



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



**ESTUDO DO CAMPO ELÉTRICO DAS NUVENS DE  
TEMPESTADE DURANTE A OCORRÊNCIA DE RAIOS  
POSITIVOS**

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

Raphael Bueno Guedes da Silva (FATEC/INFO, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: [raphael\\_bueno\\_guedes@yahoo.com.br](mailto:raphael_bueno_guedes@yahoo.com.br)

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

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

INPE  
São José dos Campos

# **ESTUDO DO CAMPO ELÉTRICO DAS NUVENS DE TEMPESTADE DURANTE A OCORRÊNCIA DE RAIOS POSITIVOS**

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

Raphael Bueno Guedes da Silva (FATEC/INFO, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: [raphael\\_bueno\\_guedes@yahoo.com.br](mailto:raphael_bueno_guedes@yahoo.com.br)

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

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

**COLABORADORA**

Carina Schumann (CCST/INPE, Aluna de Doutorado)

Julho de 2012

## **RESUMO**

Este trabalho, iniciado em agosto de 2011, tem como objetivo a continuidade ao projeto de Iniciação Científica em andamento desde 2010, que tem como objetivo o estudo sobre raios positivos. Os raios positivos correspondem a somente 20% do total do número de raios produzidos durante uma tempestade. Porém os raios positivos são muito mais intensos que os raios negativos.

O objetivo desse trabalho é estudar a assinatura do campo elétrico das nuvens de tempestade durante a ocorrência de raios positivos. Particularmente, será estudado a duração do pulso de quebra de rigidez dielétrica e o tempo de subida da descarga de retorno.

## **ABSTRACT**

The main objective of this work, initiated in August 2011, is the study of positive flashes. Positive flashes correspond approximately only 20% of the total number of flashes produced by a thunderstorm. However, positive flashes are responsible for more damages than the negative flashes.

This work studies the electric field signature of positive flashes. Particularly, it will study: the breakdown pulse duration and the return stroke rise time.

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
FIGURA 1.1 – Fotografia de um relâmpago ocorrido em São José dos Campos .....	2
FIGURA 1.2 – Imagens (a) de um raio intranuvem e (b) de um raio solo-nuvem ....	3
FIGURA 1.3 – Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.....	5
FIGURA 2.1 – Fotografias (a) da câmera Photron Fastcam 512 PCI e (b) do sistema instalado no módulo móvel. ....	10
FIGURA 2.2 – Sequência de imagens obtidas com câmera rápida .....	10
FIGURA 2.3 – Esquema de montagem do campo elétrico.....	11
FIGURA 2.4 – Exemplo de gráfico de campo elétrico versus tempo obtido com o auxílio da antena plana.....	12
FIGURA 2.5 – Torre de observação do CTA/IAE/AEL.....	13
FIGURA 3.1 – Planilha de Controle .....	15
FIGURA 3.2 – Forma de onda de um pulso de quebra de rigidez dielétrica.....	16
FIGURA 3.3 – Definição de T1 e T2.....	17
FIGURA 3.4 – Histograma da duração de T1 .....	17
FIGURA 3.5 – Histograma da duração de T2 .....	17
FIGURA 3.6 – Histograma da duração total do pulso .....	17
FIGURA 3.7 – Forma de onda de um raio positivo.....	18
FIGURA 3.8 – Distribuição do pico normalizado .....	18
FIGURA 3.9 – Representação do processo de determinação do Tempo 0-100% e Tempo 0-90%.....	18
FIGURA 3.10 – Histograma do 0-100% do tempo de subida .....	19
FIGURA 3.11 – Histograma do 10-90% do tempo de subida .....	19

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	1
1.1 Histórico.....	1
1.2 Definição, Tipos de Relâmpagos e Características.....	2
1.2.1 Relâmpagos NS Negativos: Etapas e Características.....	4
1.2.2 Breve Descrição do Relâmpago NS Positivo.....	7
1.3 Pulsos de Quebra de Rigidez Dielétrica e Sua Relevância como Objeto de Estudo .....	7
1.4 Objetivos do Trabalho .....	8
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS</b> .....	9
2.1 Materiais Utilizados.....	9
2.2 Sistema de Imageamento Digital de Alta Velocidade .....	9
2.3 Sistema de Medição de Campo Elétrico .....	11
2.4 Local de Observação.....	12
2.5 Procedimento das Observações .....	13
<b>3. RESULTADOS</b> .....	15
3.1 Campanha de Coleta de Dados 2011-2012.....	15
3.2 Análise de Dados .....	15
3.3 Resultados Sobre a Quebra de Rigidez Dielétrica .....	16
3.4 Comparações Com Trabalhos Anteriores .....	20
<b>4. CONCLUSÃO</b> .....	21
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	22

# 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 dezenas de 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 (Campos 2006). 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 (Campos 2006).

Os históricos de dados de relâmpagos registrados no Brasil foram:

- Parâmetros fornecidos pela BrasilDat, um conjunto de 49 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 câmera rápidas 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; Campos et al., 2009; Campos e Saba 2009).

## 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; (a) aqueles que permanecem no céu (chamado Intranuvem ou IN) e, (b) aqueles que tocam o solo (Nuvem-solo, NS ou Solo-nuvem, SN) (Campos, 2006).



FIGURA 1.2 – Imagens (a) de um raio intranuvem e (b) de um raio solo-nuvem

FONTE: (a) Robson (2009)

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 possuem uma de suas terminações no solo, isto é, 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 raios nuvem-solo podem ser subdivididos em nuvem-solo negativo e em nuvem-solo positivo, de acordo com a polaridade da carga que transferem para o solo no momento de sua ocorrência.

