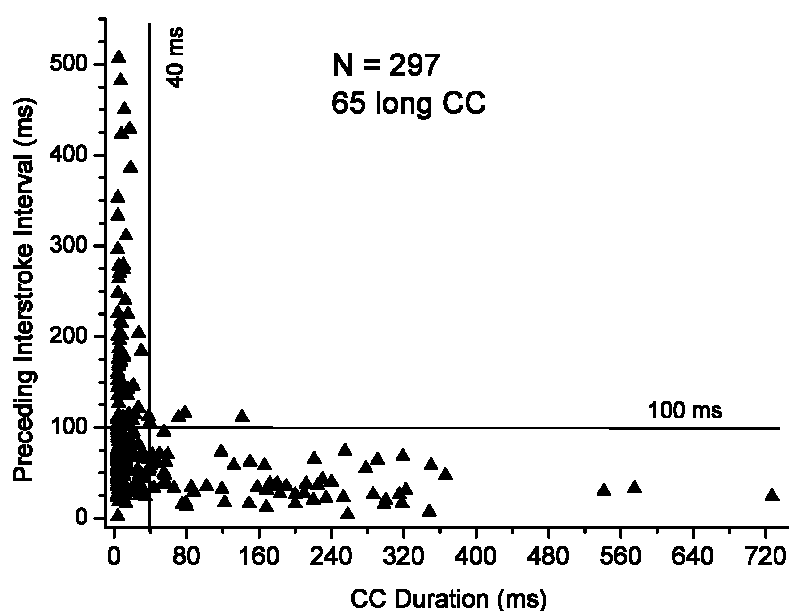


Figura 3.4 – Relação entre tempo desde a DR anterior e a duração da CC.

Mais uma vez notamos uma “zona de exclusão” para estes parâmetros. É extremamente rara (cerca de 1% entre 297 casos) a ocorrência de CC longa (superior a 40 ms) a partir

de 100 ms após a DR anterior. Isto indica uma forte dependência da ionização remanescente no canal já utilizado para que a CC possa ocorrer.

### 3.3 Observação de Componentes-M em Correntes Contínuas Positivas

O projeto realizado no período PIBIC de 2005/2006 abrangia o estudo de componentes-M e “formato” de correntes contínuas negativas. O bolsista publicou os resultados como primeiro autor em um periódico internacional (Campos et al., 2007, anexo a este relatório). Não existe, na literatura, observações de componentes-M em CC positivas anteriores (Rakov, comunicação pessoal, 2006). Aplicamos, então, o método desenvolvido para este trabalho, em que se utiliza um software criado durante o período de bolsa utilizando o IDL (Interactive Data Language) para levantar dados de variação luminisidade no canal do raio a partir dos vídeos obtidos pelas duas câmeras rápidas.

Um total de 22 CC positivas foram analisadas até o momento, com um total de 120 componentes-M observadas. Estatísticas estão sendo preparadas para que, em trabalhos futuros, sejam comparadas com as negativas (Campos et al., 2007). A Figura 3.5 mostra a primeira observação de componentes-M positivas.

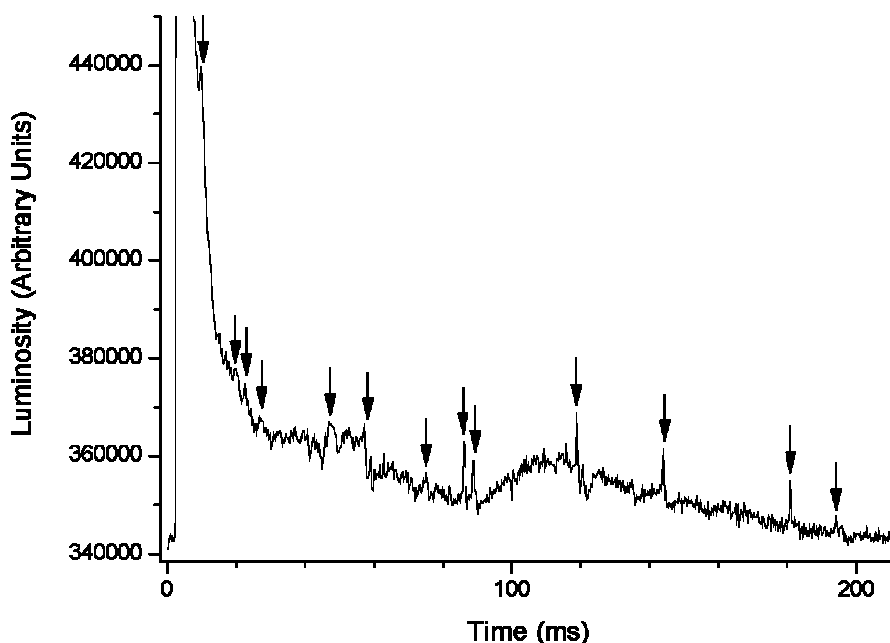


Figura 3.5 – Primeiras componentes-M positivas observadas (setas).

## 4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo sobre a influencia que alguns fatores exercem sobre a ocorrência e características das correntes contínuas de relâmpagos naturais.

Ao estudar a influencia do pico de corrente da descarga de retorno sobre a duração da corrente contínua, pudemos notar concluir que, para relâmpagos negativos, existe uma “zona de exclusão” que faz com que as correntes contínuas longas, com duração superior a 40 ms, só aconteçam após descargas de retorno com pico de corrente inferior a 20 kA. Esta relação independe da ordem da descarga de retorno, valendo tanto para as descargas iniciais quanto subsequentes.

Por outro lado, as correntes contínuas de relâmpagos positivos não seguem essa regra. Um total de 10 entre 27 casos ocorreram dentro da “zona de exclusão” existente para positivos. Um caso extremo, por exemplo, durou 140 ms após uma descarga de retorno com 60 kA de pico de corrente. Este resultado indica não só que os relâmpagos positivos podem apresentar, ao mesmo tempo, as duas formas principais de ameaças (pico de corrente elevado com uma corrente contínua longa), mas também que exigem uma descrição física bastante distinta da dos relâmpagos negativos.

A análise da influência do tempo transcorrido desde a descarga de retorno anterior nos permitiu notar que as correntes contínuas longas (novamente, as que apresentam duração superior a 40 ms) possuem uma forte dependência da ionização remanescente no canal do relâmpago para quem possam ocorrer. Menos de 1% dos casos observados ocorreram mais de 100 ms depois da descarga anterior.

