



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



## **ESTUDO DAS DIFERENÇAS ENTRE AS DESCARGAS DE RAIOS SIMPLES E RAIOS MÚLTIPLOS.**

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

Shailine Fonseca Viegas (FATEC / INFO, Bolsista PIBIC / CNPq)

E-mail: [s\\_fviegas@yahoo.com.br](mailto:s_fviegas@yahoo.com.br)

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba (DGE / INPE, Orientador)

E-mail: [msaba@dge.inpe.br](mailto:msaba@dge.inpe.br)

INPE  
São José dos Campos

## **ESTUDO DAS DIFERENÇAS ENTRE AS DESCARGAS DE RAIOS SIMPLES E RAIOS MÚLTIPLOS.**

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

Shailine Fonseca Viegas (FATEC / INFO, Bolsista PIBIC / CNPq)

E-mail: [s\\_fviegas@yahoo.com.br](mailto:s_fviegas@yahoo.com.br)

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba (DGE/INPE, Orientador)

E-mail: [msaba@dge.inpe.br](mailto:msaba@dge.inpe.br)

Julho de 2011

## RESUMO

A razão pela qual um raio tem mais de uma descarga ainda é desconhecida. Aproximadamente 80% dos relâmpagos nuvem-solo negativos (-cg) são compostos por mais de uma descarga. 75% dos relâmpagos nuvem-solo positivos (+cg), entretanto, tem apenas uma descarga. Embora relâmpagos nuvem-solo negativos e relâmpagos nuvem-solo positivos sejam geralmente seguidos por corrente contínua longa, na primeira descarga de um raio múltiplo -cg isso não acontece. Neste estudo, combinamos gravações feitas através de câmeras de alta-velocidade (obtidas através de duas diferentes câmeras, Red Lake Motion Scope 8000S e Photron Fastcam 512 PCI, operando a uma taxa de quadros que pode ser ajustada de 1000 a 8000 quadros por segundo) com medições de campo elétrico lento e rápido (obtidos através do uso de antenas capacitivas), para comparar os parâmetros da primeira descarga de um raio múltiplo negativo, dos relâmpagos nuvem-solo simples negativos -CG, e das primeiras descargas de uma descarga positiva +CG. Os raios -CG e os raios +CG analisados foram coletados entre 2003 e 2011 no Brasil e nos EUA. Através desta análise, esperamos encontrar algumas razões para algumas dessas diferenças marcantes entre -CG e +CG.

## ABSTRACT

The reason why a lightning flash have more than one stroke is still unknown. Approximately 80% of the negative cloud-to-ground (-cg) lightning flashes are composed by more than one stroke. 75% of the positive cloud-to-ground (+cg) flashes, however, have only one stroke. Although negative single-stroke flashes and positive flashes are usually followed by long continuing current, the first stroke of a multiple-stroke -cg is usually not. In the present work we combine high-speed video recordings (obtained by two different cameras, Red Lake Motion Scope 8000S and Photron Fastcam 512 PCI, operating at frame rates ranging from 1000 or 8000 frames per second) with slow and fast electric field measurements (obtained through the use of capacitive antennas) to investigate parameters of the first stroke of a multiple-stroke -CG, of the negative single-stroke, and of the first stroke in a +CG. The -CG and +CG flashes analyzed were collected between 2003 and 2011 in Brazil and in USA. Through this analysis, we hope to find some reasons for some of these marked differences in -CG and +CG flashes.

## LISTA DE FÍGURAS

	<u>Pág.</u>
FIGURA 1.1 – Fotografia de um relâmpago ocorrido em São José dos Campos .....	2
FIGURA 1.2 – Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.....	5
FIGURA 2.1 – Fotografias (a) da câmera <i>8000S MotionScope</i> com sua placa de <i>interface</i> com o PC e (b) do sistema instalado no módulo móvel.....	9
FIGURA 2.2 – Antena plana utilizada em medidas de campo elétrico .....	10
FIGURA 2.3 – Exemplo de gráfico de campo elétrico versus tempo obtido com o auxílio da antena plana.....	11
FIGURA 2.4 – Torre de observação do CTA/IAE/AEL.....	12
FIGURA 3.1 – Planilha de Controle .....	14
FIGURA 3.2 – Presença de corrente contínua em raios simples ( <i>single strokes</i> ), primeiras descargas de raios múltiplos ( <i>first strokes</i> ) e raios positivos ( <i>positive strokes</i> ).....	15
FIGURA 3.3 – Típica quebra de rigidez dielétrica ( <i>breakdown</i> ) preliminar seguida por uma descarga de um -CG.....	16