Os relâmpagos nuvem-solo negativos tem origem no centro negativo de cargas da nuvem e, em geral, são mais frequentes que os raios positivos (Campos, 2006). 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 menos frequente que os nuvem-solo, originando-se geralmente de pontos elevados tais como torres, edifícios, montanhas e árvores. (McEachron 1939)

### 1.2.1 Relâmpagos NS Negativos: Etapas e Características

Um relâmpago nuvem-solo negativo possuem etapas com características que podem ser identificadas de acordo com os equipamentos que foram registrados. As etapas definidas por Uman, 1969 são: (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 (Rakov et al., 2003);

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 (Rakov et al., 2003) (FIGURA 1.3b);

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 (Rakov et al., 2003);

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 (Rakov et

al., 2003). Em média, ocorrem três descargas por relâmpago, mas há registros de casos com até 26 descargas (FIGURA 1.3d,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 (Rakov et al., 2003) (FIGURA 1.3f,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 (Rakov et al., 2003) (FIGURA 1.3g,i);

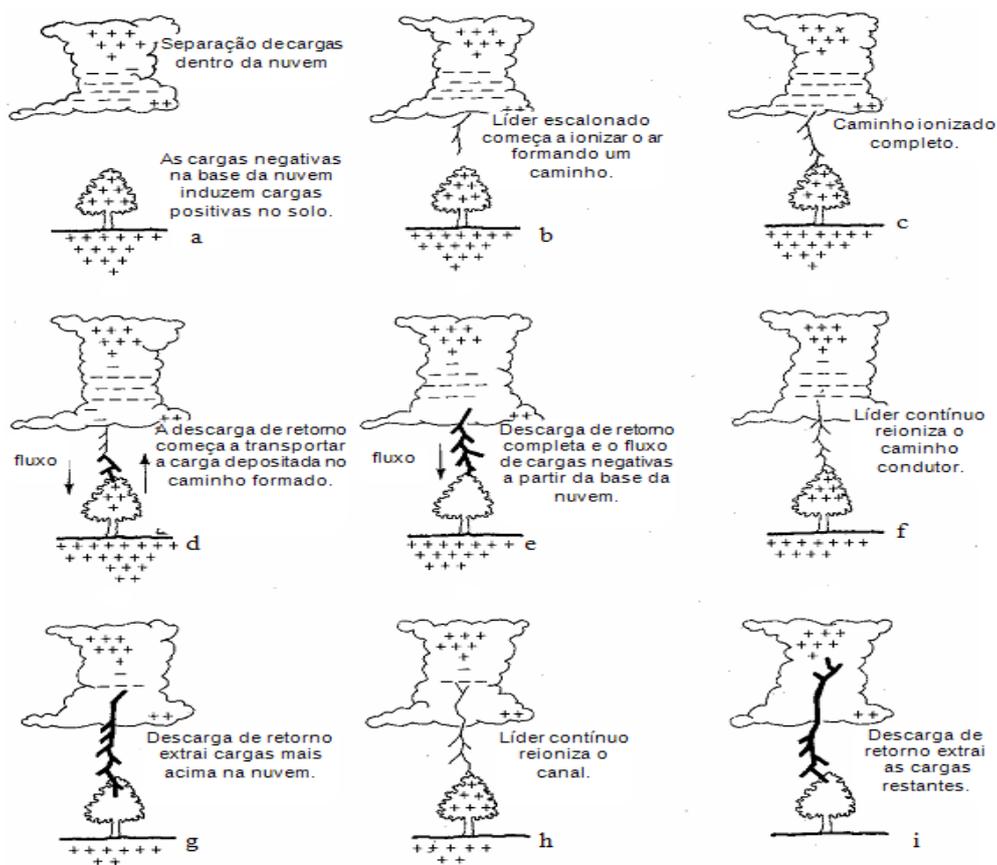


FIGURA 1.3 – Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo.

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 et al.(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 “correntes contínuas muito curtas”. 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” (Campos 2006). 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) (Campos 2006). 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 consequente 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 (Saba et al., 2010, Schumann 2012) . Costumam também apresentar corrente contínua mais longa (transferem maior quantidade de carga elétrica para o solo) do que os NS negativos (Saba et al., 2010), tornando-se mais destrutivos e sendo responsáveis pela maioria dos incêndios.

## **1.3 Pulsos de Quebra de Rigidez Dielétrica e Sua Relevância como Objeto de Estudo**

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.
- Obter novos dados a respeito dos pulsos de quebra de rigidez dielétrica (PB) que precedem a ocorrência das descargas (iniciais e subsequentes em novo canal) de um relâmpago positivo.
- 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 *Photron Fastcam 512 PCI*, fabricada pela *Photron*;
- Microcomputador com a interface PCI da câmera rápida e os softwares *Photron Motion Tools 1.2* 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

As câmeras de alta velocidade trabalharam com tempo de resolução e tempos de exposição variando de 83 microssegundos (11.800 quadros por segundo) a 10 milissegundos (100 quadros por segundo). A duração mínima de gravação de todas as câmeras foi de 2 segundos; Saraiva et al. (2010), em um estudo com múltiplas câmeras, relatou uma duração máxima dos relâmpagos negativos de 1,4 s, sendo que em 99% de 400 casos a duração foi inferior a 1s.

Uma sequência de imagens obtidas com uma câmera rápida de um líder em direção ao solo pode ser visualizada na Figura 2.2.

Detalhamentos sobre a precisão da tecnologia usada nas câmeras de alta velocidade para observações de raios e outros detalhes sobre os sistemas de medição, podem ser encontrados nos trabalhos de Saba et al. (2006a), Schulz e Saba (2009) e Warner e Orville (2009). A FIGURA 2.1 mostra duas fotografias: (a) câmera Photron e seu *hardware de interface* com o PC, (b) sistema instalado num módulo móvel para facilitar o posicionamento da câmera durante as aquisições de imagens.