Também foi possível fazer a primeira observação de componentes-M em correntes contínuas positivas que, até então, não haviam sido observadas. O uso do método desenvolvido no período de bolsa de 2005/2006 permitiu a obtenção de gráficos de luminosidade *versus* tempo de correntes contínuas positivas, tornando possível a observação das componentes-M. Pretendemos, em trabalhos futuros, apresentar estatísticas a seu respeito, o que permitirá a comparação com os casos negativos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvin, M. G., Falqueiro, C., Niedu, D. B. The effects of lightning on optical fiber ground wires (OPGW): fields measurements and laboratory simulations. **International Conference on Grounding and Earthing & 3rd Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity**, Rio de Janeiro, Brasil, Nov. 2002.

Ballarotti, M. G. **Estudo de relâmpagos nuvem-solo através de câmera rápida**. Dissertação de Mestrado. São José dos Campos, INPE: 2005.

Ballarotti, M.G., Saba, M.M.F., Pinto Jr., O. A new performance evaluation of the Brazilian Lightning Location System (RINDAT) based on high-speed camera observations of natural negative ground flashes. **19th International Lightning Detection Conference (ILDC)**, Vaisala, Tucson, Arizona, 2006.

Brook, M., Kitagawa, N., Workman, E.J. Quantitative study of strokes and continuing currents in lightning discharges to ground. **J. Geophys. Res.** v. 67, p. 649-663, 1962.

Campos, L.Z.S., Saba, M.M.F., Pinto Jr., O., Ballarotti, M.G. Waveshapes of continuing currents and properties of M-componentes in negative cloud-to-ground lightning from high-speed video observations. **Atmos. Res.** v. 84, p. 302-310, 2007.

Diendorfer, G.; Viehberger, M.; Mair, M.; Schulz, W. An attempt to determine currents in lightning channels branches from optical data of a high speed video system. **International Conference on Lightning and Static Electricity**, Blackpool, Inglaterra, 2003.

Ferraz, E. C.; Pinto Jr, O.; Saba, M. M. F. ELF / VLF lightning network to monitor charge distribution and continuing current. **International Conference on Grounding and Earthing 2004 and 1<sup>st</sup> International Conference on Lightning Physics and Effects**, Belo Horizonte, Brasil, 2004.

Fisher, R. J.; Schnetzer, G. H.; Thottappillil, R.; Rakov, V. A.; Uman, M. A.; Goldberg, J. D. Parameters of triggered-lightning flashes in Florida and Alabama. **J. Geophys. Res.**, v. 98, n. D12, p. 22887-22902, 1993.

Kitagawa, N.; Brook, M.; Workman, E. J. Continuing current in cloud-to-ground lightning discharges. **J. Geophys. Res.** v.67, p. 637-647, 1962.

Lutgens, F. K.; Tarbuck, J. E. **The atmosphere: an introduction to meteorology**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1982, 434 p., ISBN 0137429746.

Pinto Jr., O, 2003. The Brazilian Lightning Detection Network: a historical background and future perspectives. **VII international symposium on lightning protection**. Inst. de Electrotéc. e Energia, Univ. de São Paulo, Curitiba, Brazil, 2003.

Pinto Jr, O.; Pinto, I. R. C. A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000, 172 p..

Rakov, V.A., Uman, M.A. Long continuing current in negative lightning ground flashes. **J. Geophys. Res.** V. 95, 5455–5470, 1990.

Rakov, V.A., Uman, M.A. **Lightning: physics and effects**. Cambridge Univ. Press, New York. 2003, 687 pp.

Rakov, V. A.; Uman, M. A.; Rambo, K. J.; Fernandez, M. I.; Fisher, R. J.; Schnetzer, G. H.; Thottappillil, R.; Eyebert-Berard, A.; Berlandis, J. P.; Lalande, P.; Bonamy, A.; Laroche, P.; Boundiou-Clergerie, A. New insights into lightning processes gained from triggered-lightning experiments in Florida and Alabama. **J. Geophys Res.**; v. 103, p. 14117-14130, 1998.

RedLake. **Instructions for Operating the MotionScope® PCI High Speed Digital Imaging System**. Manual No. 9400–0010 Revision S, 2002.

Saba, M. M. F. **Estudo de condutividade, campo elétrico e relâmpagos associados a nuvens de tempestade**. Tese de doutorado. São José dos Campos: INPE, 1997.

Saba, M.M.F., Ballarotti, M.G., Pinto Jr., O., Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. **J. Geophys. Res.** v. 111, D03101. doi:10.1029/2005JD006415, 2005.

Thottappillil, R. Electromagnetic Pulse Environment of Cloud-to-Ground Lightning for EMC Studies. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, vol. 44, n. 1, 2002.

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. of Geophys. Res.** vol. 100, n.12, p. 25711-25720, 1995.

Thottappillil, R.; Rakov, V. A.; Uman, M. A. K and M changes in close lightning Ground Flashes in Florida. **J. of Geophys. Res.** vol. 95, n. D11, p. 18631-18640, Oct. 1990.

Uman, M. A. **Lightning**. New York: Dover, 1984, 320 p.

Uman, M. A.; Krider, E. P. Natural and artificially initiated lightning. **Science**: p.457-464, vol. 246, 1989.

Wiesinger, J. Test procedure for the simulation of lightning current effects on overhead ground wire of high voltage transmission line with integral optical fibers. **International Conference on Lightning Protection (23<sup>rd</sup>-ICLP)**, Florença, Itália, 1996.



Wood, R. A. **When lightning strikes!** *Weatherwise*, vol. 41, n. 4, p. 206-210, 1988.

