



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

## **PRESENÇA DE CORRENTE CONTÍNUA EM RAIOS NEGATIVOS E POSITIVOS.**

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

Luciana Polanowski Correia (UNITAU, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [luciana.polanowski@hotmail.com](mailto:luciana.polanowski@hotmail.com)

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

#### **COLABORADORES**

Antônio C. V. Saraiva (ELAT/DGE/INPE)

Dr. Osmar Pinto Jr. (ELAT/DGE/INPE)

Leandro Zanella de Souza Campos (FEG/UNESP, Bolsista PIBIC/CNPq)

Julho de 2009

## SUMÁRIO

|   | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                                  | <b>1</b>    |
| 1.1 Histórico.....  | 1           |
| 1.2 Definição, Tipos de Relâmpagos e Características..... | 2           |
| 1.3 Motivação e Justificativa.....                        | 9           |
| 1.4 Objetivos do Trabalho.....                            | 9           |
| <b>2 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS.....</b>              | <b>10</b>   |
| 2.1 Lista de Materiais Utilizados.....                    | 10          |
| 2.2 Instrumentação Observacional.....                     | 10          |
| 2.3 Locais de Observação.....                             | 16          |
| <b>3 RESULTADOS.....</b>                                  | <b>20</b>   |
| 3.1 Descargas seguidas de CC.....                         | 20          |
| 3.2 Relâmpagos com CC longa.....                          | 22          |
| 3.3 Variações da CC em diferentes tempestades.....        | 23          |
| 3.4 Comparações entre as câmeras rápidas.....             | 24          |
| 3.5 Relâmpagos positivos.....                             | 25          |
| <b>4 CONCLUSÃO.....</b>                                   | <b>27</b>   |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                    | <b>28</b>   |
| <b>ANEXO A –.....</b>                                     | <b>31</b>   |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 - Foto de relâmpago ocorrido em São José dos Campos .....   | 2  |
| Figura 1.2 – Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.....   | 6  |
| 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, 2006a), sendo estes indicados por um asterisco.....  | 7  |
| Figura 2.1 – Fotografia da câmera <i>8000S MotionScope</i> com sua placa de <i>interface</i> com o PC. ....  | 11 |
| 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). ....  | 13 |
| 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. .... | 14 |
| Figura 2.4 – Transmissão da lâmina de vidro substituída na câmera. ....  | 14 |
| Figura 2.5 – Imagens do líder escalonado com o filtro (a) e sem o filtro infravermelho (b). ....   | 15 |
| 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).....  | 15 |
| Figura 2.7 – Câmera rápida FASTCAM 512 PCI 2k em seu módulo móvel utilizado na campanha brasileira. ....   | 16 |
| 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. ....   | 17 |
| Figura 2.9 – Módulo móvel da FASTCAM 512 PCI 2k utilizado durante a campanha no verão norte-americano em Tucson, Arizona.....  | 18 |
| Figura 2.10 - Vista da janela em Uruguaiiana aonde foram filmados alguns raios da campanha 2006/2007.....  | 19 |
| Figura 3.1 – a) Porcentagem de descargas com CC e sem CC, b) Distribuição da corrente continua entre as descargas negativas. ....  | 20 |
| Figura 3.2 Distribuição da corrente continua para cada ordem das descargas.....  | 21 |
| Figura 3.3 – Porcentagem de algum tipo de corrente continua em diferente ordem de descargas, e porcentagem de descargas sem corrente continua respectivamente... ..  | 22 |
| Figura 3.4 - Porcentagem de relâmpago com corrente continua longa. <b>Erro! Indicador não definido.</b>  |    |
| Figura 3.5 – Distribuição da ocorrência de corrente continua longa no relâmpago.....   | 23 |
| Figura 3.6- – Porcentagem de relâmpagos com corrente continua longa em diferentes tempestades.....   | 24 |
| Figura 3.7 – Comparação entre câmeras rápidas. ....  | 25 |
| Figura 3.8- Porcentagem de relâmpagos com algum tipo de CC. ....   | 26 |
| Figura 3.9- Porcentagem de descargas com algum tipo de CC. ....  | 26 |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Histórico

No século XVII após a descoberta da eletricidade atmosférica, William Wall, constatou que o relâmpago deveria ser uma forma de eletricidade associada a tempestades, com isso iniciou-se o estudo deste fenômeno. No Brasil, este estudo 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 é muito comum em nosso planeta, ele 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).

Transmissão de energia elétrica e telecomunicações são os maiores afetados pelos relâmpagos, 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, 2005; Ballarotti et al., 2005; Campos et al., 2007a, 2007b, 2008; Saba et al., 2006a, 2006b, 2008).

## 1.2 Definição, Tipos de Relâmpago e Características

Relâmpago é uma descarga muito intensa, que dura aproximadamente meio segundo, e percorre quilômetros, que ocorre devido ao acúmulo de cargas elétricas em regiões na atmosfera, mais precisamente na tempestade. A rigor, uma nuvem não necessita estar envolvida com o fenômeno, mas geralmente a *cumulonimbus*, um tipo específico de nuvem de tempestade estimula a descarga elétrica.. 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.

De acordo com sua origem e do ponto onde terminam, os relâmpagos são classificados em seis diferentes categorias: (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 NS são menos frequentes, cerca de 20% do total global de relâmpagos, porém são os mais estudados, pela facilidade na observação visual e instrumentada, e pelo perigo proporcionado por estas descargas. Já os IN são mais frequentes, totalizado aproximadamente 80% do total, mais seu estudo é mais complicado, devido à necessidade de radares e antenas de alta frequência, e 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 nuvem-solo são usualmente denominados raios, e estes subdivididos em negativos e positivos. Essa classificação é determinada pela polaridade das cargas depositadas no solo. Como na base da nuvem predomina um centro de cargas negativas, os relâmpagos negativos são mais frequentes que os positivos.

O tipo mais raro de relâmpago é o que vai do solo para a nuvem, que se origina em superfícies elevadas como torres, árvores e edifícios. O nuvem-solo positivo também é pouco comum, por isso seu estudo só teve início nas últimas décadas.