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
TABELA 1 – Valores do pico de corrente estimado .....	14
TABELA 2 – Intervalo de tempo $T_{BD-RS}$ para diferentes casos .....	16
TABELA 3 – Tempo de subida das descargas de retorno .....	17

# SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
Julho de 2011 .....	I
1. INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	1
1.1 Histórico.....	1
1.2 Definição, Tipos de Relâmpagos e Características .....	2
1.2.1 Relâmpagos NS Negativos: Etapas e Características.....	3
1.2.2 Breve Descrição do Relâmpago NS Positivo.....	6
1.3 Pulsos de Quebra de Rigidez Dielétrica ( <i>Breakdown</i> (BD)).....	7
1.4 Objetivos do Trabalho.....	8
2. MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS .....	8
2.1 Materiais Utilizados .....	8
2.2 Sistema de Imageamento Digital de Alta Velocidade.....	9
2.3 Antena de Campo Elétrico .....	9
2.4 Local de Observação.....	11
2.5 Procedimento das Observações.....	12
3. RESULTADOS .....	13
3.1 Campanha de Coleta de Dados 2010-2011 .....	13
3.2 Análise de Dados .....	13
3.3 Estimativas de Pico de Corrente .....	14
3.4 Presença de Corrente Contínua .....	15
3.5 Intervalo de Tempo Entre a Quebra de Rigidez Dielétrica e a Descarga de Detorno ( $T_{BD-RS}$ )..	16
3.6 Tempo de Subida 10-90 para Descarga de Retorno ( $T_{RS}$ ).....	17
4. CONCLUSÃO.....	17

# 1. INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

## 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 32 anos, 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 BrasilDat, um conjunto de 47 sensores localizados no Brasil que 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 câmeras de alta-velocidade 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 Relâmpagos 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 – Fotografia de um relâmpago ocorrido em São José dos Campos.

Denominamos os tipos de relâmpagos em função de sua origem e do ponto onde terminam. Eles podem ser classificados em; (1) aqueles que permanecem no céu (chamado Intra-nuvem ou IN) e, (2) aqueles que tocam o solo (Nuvem-solo, NS ou Solo-nuvem, SN).

Os relâmpagos IN são os mais frequentes (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 frequência. 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 frequentes, 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 frequentes 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;

- 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);