**ANEXO A – ARTIGO ATMOSPHERIC RESEARCH**

**PIBIC 2005/2006**

# Waveshapes of continuing currents and properties of M-components in natural negative cloud-to-ground lightning from high-speed video observations

Leandro Z.S. Campos, Marcelo M.F. Saba\*, Osmar Pinto Jr., Maurício G. Ballarotti

*National Institute for Space Research — INPE, Av. dos Astronautas, 1758, S. José dos Campos, SP, P.O. Box 515–12201–970, Brazil*

Received 19 May 2005; received in revised form 14 September 2006; accepted 14 September 2006

---

## Abstract

Continuing current is a continuous mode of charge transfer to ground in a lightning flash. The extent to which the continuing current contributes to the total negative charge lowered to earth is large. In order to study the waveshape of the continuing currents of natural flashes, we developed a computational algorithm that analyzes the pixels of the images obtained by a high-speed camera and plots luminosity-versus-time. Tower measurements have shown that during the continuing current phase of the flash the luminosity of the channel is directly proportional to the current that flows through it. Using this information it was possible to infer the continuing current waveshape for 63 natural discharges and classify them into six different types. Statistics on some characteristics of 345 M-components (that occurred during the same 63 events) are also presented. As far as we know, this is the first study on waveshapes of continuing currents for natural lightning.

© 2006 Elsevier B.V. All rights reserved.

*Keywords:* Continuing current; Waveshape; M-component; Lightning; High-speed video

---

## 1. Introduction and review

As described by previous works (Rakov et al., 2001; Rakov and Uman, 2003), there are three possible modes of charge transfer to ground associated with the strokes in negative lightning discharges: the return stroke, the continuing current (CC) and the M-component. As the last

two modes are the subject of this study, a brief description of them is presented.

### 1.1. Continuing current

Kitagawa et al. (1962) and Brook et al. (1962) defined “long” continuing current (CC) as indicated by a steady electric field change with a duration in excess of 40 ms. Shindo and Uman (1989) defined “short” CC as indicated by a similar field change with a duration between 10 ms and 40 ms, and “questionable” lasting 1 to 10 ms. Ballarotti et al. (2005), based on data from a high-speed video system, and avoiding contamination from what could just be return stroke pulse tails, introduced the term “very-short” defining continuing currents with a

---

\* Corresponding author. Av. dos Astronautas, 1758-P.O. Box 515–12201–970, S. José dos Campos, SP, Brazil. Tel.: +55 12 3945 6768; fax: +55 12 3945 6810.

E-mail addresses: leandro.zanella@gmail.com (L.Z.S. Campos), msaba@dge.inpe.br (M.M.F. Saba), osmar@dge.inpe.br (O. Pinto), mgballa@dge.inpe.br (M.G. Ballarotti).

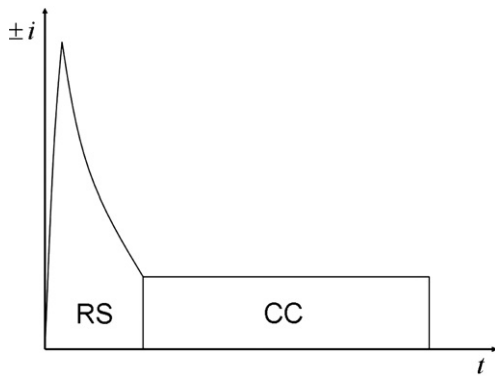


Fig. 1. The continuing current rectangular waveshape used in protection standards (RS indicates the return stroke and CC the continuing current).

duration less than or equal to 10 ms but greater than 3 ms. According to Ballarotti et al. (2005), 28% of the strokes in a flash, including single stroke flashes, are followed by some kind of continuing current (long, short or very short). Continuing currents are responsible for most serious lightning damage associated with thermal effects, such as burned-through ground wires and optical fiber ground wires (OPGW) of overhead power lines, blowing fuses used to protect distribution transformers, holes in the metal skins of aircraft, etc (Chisholm et al., 2001; Fisher and Plummer, 1977; Rakov and Uman, 1990).

The value of the current is usually estimated to be 100 A, with a range from 30 to 200 A and the charge transfer is typically between 10 and 20 C (Brook et al., 1962; Williams and Brook, 1963; Shindo and Uman, 1989). These parameters (commonly reported and used in lightning protection applications) are calculated assuming that continuing currents have a constant current value with time. Fig. 1 illustrates the rectangular shape of the continuing current used in the standards for protection application (IEC, 2006). As far as we know, Fisher et al. (1993) is the only study on the waveshapes of continuing currents, which is based on direct measurements from triggered

lightning. They analyzed 30 continuing currents having durations exceeding 10 ms and found that they exhibit a variety of waveshapes that were grouped into four categories.

In the present study a similar analysis is done, for the first time, for natural lightning continuing currents. This study is based on the video observation of the channel luminosity variation with time in a millisecond scale.

### 1.2. M-components

The M-component, first described by Malan and Collens (1937) is observed as an increase in luminosity of the channel during the occurrence of a continuing current event. The intensity of the light pulses as a function of time is more or less symmetrical. The increase in luminosity is associated with current pulses with amplitudes of typically some hundreds of amperes and rise times of some hundreds of microseconds as observed from triggered lightning measurements (Thottappillil et al., 1995). They are distinctly different from return stroke current pulses, which occur only after the cessation of any preceding current through the channel base and which typically exhibit submicrosecond rise times (Fisher et al., 1993). M-components may have current peaks in the kiloampere range (one magnitude order greater than the usual values), making them sometimes comparable to current peaks of smaller return strokes. They typically produce a charge transfer to ground of 0.1–0.2 C, one order of magnitude smaller than that of a subsequent return-stroke pulse (Rakov and Uman, 2003). Most of these parameters were obtained for rocket-triggered or tower-initiated lightning. For natural flashes, few statistics on the characteristics of M-components were made and, most of them were based on the electric field changes technique, which limits the observation to very close range ground flashes. Table 1 summarizes previous recent work on these two subjects (Thottappillil et al., 1990, 1995; Rakov et al., 1992; Fisher et al., 1993) in comparison to the present study.

