

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**INPE-8173-TDI/757**

**ESTUDO DA FORMA DE ONDA DE CAMPO ELÉTRICO DE  
RELÂMPAGOS**

Fernando Júnio de Miranda

Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba e Osmar Pinto Júnior, aprovada em 29 de fevereiro de 2000.

INPE  
São José dos Campos  
2001

551.594.22

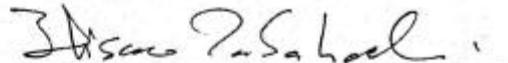
MIRANDA, F. J.

Estudo da forma de onda de campo elétrico de relâmpagos / F. J. Miranda. - São José dos Campos: INPE,2000.  
119p. - (INPE-8173-TDI/757).

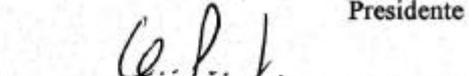
1.Descarga de retorno. 2.Descargas K. 3.Relâmpagos.  
4.Campo elétrico. 5.Descarga atmosférica. I.Título.

Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de **Mestre** em **Geofísica Espacial**.

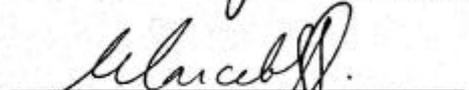
Dr. Hisao Takahashi

  
\_\_\_\_\_  
Presidente

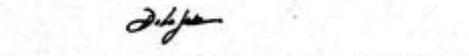
Dr. Osmar Pinto Júnior

  
\_\_\_\_\_  
Orientador

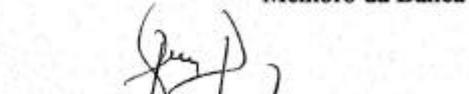
Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba

  
\_\_\_\_\_  
Orientador

Dr. Delano Gobbi

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca

Dr. José Pissolato Filho

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca  
Convidado

Candidato (a) : Fernando Júnio de Miranda

São José dos Campos, 29 de fevereiro de 2000.

*Viver,  
eis o sentido da vida.  
Fernando, 2000*

A Deus e a meus pais, os quais sempre me apoiaram, dedico.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar ao Deus Trino, quem me supre todas as necessidades, desde as materiais, emocionais e espirituais, muitas delas direta e outras indiretamente por intermédio dos meus pais.

A meus pais, incluindo também os meus familiares mais próximos, pelo amor, pela atenção e pelo incentivo deles para comigo.

Ao amigo José Álvaro Ferreira e família, pelo conforto e pelo carinho a mim dedicados.

Aos Doutores Osmar Pinto Júnior, Iara R. C. de Almeida Pinto, Marcelo Magalhães Fares Saba e Maria Virgínia Alves, pela amizade, compreensão e pelos conhecimentos a mim transmitidos.

A todos os membros do grupo de eletricidade atmosférica (ELAT), principalmente ao amigo Evandro Carvalho Ferraz, quem esteve comigo nesta jornada desde o início ao fim.

À Cláudia Teresa dos Santos e à sua família, pelo carinho e pela presença nesta importante fase da minha vida.

Às bibliotecárias, pela atenção a mim concedida durante a confecção deste documento.

## **RESUMO**

Neste trabalho são analisadas formas de onda de campo elétrico da radiação eletromagnética gerada por relâmpagos ocorridos na cidade de São José dos Campos e vizinhança. Para a aquisição das formas de onda de campo elétrico foi utilizado um aparato composto por uma antena ligada a uma eletrônica, a qual processa o sinal proveniente da antena e o envia a uma placa digitalizadora com uma taxa de aquisição de  $37\mu\text{s}$ , instalada em um microcomputador. O objetivo deste trabalho foi, a partir das formas de onda, determinar o tempo entre descargas de retorno sucessivas, o tempo entre as descargas K, a duração das variações preliminares, bem como observar formas de onda de relâmpagos no céu e formas de ondas atípicas. Não foi encontrada uma dependência do intervalo de tempo entre descargas de retorno com as ordens das descargas de retorno. O tempo médio entre as descargas de retorno é de 69ms. Também não foi encontrada uma dependência do tempo entre as descargas K com as ordens das descargas de retorno entre as quais as descargas K ocorrem. O tempo médio entre as descargas K é de 18,5ms. As variações preliminares estudadas têm uma duração média de 118ms. Nenhuma das formas de onda de campo elétrico dos relâmpagos no céu se adequou ao padrão proposto no passado, porém, elas se diferem bem das formas de onda de campo elétrico dos relâmpagos nuvem-solo, de forma que, pode-se identificar um relâmpago como sendo nuvem-solo ou no céu através da sua forma de onda de campo elétrico sem que haja a sua identificação visual. Formas de ondas atípicas de campo elétrico também foram observadas.