### **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, (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) O relâmpago nuvem-solo negativo origina-se de uma descarga entre o centro de cargas negativas presentes na base da nuvem e um pequeno centro de cargas positivas, essa descarga libera elétrons geram um **pulso de quebra de rigidez** do ar. (Figura 1.2);

b) Um **líder escalonado** ioniza o canal, formando um caminho até o solo, com uma velocidade de  $10^5$  m/s, este canal geralmente ramifica-se, mais nem sempre todas as ramificações atingem o solo, geralmente o relâmpago possui apenas um ponto de contato de cada vez, mais já foi visto raios com mais de uma descarga ao mesmo tempo. (Figura 1.2b);

c) Uma **descarga conectante** se origina geralmente em uma superfície alta como torres e árvores, devido à intensidade do campo elétrico entre o líder escalonado e o solo.

d) Quando o líder escalonado se une a descarga conectante surge uma descarga com luminosidade intensa denominada **descarga de retorno**, que se propaga com velocidade  $10^8$  m/s num curto período de tempo, aproximadamente 70 microssegundos. As cargas passam a serem transportadas para o solo pelo canal já ionizado, com uma corrente de 30kA. Em média ocorrem três descargas por relâmpago, mas há registros de casos com até 26 descargas. (Figura 1.2d,e);

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

f) Após o líder contínuo ter ionizado o canal, outra descarga ocorre, sendo esta chamada **descarga subsequente**. 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 subseqüentes**, em um único relâmpago, podem ser chamadas também de descargas múltiplas. Geralmente elas são menos ramificadas, e às vezes podem ser vistas como se o relâmpago estivesse piscando. 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, 2006a).



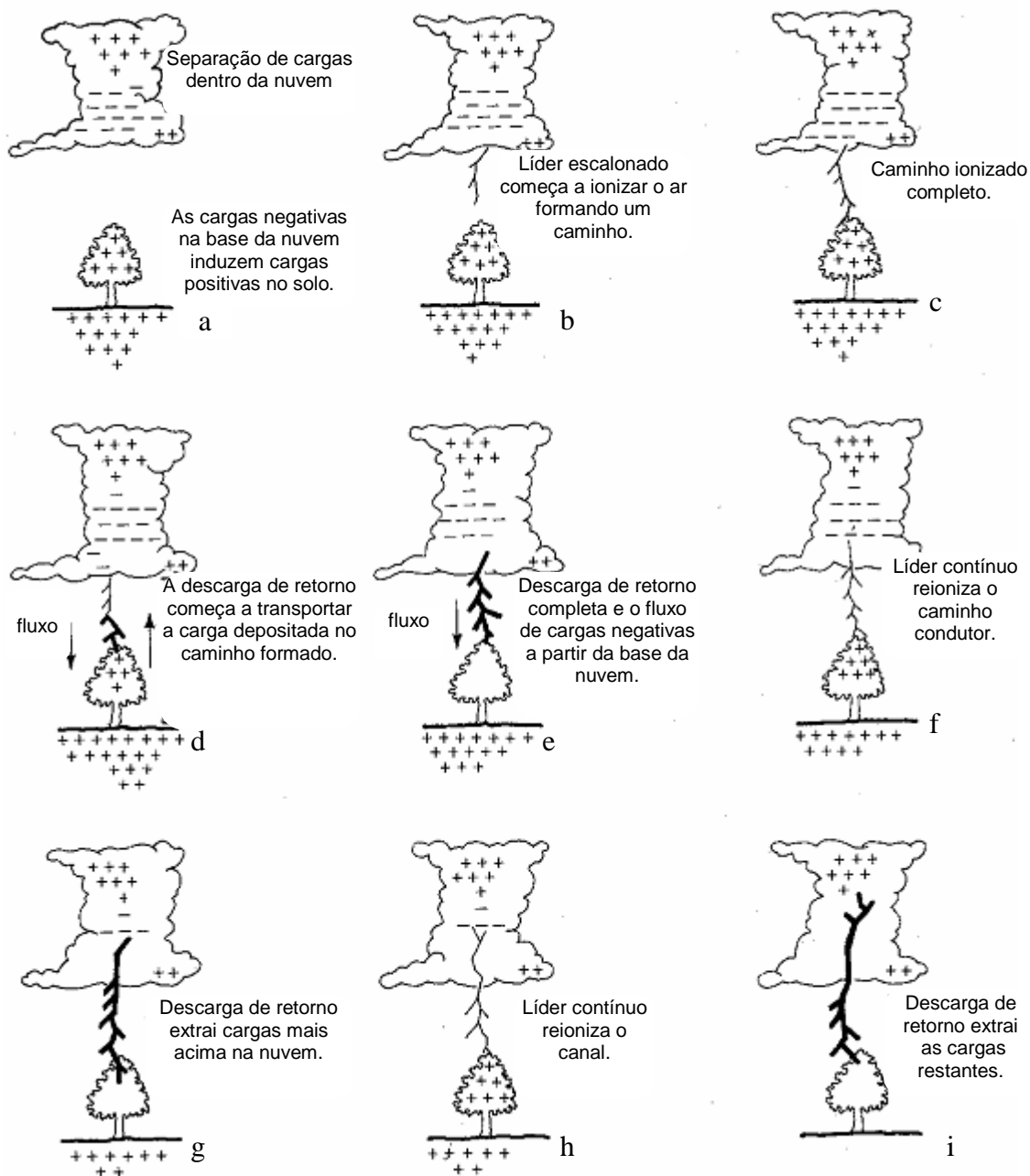


Figura 1.2 – Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.

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

As descargas de retorno geralmente são seguida por uma **corrente contínua** (CC), que é um modo contínuo de transferir cargas da nuvem para o solo. Valores típicos de corrente são dezenas ou centenas de ampères, e de duração de até centenas de

milissegundos” (Rakov e Uman, 2003). A corrente contínua é dividida em categorias de acordo com sua duração. Kitagawa and Brook, definiram “CC longa” para indicar as que duram mais de 40 ms, Shindo and Uman definiram “CC curta” as que duram entre 10 ms e 40 ms. E baseado nos dados analisados na câmera rápida, Ballaroti introduziu o termo “mini CC” para definir CC com duração inferior a 10 ms e superior a 4 ms. Cerca de 70% das descargas de retorno são seguidas por algum tipo de corrente contínua (Saba et al, 2006a).