In the present study, a statistical distribution of M-component characteristics is made for a larger number of

Table 1  
Review of continuing currents (CC) and M-components recent studies

Work (triggered or natural lightning)	Analyses		# of CC	# of M	Observation method	Distance range (km)
	CC waveshape	M-components				
Thottappillil et al., 1990(natural)		X	–	88	Electric field change	2.5 to 12
Rakov et al., 1992(natural)		X	–	118	Electric field change	2.5 to 27
Thottappillil et al., 1995(triggered)		X	–	158	Channel base current	–
Fisher et al., 1993(triggered)	X		30	–	Channel base current	–
Present study (natural)	X	X	63	345	High-speed video	2 to 53

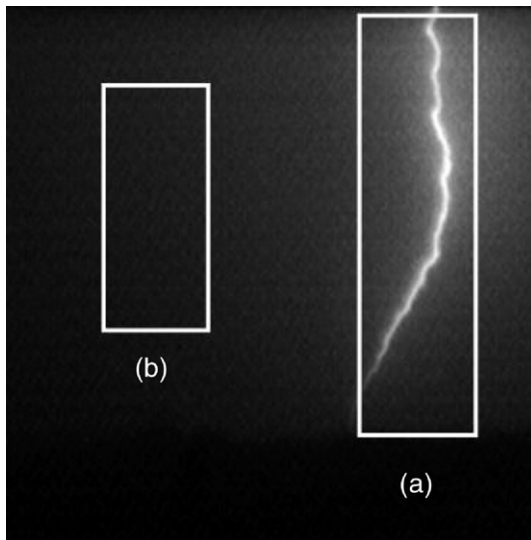


Fig. 2. Example of the (a) flash area and the (b) calibration area.

natural ground flashes occurring up to 50 km from the observer. It is based on the variation of the channel luminosity with time on a millisecond scale.

## 2. Data collection techniques

From more than 400 negative CG flashes recorded with a high-speed camera during the summers of 2003 to 2005, a total of 63 events of long continuing currents (CC) were selected. The flashes containing these CC occurred in the Paraíba Valley region, and the observing sites used during the data acquisition were located at São José dos Campos (23.212° S; 45.867° W, altitude: 635 m)

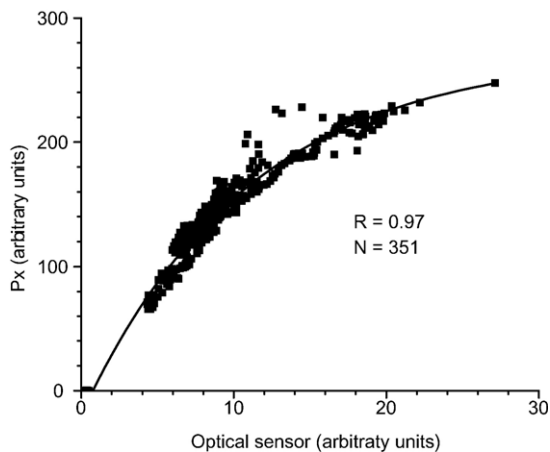


Fig. 3. Px (average of pixel values) versus optical sensor data for a triggered flash initial continuous current.

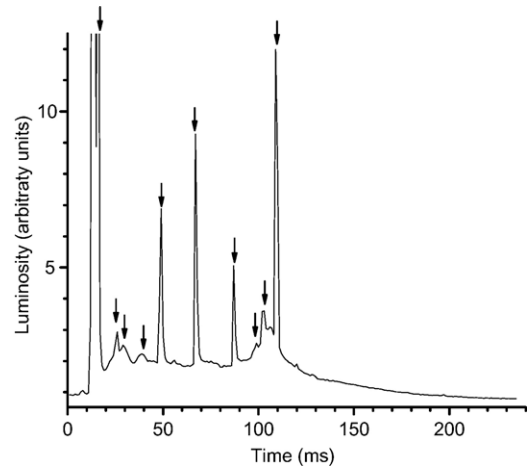


Fig. 4. Example of continuing current with M-components superimposed. The M-components are indicated by arrows.

and at Cachoeira Paulista (22.686° S; 44.984° W; altitude: 625 m). Both sites are located in a region that is well covered by the Brazilian lightning locating system — RINDAT (Pinto, 2003; Saba et al., 2006).

Video recordings were made with a Red Lake 8000S Motion Scope high-speed camera. The frame rate used was 1000 frames per second. Each sequence of images can be stored in a computer file, retrieved and replayed at various speeds to analyze the CC in detail.

The video frames of the high-speed camera were GPS time-stamped to an accuracy of one millisecond. This synchronization allowed the correlation of each flash recorded with those detected by the lightning locating system. Detection efficiency of the network in the region was near 90% for flashes and near 50% for strokes (Ballarotti et al., 2006). Contrary to most of the similar studies that used event-to-thunder time intervals to find the distances to flashes, this study identified most of the distances using the solutions given by the network. It was also possible to read the polarity and other parameters in the solutions.

### 2.1. Video analysis

In order to identify the M-components and to trace the waveshape of the continuing current events a computational algorithm was developed to analyze pixels of the images obtained by the high-speed camera. Graphs showing luminosity versus time were then generated.

Diendorfer et al. (2003) analyzed the brightness and the current of the initial continuous current in upward initiated flashes to the Gaisberg tower. They used a high-speed video system to measure the brightness of the channel from distances of a few hundred of meters from