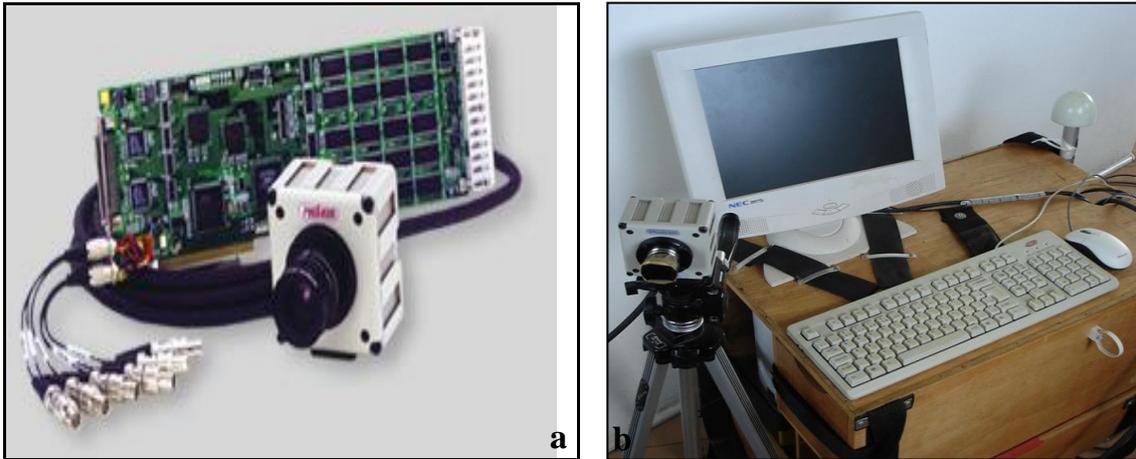


FIGURA 2.1 – Fotografias (a) da câmera *Photron Fastcam 512 PCI* e (b) do sistema instalado no módulo móvel.

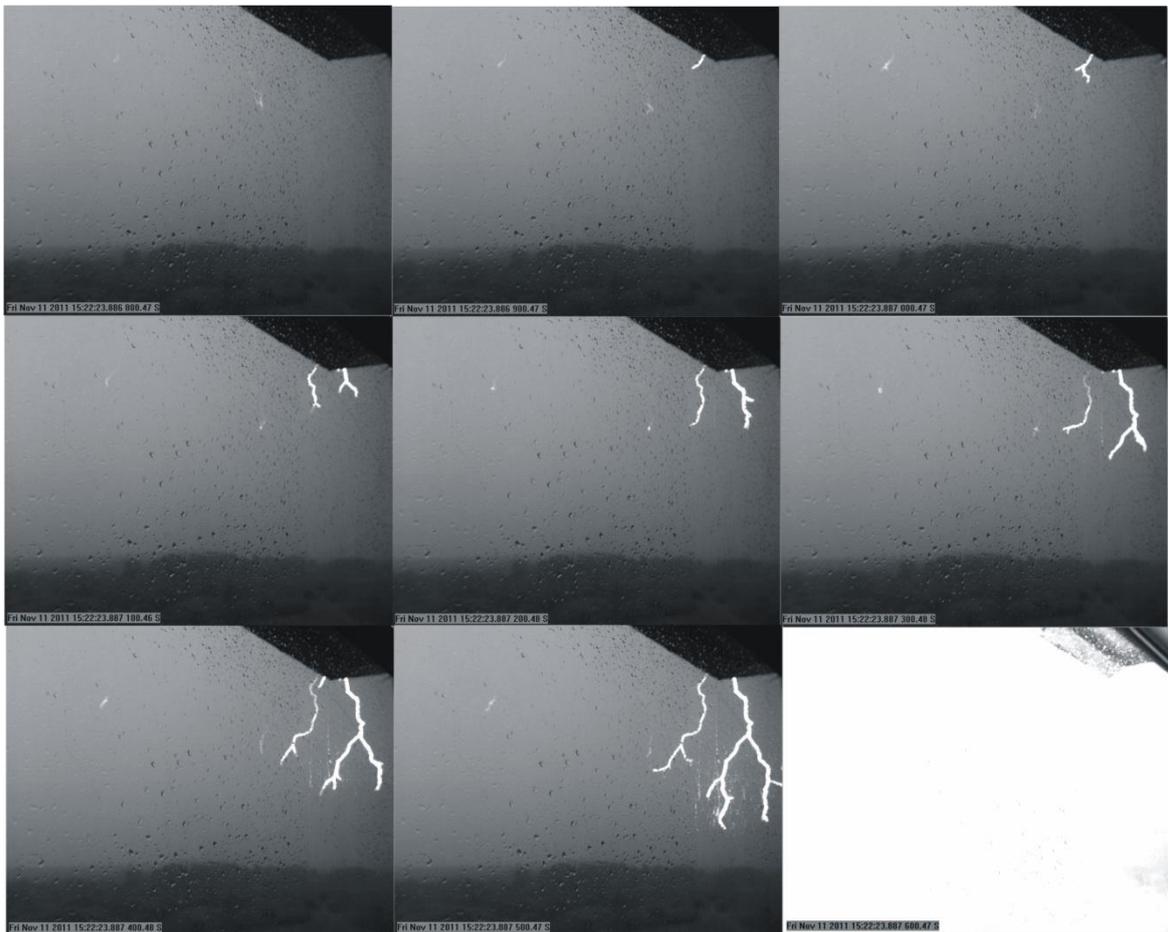


FIGURA 2.2 – Sequência de imagens obtidas com câmera rápida

FONTE: Schumann (2012, p. 31)

## 2.3 Sistema de Medição 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 2.3 mostra o esquema de montagem do campo elétrico e a FIGURA 2.4 mostra um exemplo de gráfico do campo elétrico de um relâmpago *versus* tempo obtido com seu auxílio.