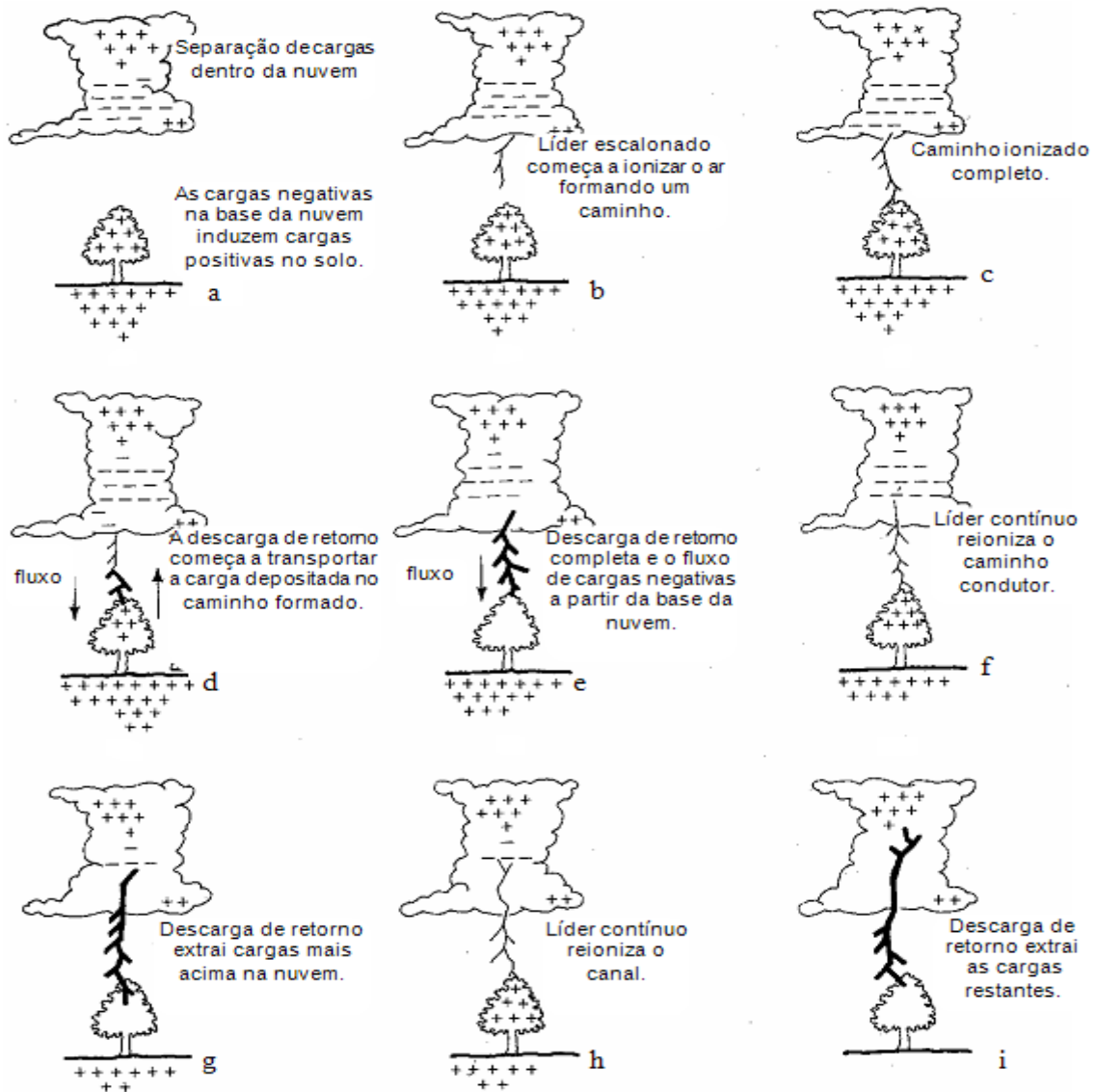


FIGURA 1.2 – Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.

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

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 para-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., 2006).

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 minicorrentes 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, 2006).

Relâmpagos que contém corrente contínua podem ser chamados “relâmpagos híbridos” e os que não a possuem, “relâmpagos discretos”. Os híbridos são capazes de iniciar incêndios enquanto que os discretos não. Apesar de terem a mesma temperatura, a diferença está em que ela é mantida por mais tempo nos relâmpagos híbridos (décimos de segundos nos híbridos e milésimos de segundos nos discretos). No entanto, também os relâmpagos discretos 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).

### **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 se 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.

### **1.3 Pulsos de Quebra de Rigidez Dielétrica (*Breakdown (BD)*)**

Um meio dielétrico passa a ser condutor quando o campo elétrico local atinge um determinado valor. A este fenômeno damos o nome de quebra de rigidez dielétrica.

Em tempestades elétricas os pulsos de quebra de rigidez dielétrica do ar (PB, abreviação do inglês *preliminary breakdown pulses*) são descargas de baixa intensidade que ocorrem dentro da nuvem, entre 3 e 5 km do solo, durante períodos que variam de 10 a 100 ms precedendo o líder escalonado do relâmpago (Rakov e Uman, 2003). Elas são observáveis em medições de campo elétrico através de pulsos normalmente bipolares com uma duração média de 50  $\mu$ s e cerca de 100  $\mu$ s entre eles. Os detalhes quanto à sua origem ainda não possuem uma explicação satisfatória. Medidas de campo elétrico dentro de nuvens de tempestade indicam valores máximos entre 100 e 400 kV/m, bastante inferiores ao que seria esperado como necessário para a quebra da rigidez dielétrica do ar na altura da nuvem, estimado em 1 MV/m (Pinto e Pinto, 2000). Este fato é bastante intrigante e tem levado a diversas especulações distintas, envolvendo desde a polarização de gotículas de água pelo campo no local (causando uma diminuição na intensidade mínima do campo elétrico para causar a quebra de rigidez dielétrica do ar) até a influência de radiação cósmica, ou mesmo uma união das duas possibilidades.

Suas características, ocorrência e influência sobre a descarga de retorno que as seguem ainda não são bem compreendidas, o que justifica uma série de estudos mais aprofundados que permitiriam uma melhor compreensão do processo envolvido na ocorrência de um relâmpago.

## 1.4 Objetivos do Trabalho

- Analisar vídeos obtidos em campanhas anteriores paralelamente a um estudo dirigido da literatura.
- Auxiliar em uma nova campanha de coleta de dados em São José dos Campos, e, em paralelo, trabalhar na redução e análise dos mesmos.
- Estudar parâmetros de campo elétrico das descargas de retorno em raios negativos, tais como: intensidade do pico de campo elétrico, formato da onda de campo elétrico gerada pela descarga, presença de corrente contínua após a descarga.
- Estudar os parâmetros das primeiras descargas dos raios múltiplos e comparar com as descargas dos raios simples (com apenas uma descarga) e, através das diferenças encontradas, tentar obter alguns indícios que expliquem por que alguns raios são múltiplos.
- Analisar os novos dados obtidos e, eventualmente, editar e publicar os resultados obtidos em periódicos especializados.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

### 2.1 Materiais Utilizados

- Câmera rápida *MotionScope 8000S* PCI, fabricada pela *Red Lake*;
- Microcomputador com a interface PCI da câmera rápida e os softwares *MiDAS 2.0* e *Origin 7.0*;
- Antena plana para medições de campo elétrico;
- Módulo de aquisição PCI BNC-6110 da National Instruments, com 12 bits e 8 entradas analógicas;
- Antena GPS para sincronismo dos equipamentos.