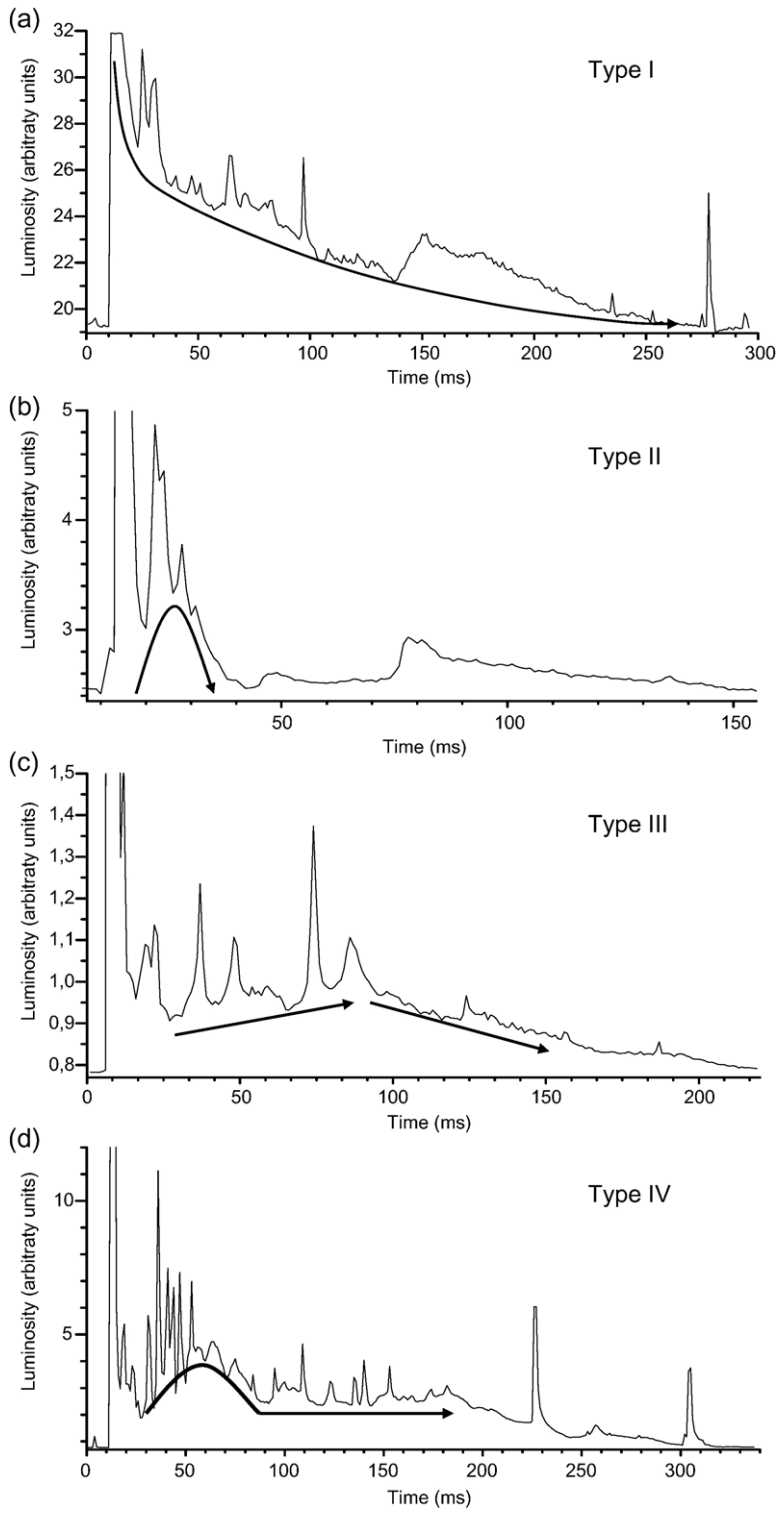


Fig. 5. Examples of continuing current waveshapes of (a) Type I, (b) Type II, (c) Type III, (d) Type IV, (e) Type V and (f) Type VI. The arrows indicate the main characteristic of the waveshapes.

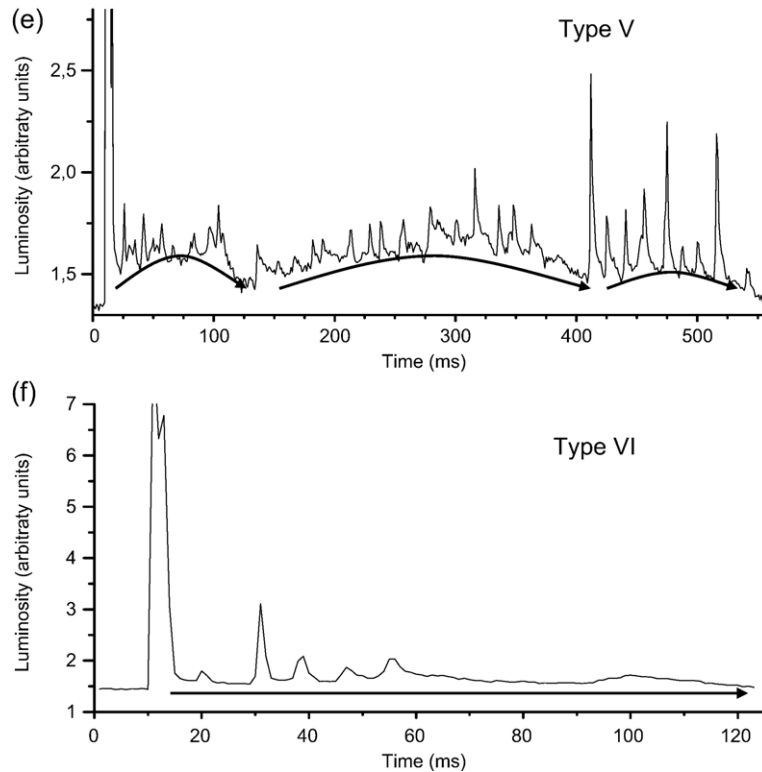


Fig. 5 (continued).

the discharge and made direct current measurements at the point of impact. They found an excellent linear correlation ( $r^2=0.96$ ) between brightness and current in the range of 10 to 250 A. Based on the fact that continuing current values in CG flashes are usually in this range, we assumed that the variations observed in the brightness of the channel are proportional to variations in the current that flows along the channel. Concerning the M-components, due to the fact that they may reach peak current values above this range, we did not try to estimate their intensities in this study but only occurrence related statistics.

The events analyzed in this work occurred from a few kilometers to tens of kilometers from the camera. Each video was saved as a .tif file sequence and analyzed by the mentioned computational algorithm developed with the software IDL™ (Interactive Data Language). For each video frame, we calculated the arithmetic average of the pixels in the flash region area (Fig. 2a) and in a user defined calibration area (Fig. 2b). In this calculation we excluded the saturated pixels. A subtraction between these averages was made in an attempt to remove the influence of background luminosity produced by, for example, intracloud discharges that could occur close to the channel region of the considered flash.