## **STUDY OF THE ELECTRIC FIELD WAVEFORM OF LIGHTNING**

### **ABSTRACT**

In this work electric field waveforms of the electromagnetic radiation generated by lightning which occurred in and around the city of São José dos Campos are analyzed. The acquisition of the electric field waveforms was done by an apparatus which was composed by an antenna connected to an electronics, which processes the signal provided by the antenna and send it to a digitizer board with an acquisition rate of  $37\mu\text{s}$ , installed in a microcomputer. The goal of this work was to determine the time between return strokes, the time between K discharges, the duration of the preliminary variations, as well as to observe electric field waveforms of cloud lightning and unusual waveforms. It was not found any dependence of the time between return strokes on the orders of the return strokes. The mean time between the return strokes was 69ms. In addition, it was not found any dependence of the time between K discharges on the orders of the return strokes in which they occur between. The mean time between K discharges was 18.5ms. The preliminary variations analyzed have a mean time duration of 118ms. None of the electric field waveforms of the cloud lightning fit to the standard proposed in the past. They are very different from the cloud to ground lightning electric field waveforms, so that we can identify a lightning as cloud to ground or cloud lightning without visual identification. Unusual electric field wave forms were observed too.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	19
2.1 - Relâmpagos, suas características e campo elétrico gerado por eles .....	19
2.2 - Processos que ocorrem no relâmpago nuvem-solo .....	33
2.2.1 - Variações preliminares .....	33
2.2.2 - Descarga de retorno .....	35
2.2.3 - Processos após a primeira descarga de retorno .....	41
2.3 - Outros tipos de relâmpagos .....	43
2.3.1 - Relâmpagos positivos .....	43
2.3.2 - Relâmpagos solo-nuvem .....	45
2.3.3 - Relâmpagos no céu .....	48
2.3.4 - Relâmpagos induzidos .....	48
2.4 - Outras situações em que ocorrem relâmpagos .....	49
<b>CAPÍTULO 3 - TÉCNICA EXPERIMENTAL E METODOLOGIA DE TRABALHO</b> .....	53
3.1 - Técnica experimental .....	53
3.2 - Metodologia de trabalho .....	61
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	63
4.1 - Tempo médio entre descargas de retorno .....	63
4.2 - Tempo médio entre as descargas K .....	76
4.3 - Duração média das variações preliminares .....	86
4.4 - Observação da forma de onda de relâmpagos no céu .....	90
4.5 - Formas de onda típicas e atípicas de campo elétrico obtidas no Brasil .....	96
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES</b> .....	111
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	115

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

O tema deste trabalho é a radiação eletromagnética gerada pelos relâmpagos. Mais especificamente, ele é resultado de observações de formas de ondas do campo elétrico da radiação dos relâmpagos, através das quais puderam ser estudados alguns processos que neles ocorrem. As formas de onda de campo elétrico utilizadas neste trabalho foram obtidas a partir de relâmpagos ocorridos na cidade de São José dos Campos, Brasil, em tempestades que ocorreram no período de outubro de 1998 a fevereiro de 1999. Este trabalho é inédito no Brasil e inicia o estudo de relâmpagos a partir das formas de onda do campo elétrico da radiação eletromagnética. Os relâmpagos são descargas intensas que ocorrem na atmosfera, oriúndos de nuvens de tempestade, que, ao contrário do que parece, são compostos por vários processos. As correntes que compõem estes processos podem variar de centenas de *ampères* à centenas de milhares de *ampères*. Os relâmpagos que saem da nuvem e se dirigem ao solo, são chamados de nuvem-solo e iniciam-se com algumas descargas dentro da nuvem, chamadas de descargas de *breakdown*. Estas descargas ao saírem da nuvem, se propagam de forma intermitente pela atmosfera e recebem o nome de líder escalonado. Após o líder escalonado, ocorre uma descarga bem intensa da nuvem para o solo, chamada descarga de retorno. Em alguns casos a corrente da descarga de retorno pode atingir valores entre 100 a 300 kA. A descarga de retorno é o processo mais intenso no relâmpago e é durante sua ocorrência que ocorre a emissão de energia eletromagnética em maior potência. As variações de campo elétrico medido no solo, associadas ao início do relâmpago, desde as descargas de *breakdown* até o início da primeira descarga de retorno, são conhecidas por alguns pesquisadores como variações preliminares. Relâmpagos que apresentam mais de uma descarga de retorno são chamados de múltiplos. Entre duas descargas de retorno consecutivas podem ocorrer descargas mais fracas dentro da nuvem chamadas de descargas K. O objetivo deste trabalho é a determinação de características dos relâmpagos ocorridos no Brasil a partir da forma de onda do campo elétrico da radiação eletromagnética gerada pelo relâmpago. Estas características são: o tempo entre as