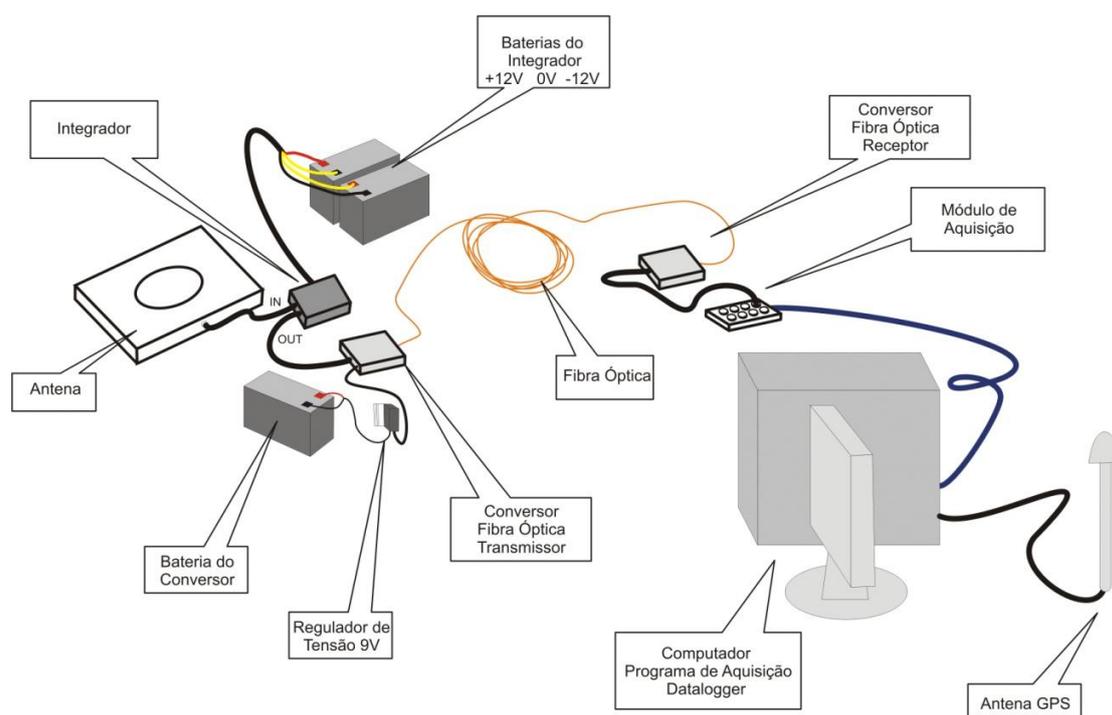


FIGURA 2.3 – Esquema de montagem do campo elétrico.

FONTE: Schumann (2012, p. 37)

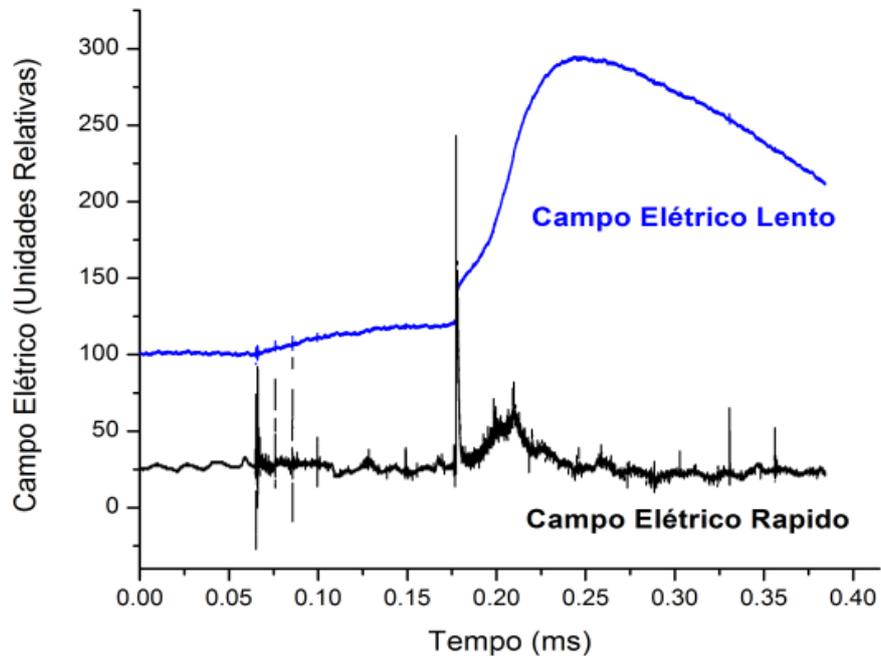


FIGURA 2.4 – Exemplo de gráfico de campo elétrico versus tempo obtido com o auxílio da antena plana. A imagem mostra o instante de ocorrência de uma descarga de retorno (pico maior positivo) juntamente com os pulsos de quebra de rigidez (pequenos pulsos bipolares de pequena amplitude).

FONTE: Schumann (2012, p. 67)

## 2.4 Local de Observação

Para as observações realizadas utilizou-se a Torre de Antenas do IAE/AEL no DCTA, locada no município de São José dos Campos (situado no Vale do Paraíba, Estado de São Paulo), gentilmente cedida ao INPE-CCST-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 2.5 exhibe uma foto do local.



FIGURA 2.5 – 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.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Campanha de Coleta de Dados 2011-2012

A Campanha de aquisição de novos dados de tempestades teve início em novembro de 2011 e encerrou em abril de 2012. Durante esse tempo foram filmados 168 raios.

#### 3.2 Análise de Dados

Em paralelo à obtenção dos dados realizamos a sua organização e redução, possibilitando a seleção dos casos julgados úteis para uma análise mais detalhada dentro do escopo deste estudo.