## 2.2 Sistema de Imageamento Digital de Alta Velocidade

Utilizamos o Sistema de Imageamento Digital de Alta Velocidade (ou câmera rápida, forma abreviada utilizada neste trabalho, ou ainda *High Speed Digital Imaging System*, nomenclatura usada pelo fabricante) “*MotionScope 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 sequência 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, e outra do sistema instalado num módulo móvel para facilitar o posicionamento da câmera durante as aquisições de imagens.

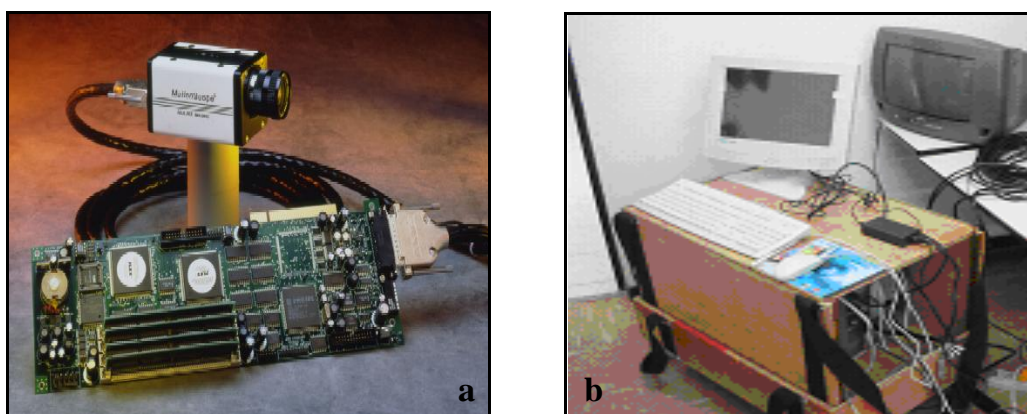


FIGURA 2.2 – Fotografias (a) da câmera *8000S MotionScope* com sua placa de *interface* com o PC e (b) do sistema instalado no módulo móvel.

## 2.3 Antena de Campo Elétrico

Uma antena plana com largura de banda de 306 Hz a 1,5 MHz serviu para efetuar medições de campo elétrico. Para aquisição de seus dados utilizamos o módulo BNC-6110 da National Instruments, que possui 8 entradas analógicas de 12 bits e sincronização com GPS, configurado para uma resolução de 5 MS/s (*mega-samples* por



segundo, ou seja, 5 milhões de aquisições em 1 segundo). As medições são salvas por um software do tipo *data logger* em arquivos *.bin*, possibilitando a gravação, visualização e análise. Seus dados podem ser facilmente confrontados com os vídeos registrados pela câmera rápida graças à sincronização com tempo GPS que as duas possuem, tornando os dois instrumentos praticamente complementares. A FIGURA 2.2 é uma fotografia da antena e a FIGURA 2.3 mostra um exemplo de gráfico do campo elétrico de um relâmpago *versus* tempo obtido com seu auxílio.



FIGURA 2.2 – Antena plana utilizada em medidas de campo elétrico.