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 Tabela 1.1 exhibe 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, 2006a), 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                            | 2.10 <sup>5</sup> m/s     |
| Corrente  | 100 A                     |
| Duração total   | 35 ms                     |
| <b>Descarga de Retorno</b>                                |                           |
| Velocidade de propagação                                  | (1-2).10 <sup>8</sup> m/s |
| Pico de corrente  | 30 kA                     |
| Comprimento do canal                                      | 5 km                      |
| Duração   | 70 μs                     |
| <b>Líder Contínuo</b>                                     |                           |
| Velocidade de propagação                                  | (1-2).10 <sup>7</sup> m/s |
| Corrente  | 1 kA                      |
| Duração total   | 1 – 2 ms                  |
| <b>Descarga Subseqüente</b>                               |                           |
| Corrente  | 10 – 15 kA                |
| Velocidade de propagação                                  | (1-2).10 <sup>8</sup> m/s |
| <b>Corrente Contínua</b>                                  |                           |
| Duração   | 100 ms                    |
| Porcentagem de Descargas de Retorno com corrente contínua | 73% *                     |
| <b>Características Gerais de um Relâmpago</b>             |                           |
| 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. 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. Geralmente os relâmpagos positivos possuem apenas uma descarga de retorno e costuma 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.

### **1.3 Motivação e Justificativa**

Como observado nas seções anteriores, a corrente contínua é responsável pelos danos mais graves associados a relâmpagos, como incêndios florestais, queima de cabos de fibra ótica (OPGW), queima de transformadores, danos na superfície metálica das aeronaves e a produção de NOx, ( Rakov,V.A e Uman (1990) e Fisher, F.A, Plumer, J.A (1977). Os raios causam um prejuízo muito alto, e a CC longa é uma das principais causas desses prejuízos, pois os materiais estão projetados para receber uma corrente altíssima porém por em um período curto de tempo. Estudos mostram que estes materiais em contato com uma corrente menor porém durante um tempo elevado não se sustentam (Chisholm, W.A, Levine, J.P, Chowdhuri, P ( 2001).

### **1.4 Objetivos do Trabalho**

Este trabalho visa, responder algumas questões relativas à:

- Porcentagem de descargas seguidas de correntes contínua muito curta (4 a 10 ms), curta ( 11 a 40 ms) e longa ( mais de 40 ms).
- Presença de algum tipo de corrente contínua em cada ordem das descargas.
- Porcentagem de raios com CC.
- Porcentagem de raios com uma ou mais CC longa.
- Variação da CC em diferentes dias de tempestade.
- Comparação entre as câmeras usadas nas filmagens dos relâmpagos.
- Estatística para raios positivos.

## 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;
- O software *Origin 7.0* para plotagem de gráficos.
- Parâmetros fornecidos pela RINDAT (Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas).

### 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 e Uman, 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, *Responsivity*<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

---

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

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 infravermelho. A Figura 2.6 mostra duas fotografias: uma da lâmina de vidro e do filtro 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.

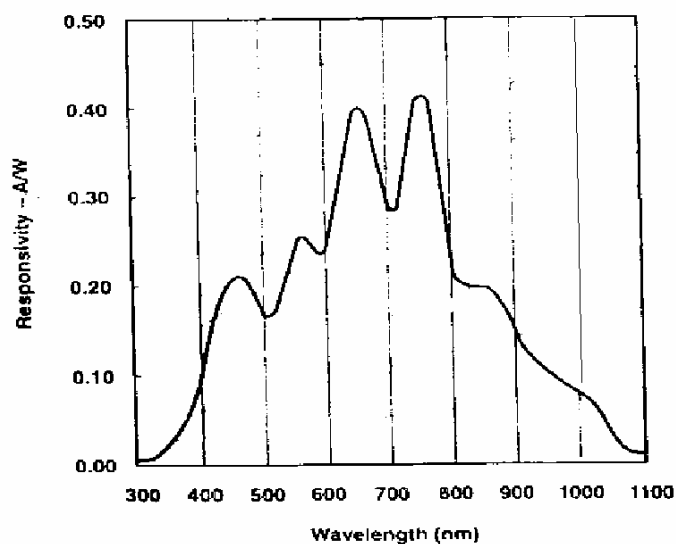


Figura 2.2 – Relação entre responsividade do sensor CCD (A/W) e comprimento de onda do sinal eletromagnético (nm). O sensor CCD enfatiza as componentes infravermelhas em comparação com as componentes visíveis (o vermelho e o azul estão em aproximadamente 600 e 470 nm, respectivamente).

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



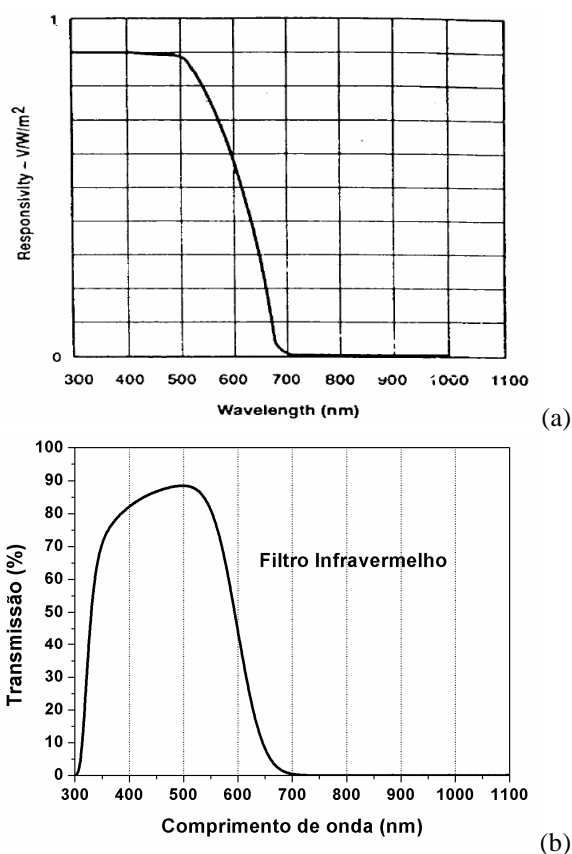


Figura 2.3 – Curvas Características da (a) Responsividade da câmera com o Filtro Infravermelho (fornecida pelo fabricante) e da (b) Transmissão do Filtro isoladamente (ensaiada no INPE). Este filtro é colocado pelo fabricante com o intuito também de equalizar as cores e, para o caso monocromático (o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

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

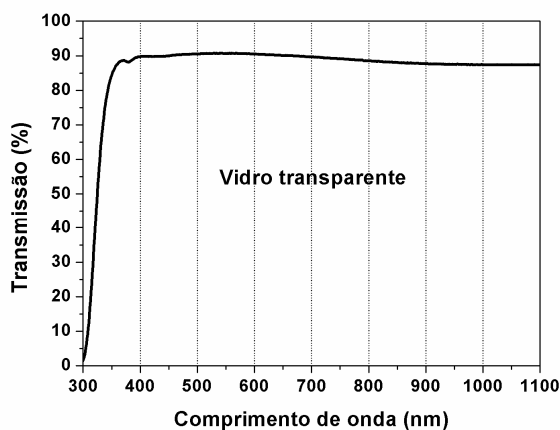


Figura 2.4 – Transmissão da lâmina de vidro substituída na câmera.