A relationship between the luminosity and the pixel values (0–255) from the camera was given in the manufacturer's manual (Red Lake, 2002). This relationship was tested for the initial continuous current of a triggered lightning recorded with our camera and an independent luminosity optical sensor at the International Center for Triggered and Natural Lightning Research — CIPRIN, located at Cachoeira Paulista (22.686° S; 44.984° W; altitude: 625 m) (Saba et al., 2005). The relation between the two data sets is shown in Fig. 3 and we can observe that it does follow an exponential decay

Table 2  
Statistics on continuing current waveshape types compared to Fisher et al., 1993

Type	Description	Fisher et al., 1993	Present study
I	More or less exponential decay	47% (14)	24% (15)
II	Hump followed by a gradual decay	36% (11)	6% (4)
III	Gradual increase and decrease	10% (3)	16% (10)
IV	Hump followed by a long-lasting steady plateau	7% (2)	8% (5)
V	Two or more humps	–	11% (7)
VI	Low intensity plateau	–	35% (22)
Total		100% (30)	100% (63)

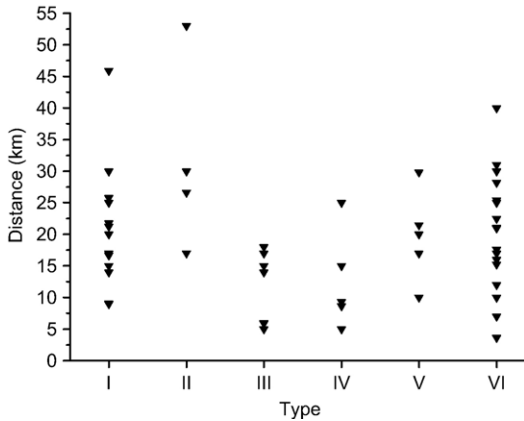


Fig. 6. Stroke distances for each Type.

(correlation coefficient: 0.97) as predicted by the manufacturer. Using the equation of the exponential fit (Eq. (1)), the luminosity was recovered from an arithmetic mean of the pixel values (Px) for each millisecond interval image of the channel.

$$L = -11 \cdot \ln\left(\frac{271 - Px}{291}\right) \quad (1)$$

Where  $L$  is the luminosity and  $Px$  is the arithmetic average of the pixel values obtained with the camera (both in arbitrary units).

### 3. Analysis and results

#### 3.1. Continuing current waveshape

After applying the method described in Section 2 for 63 events of continuing current, we were able to identify the four types mentioned by Fisher et al., 1993 (I to IV), and two other new types (V and VI). A total of 345 M-components were detected superimposed on the waveshapes of the continuing currents. Having in mind the definition of an M-component, every increase in luminosity shown in the generated graphs was visually inspected through the source videos to better discriminate M-components from spurious fluctuations. An example of a continuing current waveshape and M-components is shown in Fig. 4.

Typical examples of continuing current waveshapes that follow return strokes are presented in Fig. 5 and described in Table 2, where our statistics are compared to Fisher et al. (1993). All types of waveshapes for natural flash continuing currents have M-components superimposed throughout the whole duration. Contrary to our observations, Fisher et al. (1993) did not observe M-

components during periods of waveshape Types II and IV. Also, the most frequent waveshape was not Type I but Type VI, which was not observed by Fisher et al. (1993). One could argue that the occurrence of each Type may be influenced by the distance from the camera to the stroke event (for example, a very distant case could be mistakenly considered as Type VI due to the very low intensity of its luminosity). On the contrary, it is possible to notice from Fig. 6 that nearly all events occurred at distances smaller than 35 km (only 3 exceptions in 63) and that there is no substantial difference between the distance distributions for each Type.

#### 3.2. M-component

345 M-components were identified during the continuing current phases of 63 negative flashes. Due to the 1-ms resolution of the videos, the minimum interval distinguishable between two consecutive M-components was 2 ms. As the exposure time of each frame is also 1 ms, even when an M-component lasts less than 1 ms, it is detected as a 1-ms duration M-component. Even if the statistics for triggered lightning is valid for natural lightning, we believe that these two measurement technique limitations of this study are not substantial because, according to studies done for triggered lightning by Thottappillil et al. (1995), 75% of the intervals between M-components is greater than 2 ms and about 80% of the M-components durations last longer than 1 ms.

Fig. 7 shows the criteria used in the determination of the M-component properties, where  $\Delta t_{RM}$  is the M

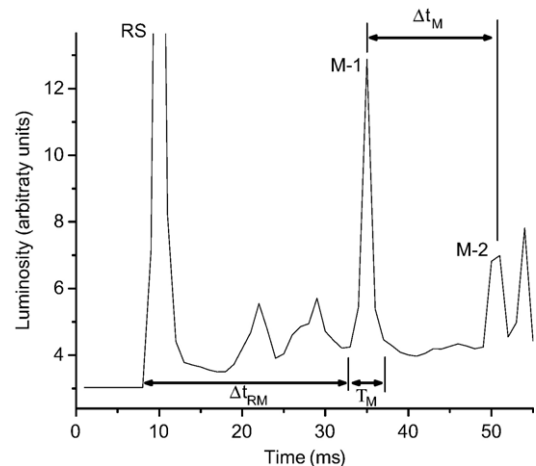


Fig. 7. Example of the criteria used in the determination of M-components properties. RS indicates the return stroke and M-1 and M-2 two M-components.  $\Delta t_M$  is interval between M-1 and M-2,  $\Delta t_{RM}$  is the M elapsed time and  $T_M$  is the M duration for M-1.



Table 3  
Summary on M-components statistics

Parameter	This work			Thottappillil et al., 1995		
	Sample size	GM	SDlog <sub>10</sub>	Sample size	GM	SDlog <sub>10</sub>
M elapsed time, $\Delta t_{RM}$ , ms	345	42	0.55	158	9.1	0.73
M interval, $\Delta t_M$ , ms	289	11	0.43	107	4.9	0.47
M duration, $T_M$ , ms	345	4.8	0.23	114	2.1	0.37

GM is the geometric mean value and SDlog<sub>10</sub> is the standard deviation of the logarithms of the parameters.

elapsed time from the stroke,  $T_M$  is the M duration and  $\Delta t_M$  is the interval between consecutive M-components. Table 3 summarizes our statistical data about M-component parameters compared to those presented by Thottappillil et al. (1995).