Com os dados obtidos pela campanha 2011-2012 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	Duração da CC (ms)
11	SJC	M11R1	HS2	2011	11	10	20	46	54,462750	462	-2335	v	cg	3,750
11	SJC	M11R1	HS2	2011	11	10	20	46	54,464000	464	-2330	v	cg	142,250
11	SJC	M11R1	HS2	2011	11	10	20	46	54,476000	476	-2282	v	m	
11	SJC	M11R1	HS2	2011	11	10	20	46	54,484500	484	-2249	v	m	
11	SJC	M11R1	HS2	2011	11	10	20	46	54,491250	491	-2222	v	m	
11	SJC	M11R1	HS2	2011	11	10	20	46	54,643250	643	-1613	v	ic	
12	SJC	M11R1	HS2	2011	11	10	20	46	54,704000	704	-1370	v	ic	
11	SJC	M11R2	HS2	2011	11	10	20	50	47,609750	609	-2193	d	ic	
11	SJC	M11R2	HS2	2011	11	10	20	50	47,627750	627	-2121	v	cg	4,750
11	SJC	M11R2	HS2	2011	11	10	20	50	47,653000	653	-2020	v	cg	167,500
11	SJC	M11R2	HS2	2011	11	10	20	50	47,659250	659	-1995	v	m	
11	SJC	M11R3	HS2	2011	11	10	21	0	54,994000	994	-2417	d	ic	
11	SJC	M11R3	HS2	2011	11	10	21	0	55,009750	9	-2354	d	ic	
11	SJC	M11R4	HS2	2011	11	10	21	7	28,883500	883	-2898	v	cg	306,500
11	SJC	M11R4	HS2	2011	11	10	21	7	28,897250	897	-2843	v	m	
11	SJC	M11R4	HS2	2011	11	10	21	7	29,236750	236	-1485	v	ic	
11	SJC	M11R5	HS2	2011	11	10	21	13	55,396750	396	-2402	d	ic	
11	SJC	M11R6	HS2	2011	11	10	21	16	26,583750	583	-2180	v	ic	
11	SJC	M11R6	HS2	2011	11	10	21	16	26,618000	618	-2043	v	ic	
11	SJC	M11R6	HS2	2011	11	10	21	16	26,708750	708	-1680	v	ic	
11	SJC	M11R6	HS2	2011	11	10	21	16	26,863500	863	-1061	v	ic	
11	SJC	M11R6	HS2	2011	11	10	21	16	26,996500	966	-529	d	ic	
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	28,818500	818	-4050	v	cg	0,250
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	28,836750	836	-3977	v	cg	0,750
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	28,861250	861	-3879	v	cg	1,500
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	28,894250	894	-3747	v	cg	0,500
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	28,941000	941	-3560	v	cg	1,500
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	28,978250	978	-3411	v	cg	0,750
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	28,982500	982	-3394	v	cg	0,750
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	29,002500	2	-3315	v	cg	0,750
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	29,023000	23	-3232	v	cg	0,500
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	29,059500	59	-3086	v	cg	0,500
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	29,084250	84	-2987	v	cg	0,500
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	29,111750	111	-2877	v	cg	0,500
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	29,113500	113	-2870	v	cg	0,750
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	29,141750	141	-2757	v	cg	0,750
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	29,186250	186	-2579	v	cg	2,000
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	29,187000	187	-2576	v	m	
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	29,244000	244	-2348	v	cg	1,750
11	SJC	M11R7	HS2	2011	11	10	21	19	29,244750	244	-2345	v	m	
11	SJC	M11R8	HS2	2011	11	10	21	34	6,719250	719	-3238	v	cg	5,000
11	SJC	M11R8	HS2	2011	11	10	21	34	6,721750	721	-3228	v	m	
11	SJC	M11R8	HS2	2011	11	10	21	34	6,725750	725	-3212	v	ic	
11	SJC	M11R8	HS2	2011	11	10	21	34	6,759000	759	-3079	v	cg	4,250
11	SJC	M11R8	HS2	2011	11	10	21	34	6,790000	790	-2955	v	cg	4,250
11	SJC	M11R8	HS2	2011	11	10	21	34	6,792000	792	-2947	v	m	

FIGURA 3.1 – Planilha de Controle

### 3.3 Resultados Sobre a Quebra de Rigidez Dielétrica

#### 1) Pulsos de breakdown ou pulsos da quebra de rigidez dielétrica

##### a) Características gerais

Um trem de pulsos bipolares(chamados de pulso de breakdown) ocorrem alguns milissegundos antes da primeira descarga de retorno em um raio nuvem-solo. A forma de onda típica dos pulsos de quebra de rigidez é apresentada na figura 3.2

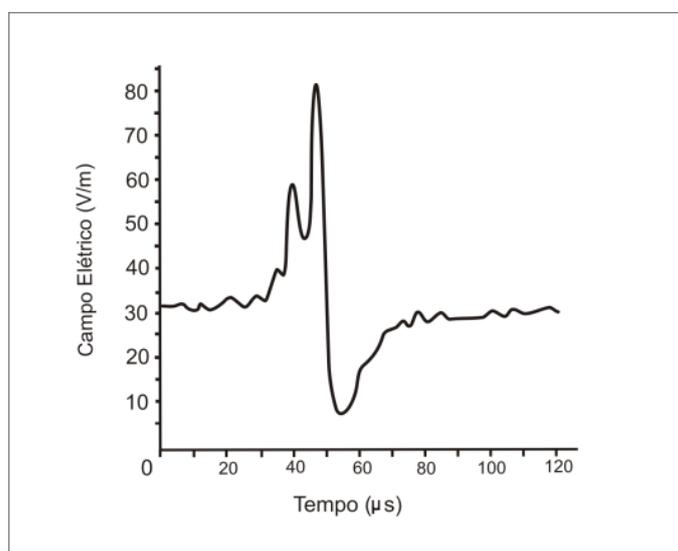


FIGURA 3.2 – Forma de onda de um pulso de quebra de rigidez dielétrica

##### b) Duração do pulso de quebra de rigidez dielétrica

Gomes e Cooray (2004) analisaram detalhadamente a forma de pulso. Os autores definem nos pulsos bipolares T1 como a duração aproximada da primeira parcela do ciclo da descarga e T2 a duração da segunda parcela do ciclo. Assim, T1 + T2 é igual à largura total do pulso. A Figura 3.3 apresenta a definição de T1 e T2.

A figura 3.4 mostra os valores médios encontrados de T1, a figura 3.5 mostra os valores de T2 e a figura 3.6 mostra os valores médios da largura total do pulso (T1+T2).