descargas de retorno, verificando se este tempo é função da ordem das descargas de retorno; o número típico de descargas de retorno presentes nos relâmpagos, ou seja a multiplicidade típica dos relâmpagos; o tempo entre as descargas K, verificando se este tempo também é função da ordem das descargas de retorno entre as quais as descargas K ocorrem; a duração das variações preliminares; observação e caracterização das formas de onda de campo elétrico de relâmpagos no céu (relâmpagos que não tocam o solo), verificando se suas formas de onda de campo elétrico se diferem das formas de onda de campo elétrico de relâmpagos nuvem-solo, o que permitiria a identificação dos relâmpagos apenas pela sua forma de onda de campo elétrico, sem a necessidade da visualização do canal.

Os aparatos utilizados na obtenção das formas de onda de campo elétrico pertencem ao grupo de eletricidade atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e encontram-se instalados estrategicamente em uma torre localizada no Centro Técnico Aeroespacial (CTA) em São José dos Campos (45,864° W, 23,215° S), a uma altitude de 630m em relação ao nível do mar. Estrategicamente, pelo fato de ser um local favorável à observação visual dos relâmpagos e também pelo fato de estar mais afastado de fontes de ruídos. Para obtenção das formas de onda foi utilizada uma antena (haste metálica) conectada a uma eletrônica que tem a função de amplificar e selecionar o sinal captado pela antena, conduzindo-o ao microcomputador.

O corpo desta dissertação de mestrado é dividido em 7 partes, sendo elas: resumo, introdução, revisão bibliográfica, metodologia e técnica experimental, resultados e discussão, conclusões e referências bibliográficas. Na revisão bibliográfica, faz-se uma abordagem geral do relâmpago com o intuito de transmitir ao leitor a abrangência do fenômeno e do termo relâmpago. Nesse mesmo capítulo, seções mais especificamente ligadas à radiação dos relâmpagos, tratam de familiarizar o leitor com as formas de onda de campo elétrico. Com esse intuito são apresentadas formas de ondas obtidas no passado por outros investigadores, em locais que não o Brasil. No capítulo de metodologia e técnica experimental, são feitas descrições da antena e da eletrônica utilizada na obtenção dos dados, bem como da sistemática usada na análise dos dados.

No capítulo dos resultados e discussão são apresentados em forma descritiva, em gráficos e ou tabelas todos os resultados obtidos, confrontando-os com resultados já publicados. Finalmente, no último capítulo, as conclusões são apresentadas. Neste capítulo também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.



## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 – RELÂMPAGOS, SUAS CARACTERÍSTICAS E CAMPO ELÉTRICO GERADO POR ELES**

Relâmpago é uma descarga elétrica de grande escala que surge devido à separação localizada de cargas elétricas na atmosfera, seguida de uma ruptura de rigidez dielétrica do ar. Na atmosfera o surgimento e a separação de cargas elétricas ocorre nas nuvens de tempestade, porém, separações de cargas elétricas podem ocorrer também em tempestades de areia, de neve, explosões nucleares, lançamento de foguetes e erupções vulcânicas, resultando na ocorrência dos relâmpagos. Os relâmpagos exercem inumeráveis efeitos sobre todas as coisas, não apenas perto, mas também à longas distâncias, tais como o lado do globo oposto ao local de sua ocorrência. A partir desse momento, sempre que se falar em relâmpago, tratar-se-á de relâmpagos provenientes de nuvens de tempestade.