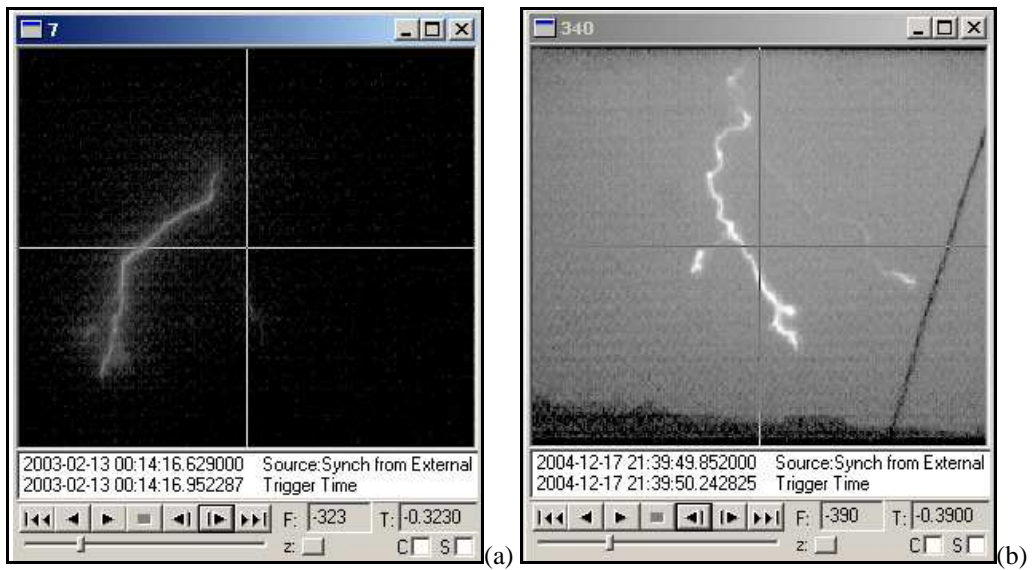


Figura 2.5 – Imagens do líder escalonado com o filtro (a) e sem o filtro infravermelho (b).

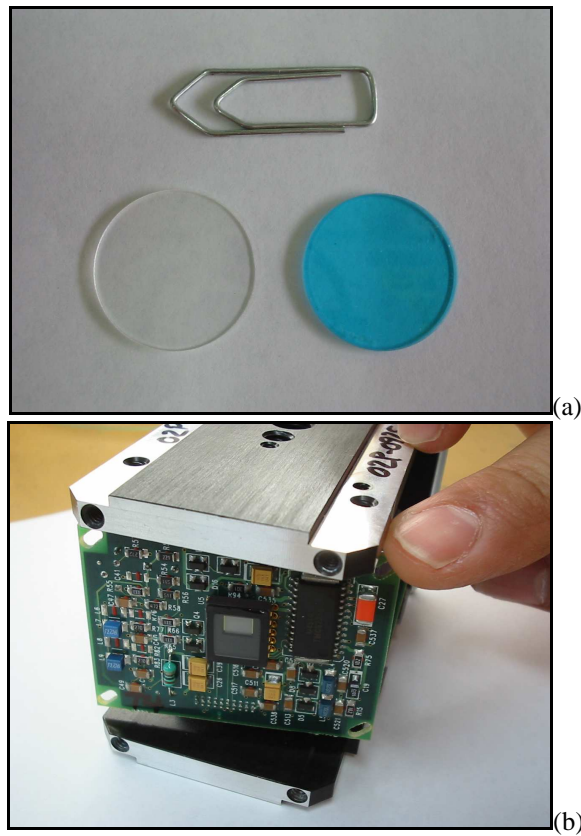


Figura 2.6 – Fotografias (a) da lamina de vidro (esquerda) e do filtro infravermelho (direita) e (b) da câmera com o sensor CCD exposto (seta).

### 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 no Brasil.



Figura 2.7 – Câmera rápida FASTCAM 512 PCI 2k em seu módulo móvel utilizado na campanha brasileira.

## 2.3 Locais de Observação

### 2.3.1 Torre de Antenas do IAE/AEL – São José dos Campos, SP, Brasil

O primeiro 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 dos verões de 2006/2007 e 2007/2008, foi criando 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).

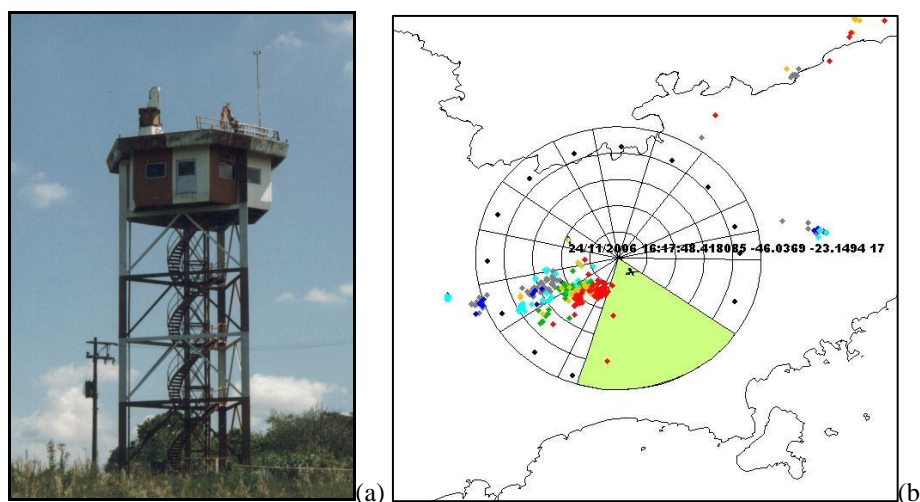


Figura 2.8 – (a) Torre de observação do CTA/IAE/AEL e (b) “teia” colocada no software NetRaios com pontos visualmente conhecidos ao redor da torre.