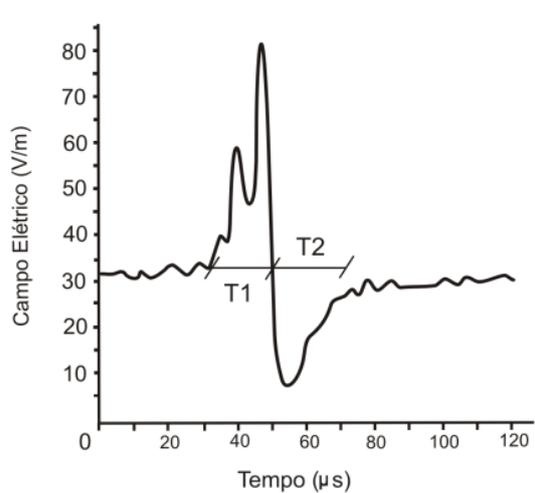


FIGURA 3.3 – Definição de T1 e T2

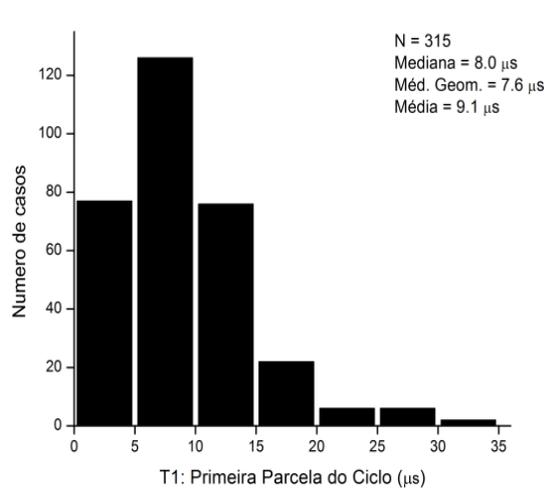


FIGURA 3.4 – Histograma da duração de T1

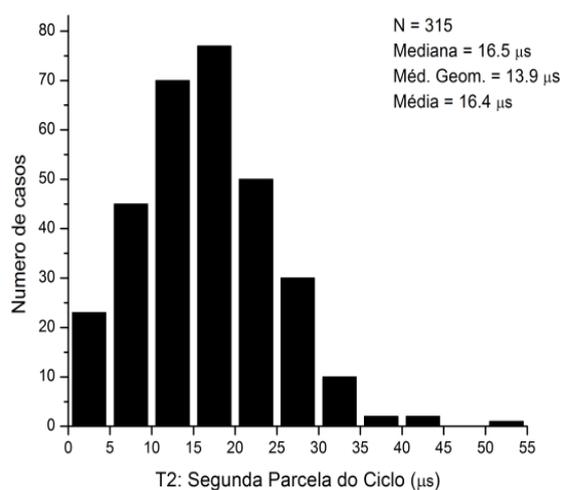


FIGURA 3.5 – Histograma da duração de T2

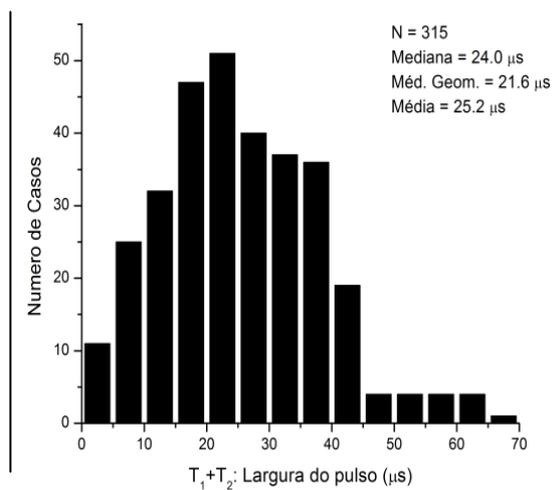


FIGURA 3.6 – Histograma da duração total do pulso

c) Pico do campo elétrico das descargas de retorno

As amplitudes do pico de campo elétrico das descargas de retorno positivas (figura 3.7), quando normalizada para a distância 100 km estão distribuídos na faixa de 3.1 a 39.2V/m com média, média geométrica (GM) e mediana igual 17,3 V/m, 13,4 V/m e 12,6 V/m, respectivamente (Figura 3.8). Os valores encontrado por Nag et al. (2010) na Flórida (média e GM igual 21,7 e 18,1 V/m, respectivamente), são superiores aos valores encontrados na presente análise.

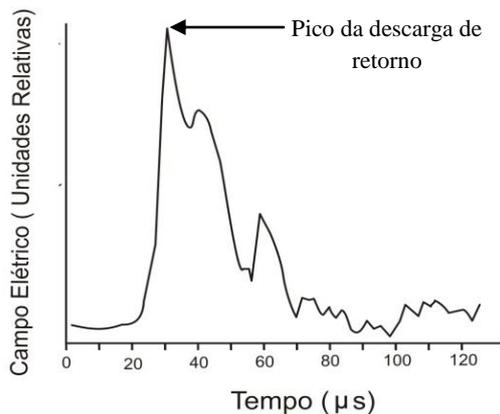


FIGURA 3.7 – Forma de onda de um raio positivo

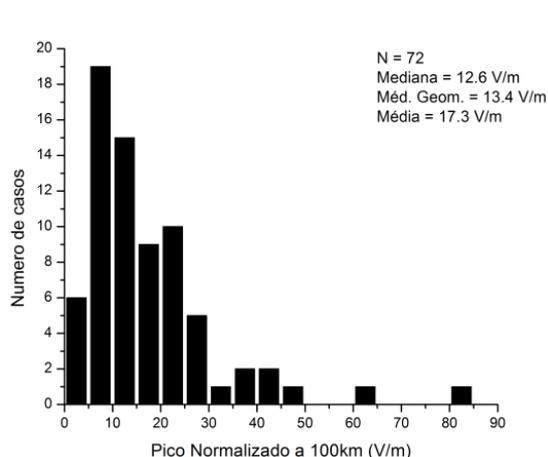


FIGURA 3.8 – Distribuição do pico normalizado

d) Tempo de subida das descargas de retorno

O parâmetro tempo de subida da descarga de retorno é o intervalo de tempo entre 0 a 100% do valor do pico do campo elétrico ou entre 10 a 90% do valor deste. O uso do intervalo de tempo entre 10 e 90% do valor do pico (T10-90) é mais usual devido ao ruído do sinal, não podemos afirmar com certeza o ponto de início e fim da descarga. (Figura 3.9)