A formação de uma nuvem de tempestade se inicia com a elevação de uma parcela de ar úmido por aquecimento ou por um agente forçante (montanhas, frentes frias, etc.). Durante essa elevação, a parcela de ar sofre decréscimos de pressão e temperatura, de forma que, em um certo instante o vapor de água começa a se condensar com a ajuda de partículas presentes no ar, as quais são chamadas de núcleo de condensação. Durante este estágio, são formadas gotículas de água, cristais de gelo e granizo, as quais adquirem carga elétrica por atrito uma vez que elas podem estar em movimento ascendente e ou descendente dentro da nuvem dependendo do seu estágio de desenvolvimento. Simultaneamente ao surgimento de cargas nas partículas ocorre também a separação destas cargas em centros de cargas positivas e negativas, de modo que uma nuvem vista por um observador distante apresenta-se como um dipolo elétrico como pode ser visto na Figura 2.1.

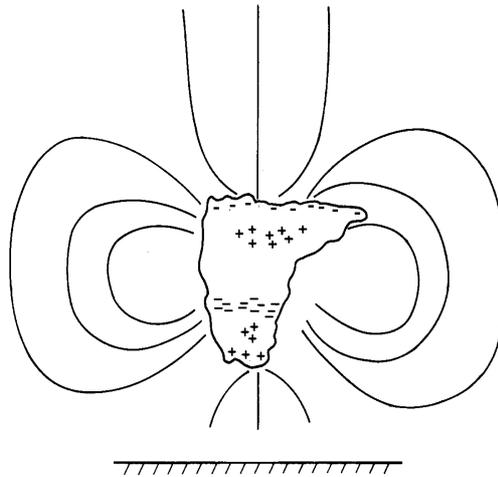


Fig. 2.1 - Forma dipolar para a estrutura de uma nuvem de tempestade.  
FONTE: Adaptada de Pinto Jr. e Pinto (1996, p.43)

A estrutura da nuvem de tempestade geralmente é composta por dois centros principais de cargas, um positivo na parte superior da nuvem e outro negativo na parte inferior. Além destes centros principais de cargas, ela possui camadas de cargas nas bordas superior e inferior, chamadas de camadas de blindagem, que surgem devido à atração sobre os íons existentes na atmosfera exercida pelos centros principais de cargas. Há ainda um pequeno centro de cargas positivas localizado na base da nuvem, entre o centro principal de cargas negativas e a camada de blindagem existente na base, que alguns estudiosos acreditam ser importante em alguns processos que ocorrem no relâmpago. Maiores detalhes sobre a distribuição de cargas na nuvem de tempestade podem ser encontrados em Pinto Jr. e Pinto (1996).

Quando as cargas elétricas da nuvem são intensas, o campo elétrico gerado por elas dentro da nuvem pode se tornar intenso o suficiente para quebrar a rigidez dielétrica do meio onde elas se encontram (cristais de gelo, gotas de água, granizo, etc.) e do ar, processo conhecido como de *Breakdown*. Posteriormente surgem descargas elétricas, ocorrendo assim o relâmpago, cujas características são influenciadas por fatores tais como a latitude, a topografia e a estação do ano, uma vez que estes fatores exercem influência nas características das nuvens e conseqüentemente nos relâmpagos. O

relâmpago possui um longo canal luminoso que pode ser vertical, horizontal ou inclinado, com quilômetros de extensão, por onde flui uma intensa corrente variável e que em geral apresenta ramificações. Este canal atua como uma antena de radiação emitindo ondas eletromagnéticas em um amplo intervalo de frequência. Esta intensa descarga transiente pode ocorrer da nuvem para o solo, do solo para a nuvem, de uma nuvem para outra nuvem, dentro da própria nuvem ou do topo da nuvem para o céu. Os relâmpagos dentro da nuvem são os mais comuns, mas são os relâmpagos que envolvem nuvem e solo os mais preocupantes devido às suas características destrutivas. Os relâmpagos podem ser positivos, negativos ou até mesmo bipolares. Os relâmpagos positivos são aqueles responsáveis por “destruição” das cargas positivas, os negativos das cargas negativas e os bipolares de ambas as cargas da nuvem.