### 2.3.2 Physics-Atmospheric Sciences Building – Tucson, Arizona, EUA

O segundo local de observação utilizado foi o Physics-Atmospheric Sciences Building do campus da University of Arizona, localizada na cidade de Tucson no estado do Arizona, EUA. Durante o período de 15 de julho a 20 de agosto de 2007, no verão norte-americano, foi realizada uma campanha de coleta de dados do INPE em cooperação com professores e alunos do Institute of Atmospheric Physics inserido na University of Arizona. A câmera rápida FASTCAM 512 PCI 2k permaneceu montada em um módulo móvel (mostrado na Figura 2.9) no local de observação, permitindo a mudança de visada conforme a evolução da tempestade. Já a *MotionScope* 8000S encontrou-se transitando entre diferentes pontos de observação na cidade, conforme o posicionamento das nuvens de tempestade. Graças ao relevo extremamente plano da cidade e seus arredores foi possível obter uma boa visibilidade para ambas as câmeras.

A área possui uma excelente cobertura da rede de detecção de descargas atmosféricas dos EUA, NLDN (National Lightning Detection Network™), com eficiência de detecção de 93% para descargas de retorno individuais e 68% para relâmpagos (Biagi et al., 2007). Dados em tempo real fornecidos pela NLDN auxiliaram o apontamento e posicionamento de ambas as câmeras, ampliando consideravelmente a eficiência das observações.



Figura 2.9 – Módulo móvel da FASTCAM 512 PCI 2k utilizado durante a campanha no verão norte-americano em Tucson, Arizona.

### **2.3.3–Paraná e Rio Grande do Sul, Brasil.**

A terceira região de observação foi o Sul do Brasil em três cidades distintas, São Martinho da Serra, Londrina e Uruguaiana.

Em São Martinho da Serra as filmagens foram feitas no Observatório Espacial do Sul, e a câmera foi colocada de modo que se tinha uma vista ampla em direção ao norte, ao sul e ao leste.

Em Londrina, as imagens foram feitas na casa de um dos estudantes (Maurício Ballarotti), que estava efetuando a campanha. Os vídeos foram feitos na própria casa, pois esta tinha três andares, e uma ótima localização, e lugar para montar os equipamentos.

Em Uruguaiiana, foi utilizada uma sala dentro de uma subestação elétrica da Eletrosul, apesar da vista não ser ampla, um grande numero de relâmpagos foram filmados nesta janela.



Figura 2.10 – Vista da janela em Uruguaiiana aonde foram filmados alguns raios da campanha 2006/2007.

### 3 RESULTADOS

Neste trabalho foram analisados 1404 raios negativos e 87 raios positivos, observados pelo menos por uma das câmeras rápidas, em 90 dias de tempestades, numa distância que variou de 1 a 100km do local de observação. As observações foram feitas em três locais diferentes, São Jose dos Campos, SP, Tucson, Arizona, EUA e em algumas cidades do Sul do Brasil.

#### 3.1 Descargas seguidas de Corrente Contínua.

Entre os 1404 raios filmados, obtivemos 4034 descargas, estas descargas estão divididas em dois grupos na figura 3.1 a, as que possuem algum tipo de corrente continua, e as que não possuem.

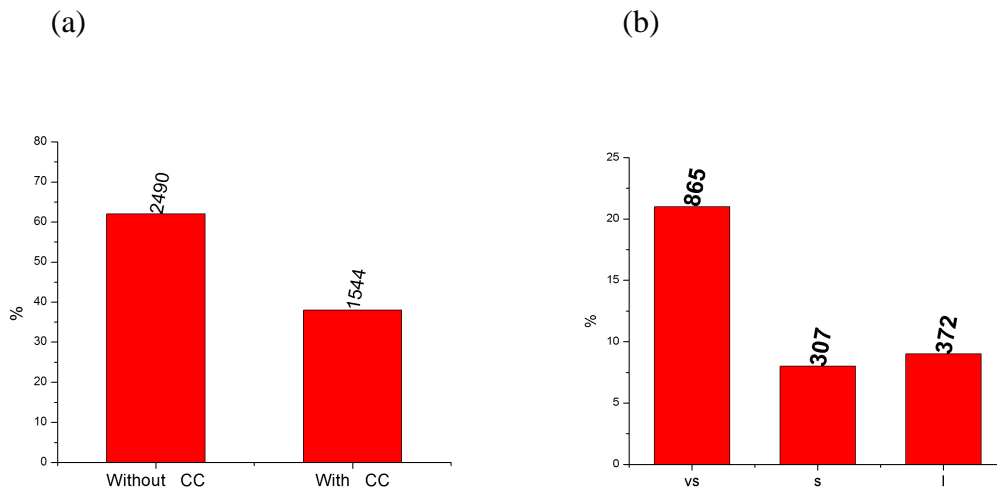


Figura 3.1 – a) Porcentagem de descargas com CC e sem CC, b) Distribuição da corrente continua entre as descargas negativas.

Podemos observar de acordo com a Figura 3.1 b que cerca de 9% das descargas possuem corrente continua longa, e que este numero é superior aos que possuem corrente continua curta que é aproximadamente 7,5 %.

A Figura 3.2 mostra a porcentagem de descargas sem CC, com mini CC, CC curta e CC longa respectivamente para cada ordem da descarga. Foram analisadas 4034 descargas negativas, onde nota-se que na primeira descarga é menos provável haver corrente continua longa.