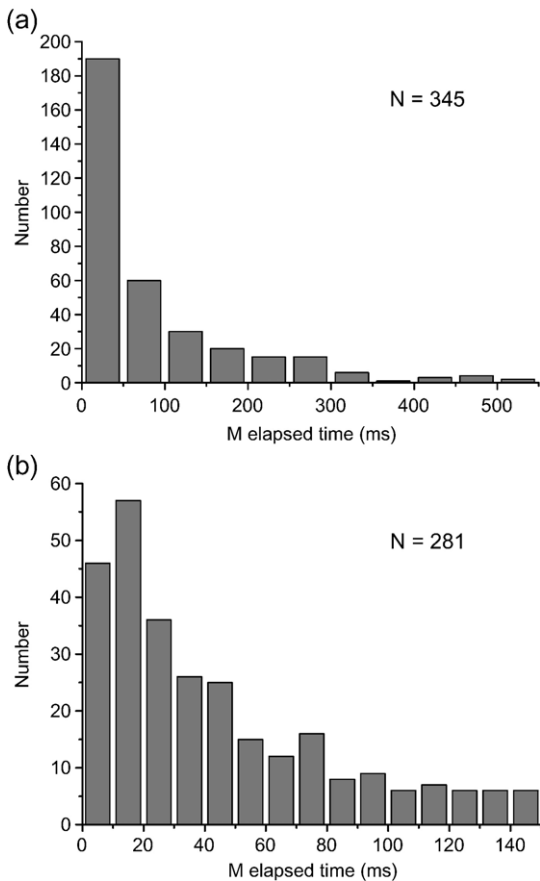


Fig. 8. Distribution of (a) all cases of M elapsed time and (b) only cases lasting less than 150 ms (more than 80% of the total amount).

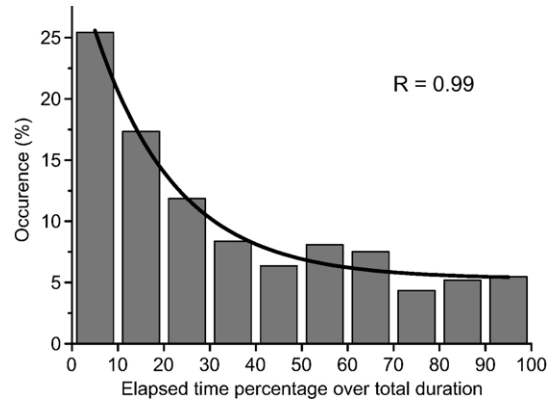


Fig. 9. Occurrence of M-components elapsed time percentage over total CC duration. The exponential fit and the correlation coefficient are also shown.

### 3.2.1. M-component elapsed time

The distribution of all M-component elapsed times is shown in Fig. 8a. More than 80% of the cases were less than 150 ms, and their distribution is shown in detail in

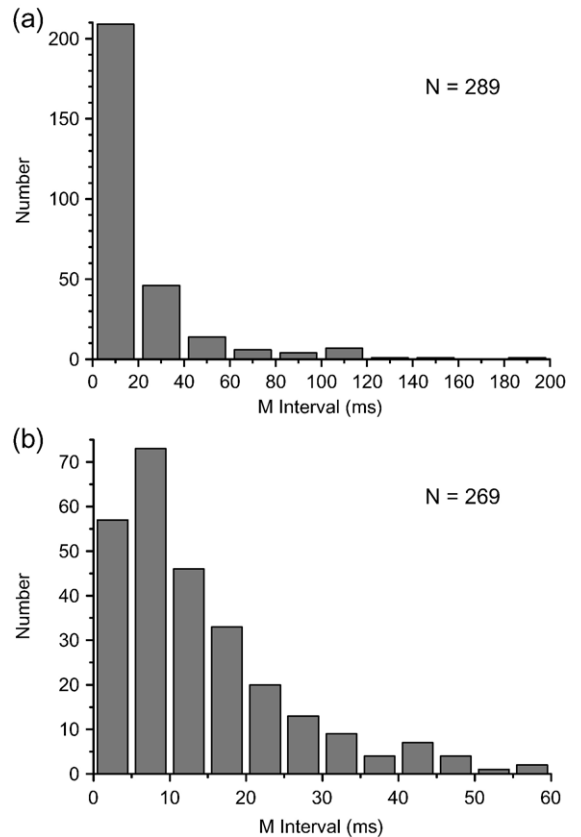


Fig. 10. (a) Distribution of all M intervals and (b) intervals less than 60 ms (more than 90% of the total amount of cases).

Fig. 8b. The most frequent values occurred between 10 and 20 ms (57 cases in 281).

We have normalized the M elapsed time absolute values in terms of percentage over the total duration of the CC, as shown in Fig. 9. These data were never presented in the literature before. Nearly 25% of M-components occur in the first 10% of the duration of the CC, and more than 75% occur in the first half of the CC. The occurrence follows an exponential decay with the time of the continuing current (correlation coefficient: 0.99).

Our geometric mean for M-component elapsed time was 42 ms (Table 3), very different from the value presented by Thottappillil et al. (1995), who found 9.1 ms for triggered flashes. A possible explanation for this discrepancy is that although we could not see elapsed times lower than 2 ms, we recorded some very long CC. The maximum value of elapsed time was 538 ms while the maximum value of the elapsed time found by Thottappillil et al. (1995) was lower than 256 ms.

### 3.2.2. Time interval between successive M-components

The distribution of the 289 time intervals between successive M-components is shown in Fig. 10a. More than 90% of the intervals are shorter than 60 ms (distribution in detail shown in Fig. 10b), in agreement with the range obtained by Thottappillil et al. (1995), (intervals less than 64 ms). Note that as the camera integrates the luminosity over 1 ms for each 1-ms duration frame, even M-components lasting less than 1 ms were detected and considered in the statistics. However, due to the temporal resolution of the camera, two successive M-components with a time interval less than 2 ms would look like a single one. This may explain the difference in the geometric mean values (Table 3).

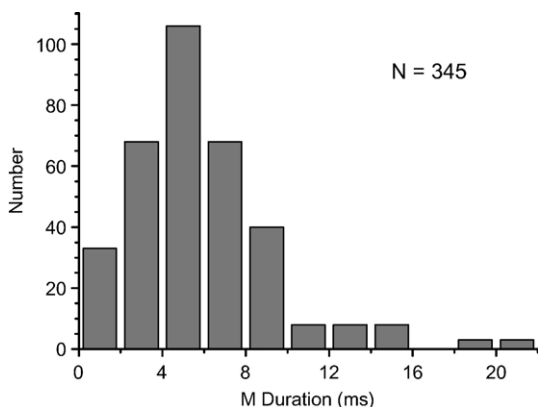


Fig. 11. Distribution of M-components duration.