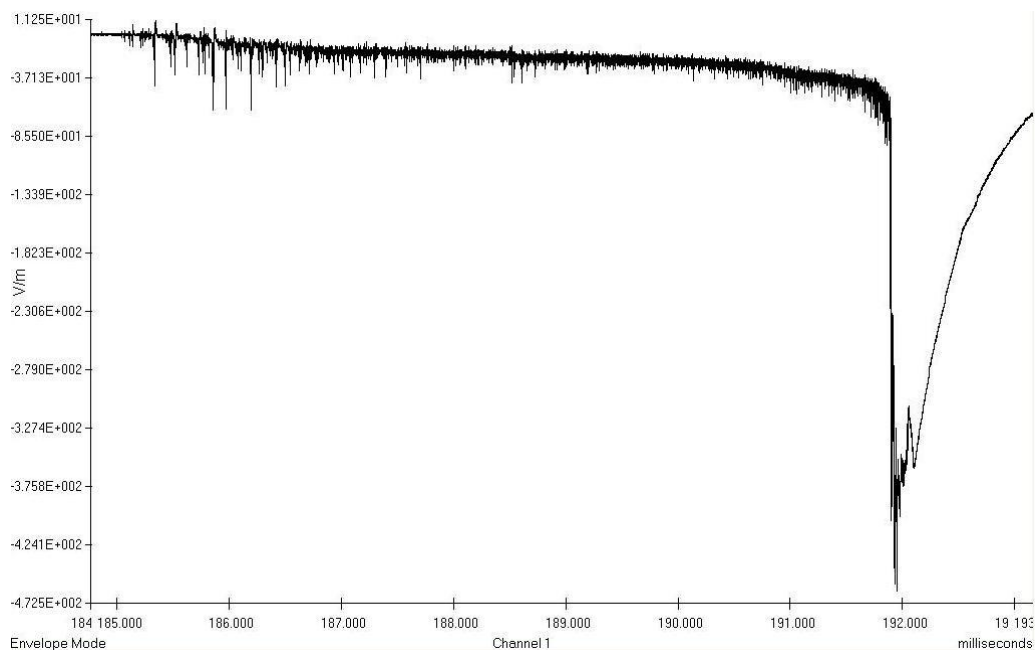


FIGURA 2.3 – Exemplo de gráfico de campo elétrico versus tempo obtido com o auxílio da antena plana. A imagem mostra o instante de ocorrência de uma descarga de retorno (pico maior negativo) juntamente com os pulsos de quebra de rigidez (pequenos pulsos bipolares de pequena amplitude).

## 2.4 Local de Observação

Para as observações realizadas utilizou-se a Torre de Antenas do IAE/AEL no CTA, localizada no município de São José dos Campos (situado no Vale do Paraíba, Estado de São Paulo), gentilmente cedida ao INPE-DGE-ELAT para a realização dos experimentos. Trata-se de um ponto elevado em comparação com o relevo local, possibilitando boa visibilidade em praticamente 360° ao redor. A FIGURA 2.4 exhibe uma foto do local.



FIGURA 2.4 – Torre de observação do CTA/IAE/AEL.

## 2.5 Procedimento das Observações

A obtenção dos dados foi realizada com um operador, que, basicamente, realizava as seguintes funções com a câmera rápida: (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 operador pressiona 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 à 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.

A operação da antena de campo elétrico se dá de forma semelhante, com esta locada sobre a torre de observação na parte exterior desta. O operador pressiona também um botão *trigger* simultaneamente com o da câmera, que faz com que o computador grave os dados obtidos módulo de aquisição BNC-6110 utilizando o mesmo recurso computacional de fila circular (explicado acima). No caso do campo elétrico a aquisição se dá em um período mais longo, normalmente de 2 a 3 segundos antes mais 2 a 3 segundos depois do acionamento do *trigger*, garantindo que todo o intervalo de tempo coberto pela câmera seja também registrado pelo campo elétrico.

### **3. RESULTADOS**

#### **3.1 Campanha de Coleta de Dados 2010-2011**

A Campanha de aquisição de novos dados de tempestades teve início em outubro de 2010 e encerrou em fevereiro de 2011. Durante esse tempo foram filmados 635 raios. Esse é o maior número de raios filmados durante uma campanha feita pelo grupo ELAT desde a sua criação.

#### **3.2 Análise de Dados**

Em paralelo à obtenção dos dados realizamos a sua redução, possibilitando a seleção dos casos julgados úteis para uma análise mais detalhada dentro do escopo deste estudo. Com os dados obtidos pela campanha 2010-2011 foi criada uma planilha para controle e análise dos dados, conforme figura 3.1.