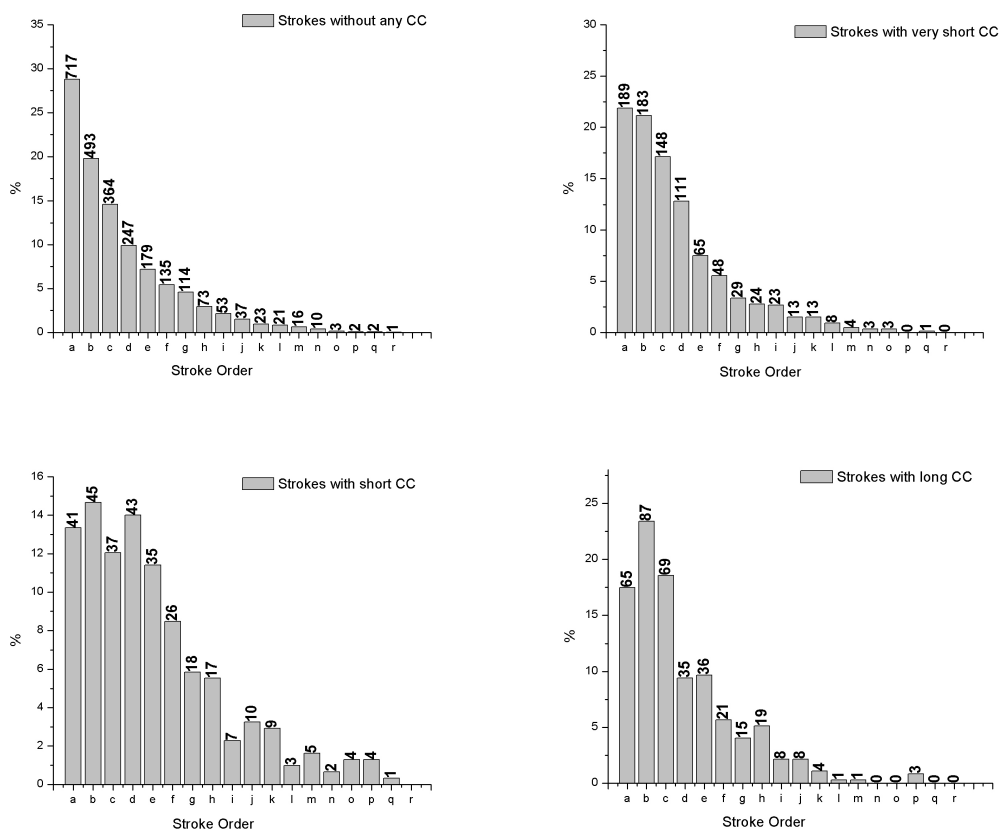


Figura 3.2 Distribuição da corrente continua para cada ordem das descargas

A Figura 3.3 apresenta a ocorrência dos três tipos de corrente contínua em diferentes ordens das descargas.



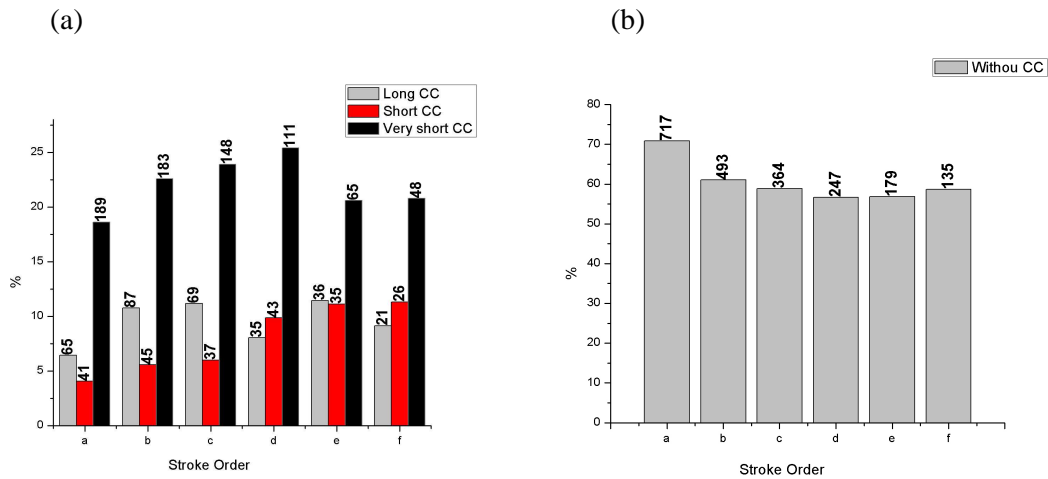


Figura 3.3 – Porcentagem de algum tipo de corrente continua em diferente ordem de descargas, e porcentagem de descargas sem corrente continua respectivamente.

Nota-se que na primeira descarga é menos propicio a ocorrência de corrente continua, e como visto na figura 3.2 b confirma que na primeira descarga geralmente não ocorre CC, em aproximadamente 70% dos casos.

### 3.2 Relâmpagos com Corrente Contínua longa.

Como a corrente continua longa é a maior preocupação no nosso estudo, analisamos todos os relâmpagos filmados e achamos que aproximadamente 23,3% dos raios negativos apresentam pelo menos uma corrente continua longa, e quando restrito a uma distancia menor que 40 km esse percentual aumentou para 28%. Sua distribuição é mostrada no histograma da Figura 3.4.

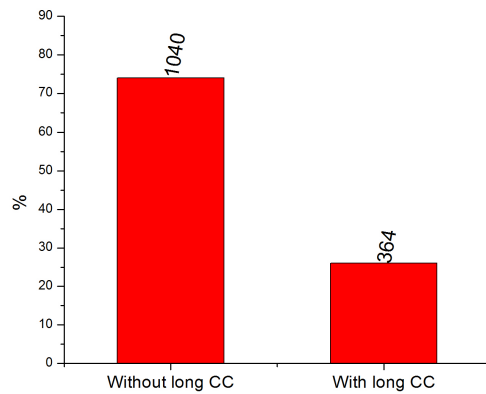


Figura 3.4- Porcentagem de relâmpago com corrente continua longa.

A figura 3.5 mostra a distribuição da corrente continua longa nos relâmpagos.

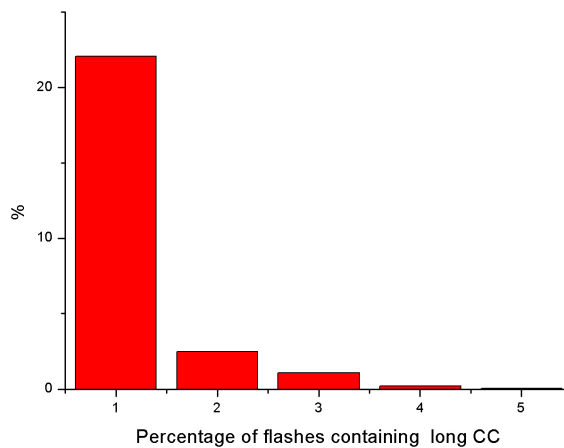


Figura 3.5 – Distribuição da ocorrência de corrente continua longa no relâmpago.