### 3.2.3. M-component duration

Fig. 11 shows the distribution of the duration of 345 M-components identified. More than 90% of the cases lasted less than 10 ms. There is a peak of occurrence between 4 and 6 ms (about 30%) and an extreme case lasting 21 ms, longer than the maximum range of 16 ms shown in the distribution presented by Thottappillil et al. (1995) for triggered lightning. Due to the temporal resolution of the camera it was not possible to determine with good precision the exact duration of M-components lasting less than 2 ms, although they could be observed and considered in the statistics as M-components with 2-ms duration (see Section 3.2). These 2-ms or shorter Ms represent 50% of the cases in triggered lightning according to Thottappillil et al. (1995) but we have found only 10% of the cases within this range, suggesting that natural Ms tend to be longer.

## 4. Summary

In this paper we presented a new method to study continuing currents and M-components of natural negative cloud-to-ground lightning. Using a high-speed camera some statistics were obtained on continuing current waveshapes, M-component elapsed time, duration and time interval.

In comparison to Fisher et al. (1993) the occurrence of CC waveshape types in natural lightning is very distinctive from triggered flashes. It was necessary to introduce two other types (Type V and Type VI) and the most frequent type was not Type I, as presented in their work, but Type VI, that was not observed in triggered lightning. This is the second work on CC waveshapes and the first one presenting statistics on this topic for natural flashes.

The study of M-component elapsed time since return stroke was presented in an alternative way, showing their occurrence in terms of percentage over the total CC duration. Nearly 25% of M-components occur in the first 10% of the duration of the CC, and more than 75% occur in the first half of the CC. 90% of the time interval between M-components lasts less than 60 ms. The duration of M-components in natural lightning tends to be longer than those in triggered lightning.

## Acknowledgments

We would like to thank Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) and Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) for supporting the research through the

projects 475299/2003–5 and 99/09165–3 respectively. The authors also thank Francisco G. Cardoso for his support, and the first author also would like to thank CNPq for the scholarship 102356/2005–9.

## References

- Ballarotti, M.G., Saba, M.M.F., Pinto Jr., O., 2005. High-speed camera observations of negative ground flashes on a millisecond-scale. *Geophys. Res. Lett.* 32, L23802. doi:10.1029/2005GL023889.
- Ballarotti, M.G., Saba, M.M.F., Pinto Jr., O., 2006. A new performance evaluation of the Brazilian Lightning Location System (RINDAT) based on high-speed camera observations of natural negative ground flashes. Paper Presented at the 19th International Lightning Detection Conference (ILDC), Vaisala, Tucson, Arizona.
- Brook, M., Kitagawa, N., Workman, E.J., 1962. Quantitative study of strokes and continuing currents in lightning discharges to ground. *J. Geophys. Res.* 67, 649–659.
- Chisholm, W.A., Levine, J.P., Chowdhuri, P., 2001. Lightning arc damage to optical fiber ground wires (OPGW): parameters and test methods. 2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings, vol. 1, pp. 88–93. Vancouver, BC, Canada, 15–19 July 2001.
- Diendorfer, G., Viehberger, M., Mair, M., Schulz, W., 2003. An attempt to determine currents in lightning channels branches from optical data of a high speed video system. International Conference on Lightning and Static Electricity. Blackpool, United Kingdom, Feb. 2003.
- Fisher, F.A., Plumer, J.A., 1977. Lightning Protection of Aircraft, NASA Ref. Publ., NASA-RP-1008.
- Fisher, R.J., Schnetzer, G.H., Thottappillil, R., Rakov, V.A., Uman, M.A., Goldberg, J.D., 1993. Parameters of triggered-lightning flashes in Florida and Alabama. *J. Geophys. Res.* 98, 22887–22908.
- Protection Against Lightning, Part 1: General Principles. IEC 62305–1.
- Kitagawa, N., Brook, M., Workman, E.J., 1962. Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges. *J. Geophys. Res.* 67, 637–647.
- Malan, D.J., Collens, H., 1937. Progressive lightning, III, the fine structure of return lightning strokes. *Proc. R. Soc. Lond., A, Math. Phys. Sci.* 162, 175–203.
- Pinto Jr., O., 2003. The Brazilian Lightning Detection Network: a historical background and future perspectives, paper presented at VII international symposium on lightning protection. Inst. de Electrotéc. e Energia, Univ. de São Paulo, Curitiba, Brazil, 17 – 21 Nov. 2003.
- Rakov, V.A., Uman, M.A., 1990. Long continuing current in negative lightning ground flashes. *J. Geophys. Res.* 95, 5455–5470.
- Rakov, V.A., Uman, M.A., 2003. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge Univ. Press, New York. 687 pp.
- Rakov, V.A., Thottappillil, R., Uman, M.A., 1992. Electric field pulses in K and M changes of lightning ground flashes. *J. Geophys. Res.* 97, 9935–9950.
- Rakov, V.A., Crawford, D.E., Rambo, K.J., Schnetzer, G.H., Uman, M.A., Thottappillil, R., 2001. M-component mode of charge transfer to ground in lightning discharges. *J. Geophys. Res.* 106, 22817–22831.
- Instructions for Operating the MotionScope<sup>®</sup> PCI High Speed Digital Imaging System. Manual No. 9400–0010 Revision S.
- Saba, M.M.F., Pinto Jr., O., Solórzano, N.N., Eyebert-Berard, A., 2005. Lightning current observation of an altitude-triggered lightning flash. *Atmos. Res.* 76, 402–411.
- Saba, M.M.F., Ballarotti, M.G., Pinto Jr., O., 2006. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. *J. Geophys. Res.* 111, D03101. doi:10.1029/2005JD006415.
- Shindo, T., Uman, M.A., 1989. Continuing current in negative cloud-to-ground lightning. *J. Geophys. Res.* 94, 5189–5198.
- Thottappillil, R., Rakov, V.A., Uman, M.A., 1990. K and M changes in close lightning ground flashes in Florida. *J. Geophys. Res.* 95, 18631–18640.
- Thottappillil, R., Goldberg, J.D., Rakov, V.A., Uman, M.A., Fisher, R.J., Schnetzer, G.H., 1995. Properties of M components from currents measured at triggered lightning channel base. *J. Geophys. Res.* 100, 25711–25720.
- Williams, D.P., Brook, M., 1963. Magnetic measurements of thunderstorms currents, 1, continuing currents in lightning. *J. Geophys. Res.* 68, 3243–3247.