MATRIZ	Local	Vídeo	Câmera	Ano	Mês	Dia	Hora	Min	Seg	ms	Frame	Visibilidade	Tipo
9	SJC	9	HS2	2010	10	1	14	52	39,509000	509	-1868	d	ic
9	SJC	9	HS2	2010	10	1	14	52	39,522000	522	-1815	d	ic
9	SJC	9	HS2	2010	10	1	14	52	39,527000	527	-1794	d	ic
9	SJC	9	HS2	2010	10	1	14	52	39,595000	595	-1523	d	ic
9	SJC	9	HS2	2010	10	1	14	52	39,619000	619	-1428	d	ic
9	SJC	11	HS2	2010	10	1	14	57	1,331000	331	-2579	v	rl
9	SJC	11	HS2	2010	10	1	14	57	1,357250	357	-2475	v	cg
9	SJC	11	HS2	2010	10	1	14	57	1,375000	375	-2403	v	m
9	SJC	12	HS2	2010	10	1	15	2	14,223	223	-3010	v	spider
9	SJC	12	HS2	2010	10	1	15	2	14,27525	275	-2803	v	spider
9	SJC	12	HS2	2010	10	1	15	2	14,29	290	-2744	v	rl
9	SJC	12	HS2	2010	10	1	15	2	14,365	365	-2444	v	spider
9	SJC	12	HS2	2010	10	1	15	2	14,43975	439	-2145	v	rl
9	SJC	12	HS2	2010	10	1	15	2	14,4655	465	-2042	v	rl
9	SJC	17	HS2	2010	10	26	1	9	41,176	176	-2520	v	cg
9	SJC	17	HS2	2010	10	26	1	9	41,177	177	-2516	v	m
9	SJC	18	HS2	2010	10	26	1	37	49,03625	36	-3958	v	spider
9	SJC	18	HS2	2010	10	26	1	37	49,05775	57	-3872	v	rl
9	SJC	18	HS2	2010	10	26	1	37	49,17575	175	-3400	v	rl
9	SJC	18	HS2	2010	10	26	1	37	49,22125	221	-3218	v	rl
9	SJC	18	HS2	2010	10	26	1	37	49,2405	240	-3141	v	rl
9	SJC	18	HS2	2010	10	26	1	37	49,26575	263	-3040	v	ic
9	SJC	19	HS2	2010	11	22	18	24	12,9015	901	-3734	v	cg
9	SJC	20	HS2	2010	11	22	18	30	4,511750	511	-3879	v	cg
9	SJC	20	HS2	2010	11	22	18	30	4,609750	609	-3487	v	ic
9	SJC	20	HS2	2010	11	22	18	30	4,660500	660	-3284	v	cg
9	SJC	20	HS2	2010	11	22	18	30	4,661750	661	-3279	v	m
9	SJC	20	HS2	2010	11	22	18	30	4,797500	797	-2736	v	cg
9	SJC	20	HS2	2010	11	22	18	30	4,798500	798	-2732	v	m
9	SJC	21	HS2	2010	11	25	20	41	20,417250	417	-2326	v	cg
9	SJC	21	HS2	2010	11	25	20	41	20,446250	446	-2210	v	cg
9	SJC	21	HS2	2010	11	25	20	41	20,531250	531	-1870	v	cg

FIGURA 3.1 – Planilha de Controle

### 3.3 Estimativas de Pico de Corrente

A Tabela 1 mostra a distribuição dos picos de corrente estimados ( $I_p$ ) para raios simples, primeiras descargas de raios múltiplos negativos e raios positivos que foram gravados usando as câmeras de alta-velocidade e foram reportados por um LLS.

TABELA 1 – Valores do pico de corrente estimado.

Ip (kA)					
	N	MA	MG	Mediana	DP
-CG Simples	239	-19.9	-16.5	-15.2	-14.1
1ª -CG	1068	-25.9	-21.3	-16.2	-18.5
+CG	116	43.2	35.7	39.4	25.9

De acordo com estudos anteriores (Rakov e Uman, 2003; Saba et al., 2010), as primeiras descargas de raios negativos têm valores de  $I_p$  médios superiores aos valores

de  $I_p$  das descargas de raios simples; raios positivos têm  $I_p$  aproximadamente duas vezes mais intensa que os outros dois. Esta diferença foi confirmada como estatisticamente significativa pelo teste t (t Test).

### 3.4 Presença de Corrente Contínua

A corrente contínua (CC) é um modo contínuo de transferência de carga para o chão. Em estudos anteriores sobre raios contendo CC, três categorias foram definidas. Corrente contínua “longa” (CC) foi definida por Kitagawa et al. (1962) e Brook et al. (1962), como indicado por uma mudança constante de campo elétrico com uma duração superior a 40ms. CC "curta" foi definido por Shindo e Uman (1989) como indicado por uma mudança de campo similar com duração entre 10ms e 40ms. Ballarotti et al. (2005) introduziu o termo "muito curto" para definir CC com uma duração inferior ou igual a 10ms, porém, com uma duração maior que 3ms, com base em dados de um sistema de vídeo de alta velocidade e evitando a contaminação do que poderia ser apenas o final da descarga de retorno. Ausência e presença das diferentes categorias de CC para raios simples e primeira descarga de raios múltiplos são apresentadas na Figura 1.

A baixa ocorrência de CC longa seguindo as primeiras descargas de raios múltiplos relatado anteriormente em outros estudos (eg, Shindo e Uman, 1989; Rakov e Uman, 1990) é confirmada neste estudo. Esta baixa ocorrência não é válida para raios simples. Quase 15% deles são seguidos por CC longa e 49% dos raios simples são seguidos por alguma CC. 64% dos 104 raios positivos foram seguidos por uma CC longa.