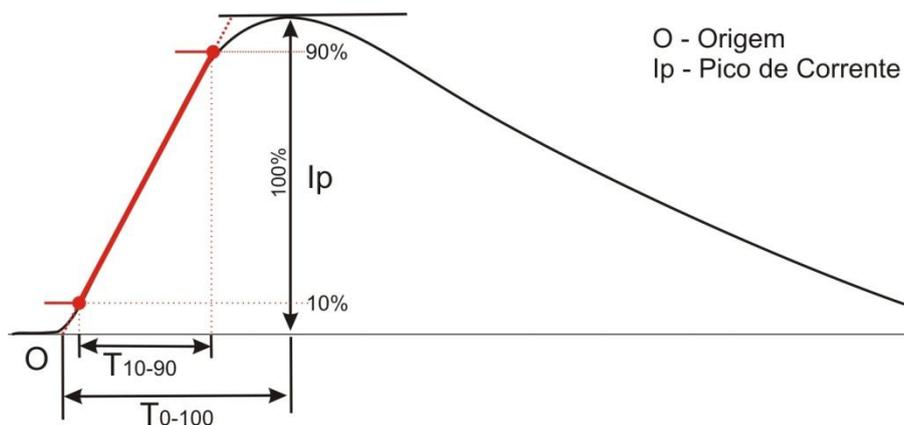


FIGURA 3.9 – Representação do processo de determinação do Tempo 0-100% e Tempo 0-90%

FONTE: Schumann (2012, p. 69)

A distribuição 0-100% do tempo de subida observada é mostrada na figura 3.10. Os dados estão distribuídos ao longo da faixa de 2,0 a 17,2 $\mu$ s, sendo a média e a média geométrica de 9,5 e 8,9 $\mu$ s respectivamente. Nag et al. (2010) encontraram valores parecidos (7,77 e 6,92 $\mu$ s, média e GM respectivamente).

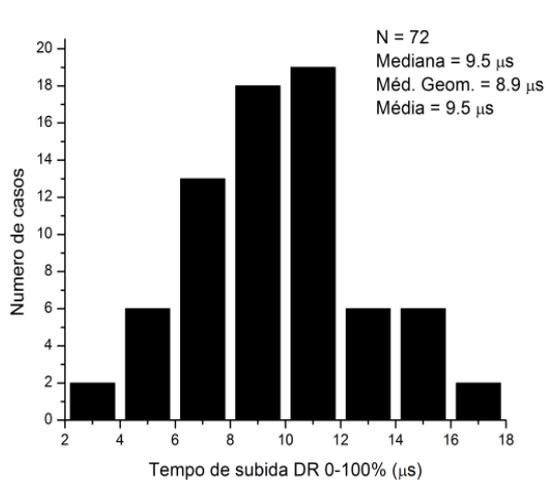


FIGURA 3.10 – Histograma do 0-100% do tempo de subida

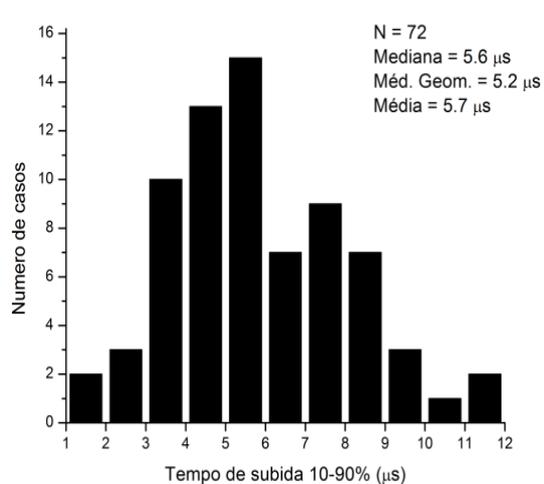


FIGURA 3.11 – Histograma do 10-90% do tempo de subida

### 3.4 Comparações Com Trabalhos Anteriores

Tabela 3.1 – Comparação entre estudos sobre duração do pulso de quebra de rigidez dielétrica

Valores Médios	Este Trabalho	Weidman e Krider (1979)	Ushio et al.(1998)	Qie et al. (2002)	Gomes e Cooray (2004)
Primeira metade do ciclo - $T_1$ ( $\mu$ s)	9.1 (315)	7.8 (66)	-	-	16 (25)
Segunda metade do ciclo - $T_2$ ( $\mu$ s)	16.4 (315)	-	-	-	15 (25)
$T_1 + T_2$ ( $\mu$ s)	25.2 (315)	41 (117)	18.8 (132)	27 (50)	31 (25)

Tabela 3.2 – Comparação entre estudos sobre tempo de subida e pico de corrente da descarga de retorno

	Casos	Mediana	GM	Média
<i>0-100% Tempo de subida (<math>\mu</math>s)</i>				
Este trabalho	72	9,5	8,9	9,5
Nag et al. (2010)	62	7,19	6,92	7,77
Cooray (1986)	20	--	--	8,9
<i>10-90% Tempo de subida (<math>\mu</math>s)</i>				
Este trabalho	72	5,6	5,2	5,7
Nag et al. (2010)	62	3,71	3,4	4,02
Cooray (1986)	15	--	--	6,2
<i>Amplitude do Pico Normalizado a 100 km (V/m)</i>				
Este trabalho	66	12,6	13,4	17
Nag et al. (2010)	48	--	18,1	21,7
Cooray et al. (2004)	46	--	--	11,5

## 4. CONCLUSÃO

Este trabalho deu continuidade ao estudo iniciado no ano passado sobre o campo elétrico das nuvens de tempestade, mais precisamente ao processo de quebra de rigidez dielétrica. Neste ano estudamos a duração do pulso de quebra de rigidez dielétrica e o tempo de subida da descarga de retorno.