Durante a ocorrência do relâmpago, a corrente que passa pelo canal é intensa e variável sendo da ordem de 30kA, podendo em alguns casos atingir picos da ordem de centenas de quiloampères. O canal tem cerca de 4 centímetros de diâmetro e nele há um superaquecimento, responsável pela expansão do ar ao seu redor, produzindo uma onda sonora denominada trovão.

Nos relâmpagos nuvem-solo negativos durante o período *breakdown*, a região antes isolante, torna-se condutora e o relâmpago é iniciado com uma fraca descarga luminosa que sai da nuvem e desce para o solo (Figura 2.2a ). Esta descarga que se propaga na atmosfera é chamada de líder escalonado, seu movimento não é contínuo, mas em passos. O líder escalonado anda 50m em 1 $\mu$ s, parando durante 50 $\mu$ s e assim por conseguinte. Durante cada passo, a corrente procura um caminho que apresente maior condutividade, fato responsável pelo surgimento das ramificações dos relâmpagos (Figura 2.2b ). Após algumas dezenas de milissegundos o líder escalonado que se propaga a uma velocidade de  $10^5\text{ms}^{-1}$ , tem seu extremo inferior próximo ao solo. Estabelece-se assim uma enorme diferença de potencial entre o solo e o extremo inferior do líder escalonado, pois o mesmo é um condutor que está ligado ao centro de cargas com o elevado potencial elétrico que o originou. Devido à elevada diferença de potencial entre o solo e a ponta do líder escalonado que está a algumas dezenas de

metros do solo, surge a partir de objetos pontiagudos na superfície do solo (prédios, pára-raios, árvores, etc.) um fluxo de cargas positivas ascendente denominado descarga conectante (Figura 2.2c). No instante em que a descarga conectante encontra o líder escalonado, ocorre uma descarga mais intensa, com corrente bem elevada, cujo valor médio do pico de corrente é 30kA, podendo a mesma atingir picos maiores do que 100kA em alguns casos (Figura 2.2d). Esta corrente se propaga a uma velocidade de  $10^7$  m/s a  $10^8$  m/s, ocorrendo a emissão de radiação eletromagnética, a qual parte dela se encontra na faixa visível do espectro luminoso. Esta intensa corrente é chamada de descarga de retorno e leva cerca de 100 $\mu$ s para atingir a nuvem (Iribarne e Cho, 1980).

Se durante a ocorrência do relâmpago ocorrer apenas uma descarga de retorno o relâmpago é chamado de simples, porém há casos em que, algumas dezenas de milissegundos após a primeira descarga de retorno, uma nova descarga da nuvem para o solo pode ocorrer aproveitando o canal ionizado remanescente (Figura 2.2e). Sua origem é próxima do local de origem do líder escalonado. Esta nova descarga flui a uma velocidade de  $2 \times 10^6$  m/s, aproximadamente 10 vezes mais rápida do que o líder escalonado e 20 vezes mais lenta do que a primeira descarga de retorno, é denominada líder contínuo e precede outra descarga de retorno chamada subsequente (Figura 2.2f). As etapas ilustradas pelas Figuras 2.2e e 2.2f podem ocorrer mais vezes, conferindo ao relâmpago múltiplo um número maior de descargas de retorno, ou seja, maior multiplicidade. Essas descargas de retorno subsequentes ocorrem até que o canal ionizado decaia. Às vezes, após a descarga de retorno pode-se ter uma corrente suave, contínua, de aproximadamente 100 ampères, com duração de décimos de segundos denominada corrente contínua.

Relâmpagos solo-nuvem ocorrem quando o líder escalonado tem seu início em superfícies proeminentes (prédios, árvores, etc.) localizadas na superfície da Terra, tendo movimento ascendente. Uma abordagem mais detalhada será feita mais adiante.

Uma característica do relâmpago que é interessante de se estudar, é a sua corrente. Porém, a sua descrição é uma tarefa difícil e muitos modelos foram feitos com o intuito

de descrevê-la. O modelo mais recente foi proposto por Lin et al. (1980). Neste modelo a corrente do relâmpago que se propaga pelo canal é composta por três componentes comentadas a seguir.