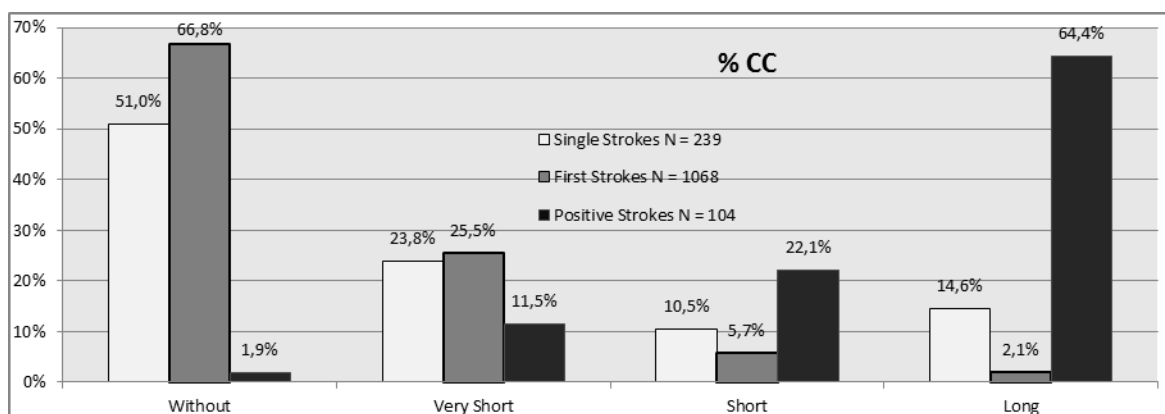


FIGURA 3.2 – Presença de corrente contínua em raios simples (*single strokes*), primeiras descargas de raios múltiplos negativos (*first strokes*) e raios positivos (*positive strokes*).

### 3.5 Intervalo de Tempo Entre a Quebra de Rigidez Dielétrica e a Descarga de Detorno ( $T_{BD-RS}$ )

Usando os registros de campo elétrico, analisamos o tempo decorrido ( $T_{BD-RS}$ ) entre o primeiro pulso de quebra da rigidez dielétrica à ocorrência da descarga de retorno. As diferenças entre os raios simples negativos, primeira descarga de raios múltiplos negativos e raios positivos são mostrados na Tabela 2. Os valores  $T_{BD-RS}$  para as primeiras descargas de raios múltiplos negativos e raios positivos são semelhantes e superiores ao valor encontrado para raios simples. Esta diferença foi confirmada como estatisticamente diferente pelo teste  $t$  ( $t$  Test).

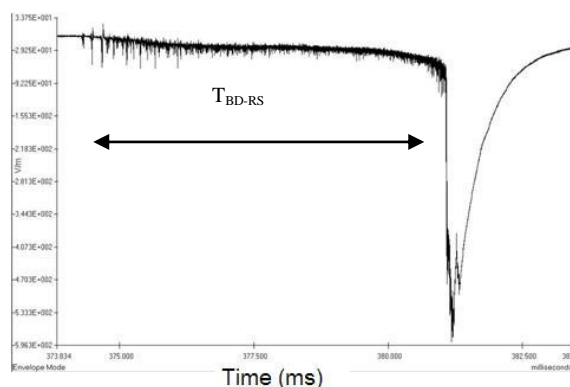


FIGURA 3.3 – Típica quebra de rigidez dielétrica (*breakdown*) preliminar seguida por uma descarga de um -CG.

TABELA 2 – Intervalo de tempo  $T_{BD-RS}$  para diferentes casos.

	$T_{BD-RS}$ (ms)				
	N	MA	MG	Mediana	DP
-CG Simples	25	113.8	97.0	88.3	68.7
1ª -CG	25	163.6	129.0	135.0	108.3
+CG	40	172.7	147.5	137.0	119.7

### 3.6 Tempo de Subida 10-90 para Descarga de Retorno ( $T_{RS}$ )

Os valores  $T_{BD-RS}$  para os raios simples, para as primeiras descargas de raios múltiplos negativos e para os raios positivos são mostrados na Tabela 3. Os valores de  $T_{RS}$  para os raios simples, as primeiras descargas de raios múltiplos negativos são semelhantes e menores do que o valor encontrado para positivos.

TABELA 3 – Tempo de subida das descargas de retorno.

	$T_{RS}$ ( $\mu s$ )				
	N	MA	MG	Mediana	DP
-CG Simples	25	3.2	2.8	2.6	1.9
1ª -CG	25	3.1	2.9	2.8	1.4
+CG	40	5.3	5.1	5.4	1.6

## 4. CONCLUSÃO

Pela primeira vez, foram obtidos alguns resultados estatísticos para a presença de CC, intervalo entre a quebra de rigidez dielétrica e a descarga de retorno e tempo de subida 10-90 separadamente para as primeiras descargas de raios múltiplos negativos e raios simples.