As variações de campo elétrico para os raios nuvem-solo positivos apresentam formas de ondas similares. Duas regiões de pulsos de alta frequência, uma relacionada com os pulsos de quebra de rigidez dielétrica e a outra com a descarga de retorno foram analisadas.

Os pulsos de quebra de rigidez dielétrica com a mesma polaridade da descarga de retorno foram observados em 95% dos casos. Os valores da duração dos pulsos são similares no Brasil, na Suécia e na China, porém maiores do que a duração no Japão.

O tempo de subida destes pulsos de quebra de rigidez tiveram seus valores de 10-90% similares às variações no campo elétrico causadas pelas descargas de retorno (Silva, 2011). Esse resultado juntamente com o resultado encontrado para a largura do pulso pode ser um dos motivos que os sistemas de localização classifiquem erroneamente com descargas de retorno.

Os valores de amplitudes dos picos da descarga de retorno quando normalizados para 100 km foi de 13,4 V/m. Cooray et al (2004) encontrou valores médios 50% menores.

Os processos que dão origem aos relâmpagos ainda não são bem conhecidos e os resultados aqui apresentados são uma contribuição nesta área. A partir de trabalhos como este é que provavelmente no futuro teremos uma rede de proteção contra raios muito mais eficiente.

## 5. 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.

CAMPOS, L. Z. S. **Características dos pulsos de quebra de rigidez de relâmpagos.** In: SICINPE – 2006. São José dos Campos. 2006. (INPE-14021-PRE/9196).

Campos, L. Z. S., Saba M. M. F., Pinto Jr. O., e Ballarotti M. G., **Waveshapes of continuing currents and properties of M-components in natural positive cloud-to-ground lightning,** Atmospheric Research, 91, 416-424, doi:10.1016/j.atmosres.2008.02.020, 2009.

Campos, L. Z. S., e Saba M. M. F., **Comment on “Computer simulations on sprite initiation for realistic lightning models with higher-frequency surges”** by T. Asano, T. Suzuki, Y. Hiraki, E. Mareev, M. G. Cho, and M. Hayakawa, Journal of Geophysical Research, 114, A12324, doi:10.1029/2009JA014335 , 2009.

Chandima Gomes, Vernon Cooray, **Radiation field pulses associated with the initiation of positive cloud to ground lightning flashes,** Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 66 (2004) 1047 – 1055, 2004.

Cooray, V. **A novel method to identify the radiation fields produced by positive return strokes and their submicrosecond structure.** Journal of Geophysical Research 91(D7): doi: 10.1029/OJGREAA0000910000D7007907000001. issn: 0148-0227, 1986.

Cooray V., Montano R. e Rakov V. “**A model to represent negative and Positive lightnings first strokes with connectins leaders**” Journal of Electrostatics 60 (2004) 97-109 doi:20.1016/j.elstat.2004.01.016

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.

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

McEachron, K. B., **Lightning to the Empire State Building**. J. Franklin Inst., 227, 149–217, 1939.

Nag A., Rakov, V. A., Tsalikis D. and Cramer, J. A., **Characterization of positive cloud-to-ground lightning discharges**, 30th International Conference on Lightning Protection ICLP– Caligari – Italy, 2010

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.

Qie ,X. Yu, Y., Wang, D., Wang, H. and Chu, R., **Characteristics of Cloud-to-Ground Lightning in Chinese Inland Plateau**, Journal of Meteorological Society of Japan, Vol 80, No.4, pp745-754, 2002.

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

Robson, D. *Imagens de diversos tipos de relâmpagos – relâmpago intranuvem*. [S.l.: s.n]. Disponível em <http://www.wvlightning.com/types.shtml>.

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.

Saba, M. M. F., Ballarotti M. G., e Pinto Jr. O., **Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations**, J. Geophys. Res., 111, D03101, doi:10.1029/2005JD006415, 2006a.

Saba, M. M. F., Schulz W., Warner T. A., Campos L. Z. S., Schumann C., Krider E. P., Cummins K. L., e Orville R. E., **High-speed video observations of positive lightning flashes to ground**, J. Geophys. Res., 115, doi:10.1029/2010JD014330, 2010.

Saraiva, A. C. V., Saba M. M. F., Pinto Jr. O., Cummins K. L., Krider E. P., e Campos L. Z. S., **A comparative study of negative cloud-to-ground lightning characteristics in São Paulo (Brazil) and Arizona (United States) based on high-speed video observations**, Journal of Geophysical Research, 115, D11102, doi:10.1029/2009JD012604, 2010.

Schulz, W., e Saba M. M. F., **First results of correlated lightning video images and electric field measurements in Austria**, paper presented at X Int. Symposium on Lightning Protection, Inst. of Electrotech. and Energy, Curitiba, Brasil, 2009.

Schumann C., **Caracterização Dos Raios Positivos Através De Câmeras De Alta Velocidade E Sensores De Campo Elétrico**. 2012. Tese (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012.

SILVA, R. B. G.; SABA, M. M. F. **Estudo dos intervalos de tempo entre a quebra de rigidez dielétrica e a descarga de retorno dos raios positivos**. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO INPE (SICINPE), 2011, São José dos Campos. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3AHK4ML>>.

Tomo-o Ushio, Zen-Ichiro Kawasaki, Kenji Matsu-ura, and Daohong Wang, **Electric fields of initial breakdown in positive ground flash**, Journal of Geophysical Research, VOL.103, NO. D12, PAGES 14, 135 – 14, 139. 1998.

Uman. M A . **Lightning McGraw-Hill**. 1969

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.

Warner, T. A., e Orville R. E., **High-speed observations of faint positive lightning leaders and lightning spectra**, Eos Transactions AGU, 90(52), Fall Meeting Supplement, Abstract AE41A-02, 2009.

Weidman, C. D. and E. P. Krider, 1979: **The radiation field wave forms produced by intracloud lightning discharge processes**. J. Geophys. Res., Vol. 84, No. C6, pp. 3159-3164, paper number 9C0316.

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