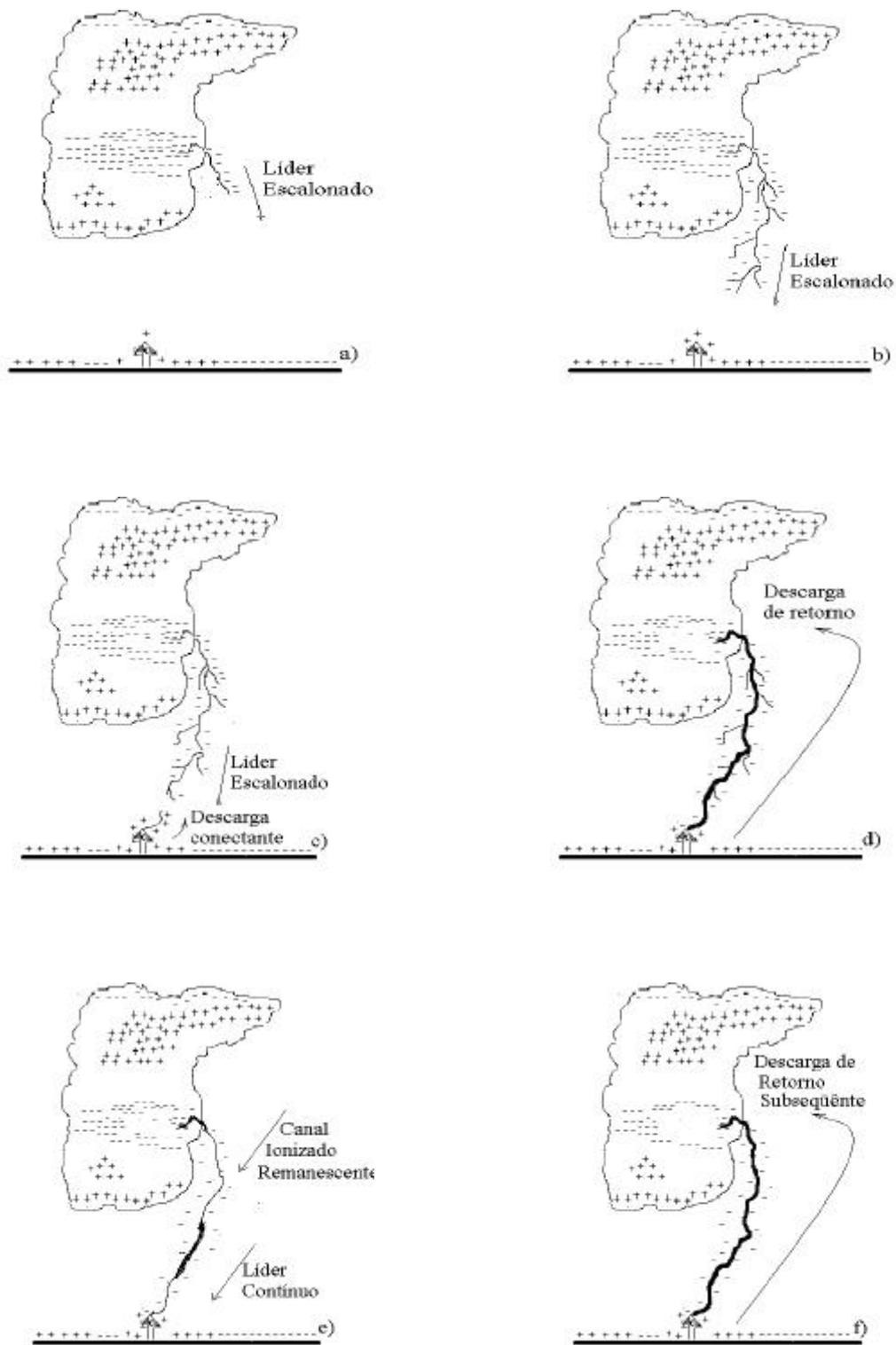


Fig. 2.2 - Etapas de um relâmpago nuvem-solo negativo

1º) Um pulso de corrente de curta duração denominado descarga de retorno associado à ruptura de rigidez dielétrica do ar quando a ponta do líder escalonado está a cerca de dezenas de metros do solo. Este pulso se propaga para cima com a mesma velocidade da frente de onda, com velocidade suposta ser constante, sendo da ordem de  $10^8$  m/s. Supõe-se que este pulso de corrente seja responsável pelo pico inicial dos campos de radiação;

2º) Uma corrente uniforme que flui ou pode começar a fluir logo após o início da descarga de retorno. Esta corrente corresponde a um fluxo de cargas da nuvem para o solo, de aproximadamente 100A, que pode ser estimada pela variação temporal do campo elétrico da nuvem que está sendo descarregada. A corrente uniforme então depende da variação do campo elétrico da nuvem.