Podemos observar na figura 3.5 que entre os 28% dos relâmpagos que possuem corrente continua longa, esta aparece poucas vezes no mesmo relâmpago, e quando ocorrem várias CC longas, nunca em número maior que cinco.

### 3.3 Variação da presença da corrente continua em diferentes tempestades.

Alguns estudos sobre corrente continua longa ( Rakov, V.A e Uman, M.A (1990b) ; Kitagawa, N., Brook, M., Workman, E.J (1962)), obtiveram uma porcentagem de relâmpagos com corrente continua longa maior do que a observada no nosso estudo. Contudo essa discrepância pode ser devido à quantidade de dados e principalmente pela quantidade de tempestades diferentes analisadas. Na figura 3.6 vemos essa variação nos dias em que tivemos maior quantidade de raios filmados.

| Day                           | Duration of thunderstorm observation (minutes) | Total N <sup>o</sup> of flashes | Percentage    |
|-------------------------------|--|---------------------------------|---------------|
| Nov. 7, 2003                  | 177  | 22                              | <b>18.2 %</b> |
| Feb. 12, 2004                 | 118  | 31                              | 22.6 %        |
| Mar. 30, 2004                 | 185  | 41                              | 31.7 %        |
| Mar. 23, 2005                 | 346  | 48                              | <b>70.8 %</b> |
| Dec. 15, 2006                 | 176  | 35                              | 37.1 %        |
| Feb. 25, 2007                 | 258  | 27                              | 29.6 %        |
| Aug. 8, 2007                  | 334  | 27                              | 33.3 %        |
| <b>Average of this subset</b> |  |                                 | <b>38.1 %</b> |

Figura 3.6 – Porcentagem de relâmpagos com corrente continua longa em diferentes tempestades.

Na Figura 3.6 vemos uma variação entre 18.2 % e 70.8% em dias diferentes, e a média desses dias de aproximadamente 38%, essa média alta é devido ao dia 23 de março onde se obteve 71% de relâmpagos com corrente continua longa, elevando à estatística.

### 3.4 Comparações entre HS1 e HS2

Como em todas as campanhas são utilizadas as duas câmeras rápidas, surgiu a dúvida a respeito da eficiência das câmeras na detecção de CC, então selecionamos todos os raios com CC, que foram filmados em ambas as câmeras e montamos um gráfico com este resultado.

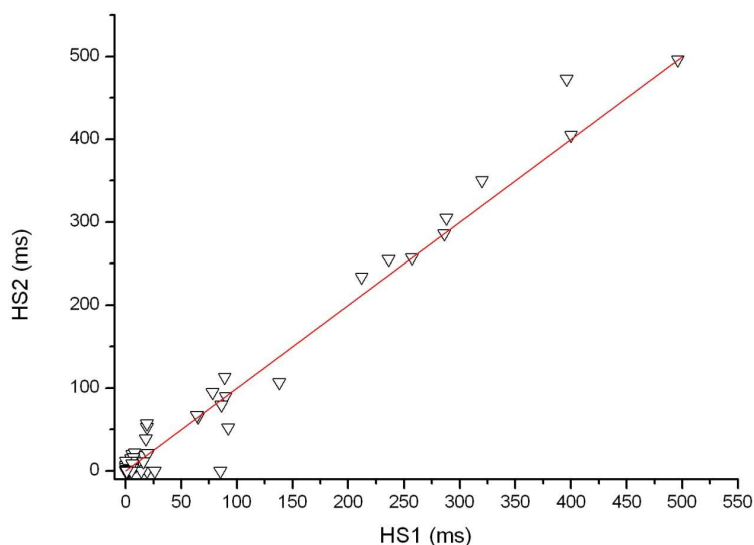


Figura 3.7 – Comparação entre câmeras rápidas.

A reta vermelha no gráfico representa o local onde o ponto fica quando ambas as câmeras enxergam a mesma duração de CC. Como podemos ver, os pontos não se afastam muito da reta, conseqüentemente as câmeras rápidas tem a mesma eficiência na visualização da CC. O estudo constatou também que a chuva é o fator que mais dificulta essa visualização.

### 3.5 Raios positivos.

Os raios positivos possuem algumas características diferentes dos negativos, por isso são estudados separadamente. Em todas as campanhas foram observados 87 raios positivos, entre eles 71 são simples (possuem apenas um descarga), e 16 são múltiplos (possuem uma ou mais descargas). Entre relâmpagos visíveis, obtivemos 95 descargas em 83 relâmpagos, uma media de 1 descarga por raio, não foi constatado nas nossas filmagens casos de raio positivo com mais de duas descarga.

Podemos perceber que nos raios positivos a incidência de CC longa é muito alta, como demonstra a figura 3.8

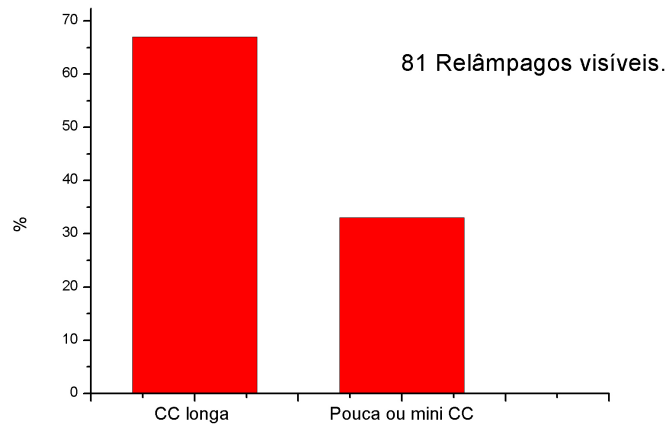


Figura 3.8- Porcentagem de relâmpagos com algum tipo de CC.

Podemos ver que nos positivos ocorrem muito mais raios com CC longa do que com CC curta ou muito curta, entre as descargas a diferença diminui, porem continua grande.