A baixa ocorrência de CC longa seguindo as primeiras descargas de raios múltiplos negativos relatada anteriormente em outros estudos também foi confirmada neste estudo. No entanto, esta baixa ocorrência não é válida para os raios simples. 15% dos raios simples são seguidos por CC longa.



O tempo de intervalo entre a quebra de rigidez dielétrica e a descarga de retorno para as primeiras descargas de raios múltiplos negativos é aproximadamente 30% maior do que esse intervalo para os raios simples negativos. Nenhuma diferença significativa foi encontrada entre tempo de subida de raios simples e das primeiras descargas de raios múltiplos negativos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ballarotti, M. G. **Estudo de relâmpagos nuvem-solo através de câmera rápida**. 2005-02-21. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.

Ballarotti, M. G.; Saba, M. M. F.; Pinto Jr, O. **High-speed camera observations of negative ground flashes on a millisecond-scale**. *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L23802, doi:10.1029/2005GL023889, 2005.

Kitagawa, N.; Brook, M.; Workman, E. J. **Continuing current in cloud-to-ground lightning discharges**. *Journal of Geophysical Research*: Vol.67, p. 637-647, 1962.

Lutgens, F. K.; Tarbuck, J. E. *The Atmosphere*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Feb. 1982, 528 p.

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

Pinto Jr., O. The Brazilian lightning detection network: a historical background and future perspectives. In: VII SIPDA, 2003, Curitiba. Proceedings, 2003.

Rakov, V. A.; Uman, M. A. **Lightning: Physics and Effects**. Cambridge University Press. United Kingdom: Cambridge, 2003.

Saba, M. M. F. **Estudo de condutividade, campo elétrico e relâmpagos associados a nuvens de tempestade**. junho, 1997. 180 p. (INPE-6675-TDI/625). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997.

Saba, M. M. F.; Pinto Jr., O.; Solórzano, N. N.; Eybert-Berard, A. **Lightning current observation of an altitude-triggered flash**. Atmospheric Research, v. 76, n. 1-4, p. 402-411, 2005.

Saba, M. M. F.; Ballarotti, M. G.; Pinto Jr, O. **Cloud-to-ground lightning properties in Brazil from high-speed video observations**. Journal of Geophysical Research, Vol. 111, D03101, doi:10.1029/2005JD006415, 2006.

Uman, M. A. **The lightning discharge**. Academic Press, 1987.

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

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

Jerauld, J. et al., 2005 An evaluation of the performance characteristics of the U. S. National Lightning Detection Network in Florida using rocket-triggered lightning, J. Geophys. Res., 110, D19106, doi:10.1029/2005JD005924.

Rakov, V. A. (2005), **Evaluation of the performance characteristics of lightning location systems using rocket-triggered lightning**, VIII Int. Symp. On Lightning Protection (SIPDA VIII), São Paulo, Brazil, November 21-25, pp. 697-715.

Saba et al., 2010 High-speed video observations of positive lightning flashes to ground. In: 30th International Conference On Lightning Protection, Cagliari. Proceedings. 2010.

Saba, M. M. F. et al., 2006 **Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations**, J. Geophys. Res., 111, D03101, doi:10.1029/2005JD006415.

Schulz, W., and G. Diendorfer, 2006 Flash multiplicity and interstroke intervals in Austria, paper presented at 28th International Conference on Lightning Protection, Inst. of Electricity. Installation Eng. of Jpn., Kanazawa, Japan.

Shindo, T., and M. A. Uman 1989 **Continuing current in negative cloud-to-ground lightning**, J. Geophys. Res., 94, 5189-5198.

Saba, M.M.F., M.G. Ballarotti, O. Pinto Jr. (2006), **Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations**, Journal of Geophysical Research, 111, D03101, doi:10.1029/2005JD006415.

SABA, M. M. F.; PINTO JR, Osmar; BALLAROTTI, Maurício Grade. **Relation between lightning return stroke peak current and following continuing current**. Geophysical Research Letters, Washington, EUA, v. 33, n. L23807, p. L23807, 2006.

Ferraz, E. C. (2009), Medidas de corrente contínua em raios nuvem-solo negativos naturais no Brasil: Desenvolvimento de instrumentação e primeiros resultados, 2009, 133 p. (INPE-15786-TDI/1529). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2009.

V. A. Rakov (1999), **Lightning electric and magnetic fields** – University of Florida, Gainesville, FL, USA.