3º) Uma corrente denominada corrente corona causada pela deriva inicialmente radial e logo após descendente das cargas em torno do canal. Estas cargas inicialmente se encontram ao redor do canal armazenadas no envelope corona. O efeito ocorre como se houvesse uma fonte de corrente em cada altitude do canal. Quando a frente de onda da descarga de retorno atinge uma certa altitude no canal, a fonte de corrente correspondente é ligada. Assume-se que esta corrente se movimenta com a velocidade da luz (Lin et al., 1980).

Em um relâmpago podem ocorrer vários processos que podem ser estudados através das formas de onda dos campos elétrico e magnético da radiação eletromagnética gerada por ele. Uman et al. (1969; 1970a, b ; 1975a); Mclain e Uman (1971) e Lin et al. (1979, 1980), desenvolveram uma teoria geral da radiação eletromagnética de uma antena finita, para descrever a radiação proveniente do relâmpago, considerando-o uma antena finita que emite radiação. Nesta teoria considera-se uma antena vertical, o que faz com que os resultados sejam uma aproximação dos casos reais, uma vez que os relâmpagos em geral são tortuosos e ramificados.

Considere uma antena vertical com altura  $H$  sobre um plano bom condutor. A geometria da antena é apresentada na Figura 2.3 e as condições de contorno no plano são satisfeitas ao adicionar a imagem da antena. O diâmetro da antena é bem menor do que o comprimento de onda da radiação em consideração e a corrente em qualquer altura da antena é uma função arbitrária contínua sendo nula em  $t = 0$ .

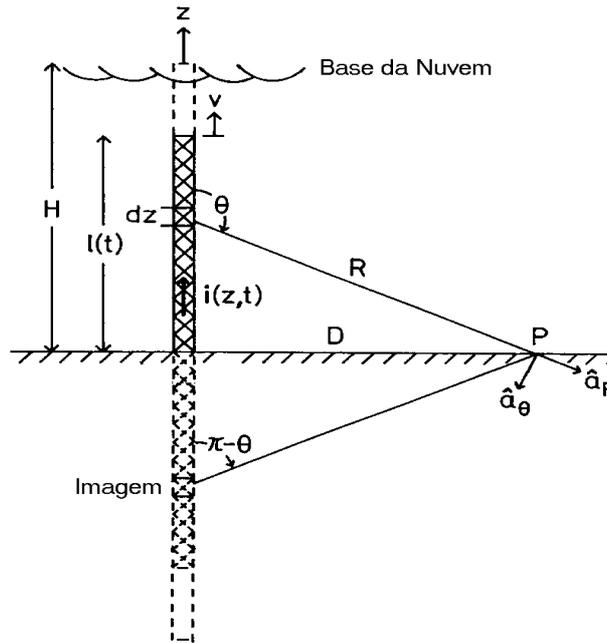


Fig. 2.3 - Geometria de uma antena utilizada como um canal ideal de um relâmpago.

FONTE: Adaptada de Ogawa (1994, p.116).

Considerando um dipolo de corrente vertical infinitesimal de comprimento  $dz$  associado a um pulso de corrente  $i(z, t)$ , os campos elétrico e magnético em um ponto de observação a uma distância  $D$  da base da antena, são a soma dos campos gerados pelos dipolos real e imagem. As componentes vertical do campo elétrico e horizontal do campo magnético em função de  $t$  e  $D$  são fornecidas por:

$$E_v(D, t) = (2\pi\epsilon_0)^{-1} \left\{ \int_0^H R^{-3} (2 - 3\sin^2 \theta) \int_0^t i(z, \tau - R/c) d\tau dz + \right.$$