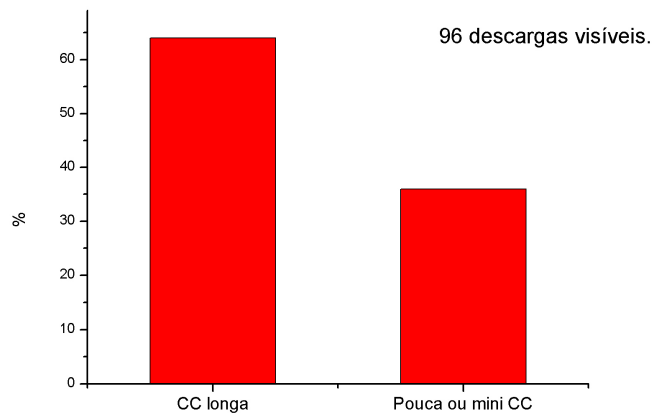


Figura 3.9- Porcentagem de descargas com algum tipo de CC.

Com exceção de um caso, todos os relâmpagos tiveram corrente continua.

## 4 CONCLUSÃO

No nosso trabalho foram analisados relâmpagos com corrente continua principalmente longa, e descobrimos que 28% dos raios negativos possuem CC longa, um percentual inferior aos estudados anteriormente onde foram encontrados 40% e 50%, (Rakov, V. A., Uman, M. A., 1990b e Kitagawa, N., Brook, M., Workman, E. J., 1962) respectivamente. Analisamos 90 tempestades diferentes onde houve maior número de relâmpagos filmados, e notamos que existe uma grande variação nesse percentual de tempestade para tempestade. Uma tempestade apresentou 70 % de raios com CC longa, e uma outra apenas 18%; essa grande variabilidade deve estar associada aos tipos de eletrificação nas nuvens.

Confirmamos também que é pouco comum a ocorrência de corrente continua longa nas primeiras descargas, assim como é raro ocorrerem varias CC longas no mesmo relâmpago.

Comprovamos que ambas as câmeras são eficientes na visualização da CC, pois elas obtiveram na maioria dos casos, um valor similar, o que nos assegura que não está havendo perda em uma das câmeras rápidas com relação à outra. A maior dificuldade para visualização das CC se deve à distância, e na maioria das vezes pela chuva que pode ocorrer entre o canal do raio e a câmera.

Entre os relâmpagos positivos, encontramos 67% com CC longa, e 27% com pouca e mini CC. Entre as 96 descargas que possuem algum tipo de CC, 64% são longas. Note-se que entre os positivos a CC longa é muito mais comum que entre os relâmpagos negativos. Outra diferença analisada é a multiplicidade. Nos relâmpagos positivos a media é de uma descarga por raio, já nos negativos essa media é de aproximadamente 3 a 4.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. High-speed camera observations of negative ground flashes on a millisecond-scale. **Geophys. Res. Lett.** v. 32, L23802, doi:10.1029/2005GL023889, 2005.

Biagi, C.J., Cummins, K.L., Kehoe, K.E., Krider, E.P. National Lightning Detection Network (NLDN) performance in southern Arizona, Texas and Oklahoma. **J. Geophys. Res.**, v. 112, D05208, doi.10.1029/2006JD007341, 2007.

Campos, L.Z.S., Saba, M.M.F., Pinto Jr., O., Ballarotti, M.G. Study on waveshapes of continuing currents and properties of M-components observed in natural negative and positive cloud-to-ground flashes using a high-speed camera. **Proc. of the 13<sup>th</sup> Int. Conf. on Atmospheric Electricity.** Internacional Commission on Atmospheric Electricity, 1, 497-500, Beijing, China, 2007a.

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, 2007b.

Campos, L.Z.S., Saba, M.M.F., Pinto Jr., O., Ballarotti, M.G. Waveshapes of continuing currents and properties of M-componentes in positive cloud-to-ground lightning. **Atmos. Res.**, *In press*, 2008.

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.

Correia, L. P. ; Saba, M. M. F. . Presence of continuing currents in negative flashes. Paper presented at Ground'2008, Florianopolis, Brasil.

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, 22887-22902, 1993.

Fisher, F.A., Plumer, J.A., 1977. Lightning Protection of Aircraft, NASA Ref. **Publ., NASA-RP-1008.**

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

- Lutgens, F. K.; Tarbuck, J. E. **The atmosphere: an introduction to meteorology.** Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 434 p., 1982.
- 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.
- Rahman, M., Cooray, V., Rakov, V. A., Uman, M. A., Jerauld, J., and Olsen II, R. C. (2007) **Measurement of NOx produced by rocket-triggered lightning.**
- Rakov, V. A., and M. A. Uman (1990), Some properties of negative cloud-to-ground lightning flashes versus stroke order, *J. Geophys. Res.*, 95, 5447-5453.
- Rakov, V. A., Uman, M. A., 1990b. Long continuing current in negative lightning ground flashes, *Journal of Geophysical Research.*, 95, 5455-5470
- Rakov, V.A., Huffines, G.R. Return-stroke multiplicity of negative cloud-to-ground lightning flashes. *J. Appl. Meteor.*, v. 42, 1455-1462, 2003.
- Rakov, V.A., Uman, M.A. **Lightning: physics and effects.** Cambridge Univ. Press, New York. 687 p, 2003.
- Rakov, V.A., Uman, M.A., Thottappillil, R. Review of lightning properties from electric field and TV observations. *J. Geophys. Res.*, v. 99, 10745-10750, 1994.
- 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, 2006a.
- Saba, M.M.F., Ballarotti, M.G., Pinto Jr., O. Relation between lightning return stroke peak current and following continuing current. *Geophys. Res. Lett.* v. 33, L23807, doi:10.1029/2006GL027455, 2006b.
- Saba, M. M. F., Pinto Jr., O., Solórzano, N. N., Eyebert-Berard, A. Lightning current observation of an altitude-triggered flash. *Atmos. Res.* v. 76, p. 402-411, 2005.
- Saba, M.M.F., Cummins, K.L., Warner, T.A., Krider, E.P., Campos, L.Z.S., Ballarotti, M.G., Pinto Jr., O., Fleenor, S.A. Positive leader characteristics from high-speed video observations. *Geophys. Res. Lett.* v. 35, L07802, doi:10.1029/2007GL033000, 2008.



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

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

**ANEXO A – ARTIGO APRESENTADO NO INTERNATIONAL CONFERENCE  
ON GROUNDING AND EARTHING.**

|