$$\int_0^H c^{-1} R^{-2} (2 - 3 \sin^2 \theta) i(z, t - R/c) dz -$$

$$\int_0^H c^{-2} R^{-1} \sin^2 \theta \frac{\partial i(z, t - R/c)}{\partial t} dz \} \quad (2)$$

$$B_h = (\mu_0 / 2\pi) \left\{ \int_0^H R^{-2} \sin \theta i(z, t - R/c) dz + \int_0^H c^{-1} R^{-1} \sin \theta \frac{\partial i(z, t - R/c)}{\partial t} dz \right\} \quad (2.1)$$

onde

$\epsilon_0$  e  $\mu_0$  = Permissividade elétrica e permeabilidade magnética do espaço livre, respectivamente;

H = Altura da antena;

$$R = (D^2 + H^2)^{1/2} .$$

Tendo em foco a equação (2), tem-se que o primeiro termo à direita é chamado de campo eletrostático e está associado ao fato de que a existência de uma carga elétrica líquida implica na existência de um campo eletrostático. A carga elétrica responsável pelo surgimento do campo eletrostático é fornecida pela integral da corrente  $i(z, t-R/c)$  no tempo. O segundo termo é chamado de campo elétrico de indução. Este campo corresponde à uma variação associada ao movimento das cargas, ou seja, à corrente  $i(z, t-R/c)$ . O terceiro termo é chamado de termo de radiação, associa-se ao fato de que cargas elétricas em aceleração emitem radiação.

O primeiro termo à direita em (2.1) é chamado de termo de indução e o segundo de termo de radiação magnética, ambos possuem origens similares às anteriores, porém considerando agora o campo magnético. Uman et al. (1975a) obtiveram soluções computacionais para as equações (2) e (2.1).

Note que no caso do campo magnético não há componente estática, pois, pelo que se sabe, ainda não foi descoberto ou não existe um monopólo magnético que seja responsável pela geração de um campo magnético, em analogia ao monopólo elétrico.

O uso da teoria da radiação permite calcular as formas de onda dos campos elétrico e magnético da radiação gerada por relâmpagos. Além de poderem ser calculadas, as formas de onda de campo elétrico podem ser medidas com utilização de antenas apropriadas. Através destas formas de onda são estudados os processos que ocorrem nos relâmpagos. Algumas formas de onda serão apresentadas a seguir.

No caso dos relâmpagos nuvem-solo negativos, sua forma de onda é composta por uma seqüência inicial de pulsos do *breakdown*. Depois de alguns milissegundos ou até dezenas de milissegundos após os pulsos de *breakdown*, tem-se em média três a cinco intensos pulsos de descarga de retorno separados por intervalos de tempo que variam desde dezenas a centenas de milissegundos. Segundo Brook (1992), citado por Rakov (1999), os pulsos de *breakdown* podem ter amplitudes comparáveis às amplitudes dos correspondentes à descarga de retorno, como pode ser visto na Figura 2.4.

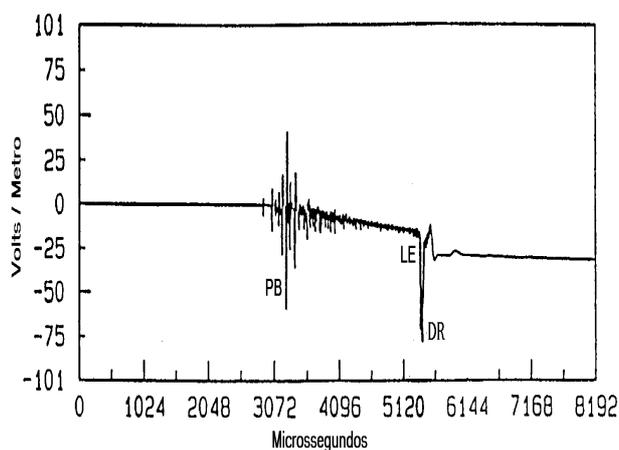


Fig. 2.4 – Forma de onda de campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo negativo, ocorrido a 25 km de distância da estação de observação. Tem-se que PB é o pulso do *breakdown*, LE é o líder escalonado e DR é a descarga de retorno. FONTE: Adaptada de Rakov, (1999).

O sinal de campo elétrico apresentado na Figura 2.4 foi obtido adotando-se a convenção de que o campo elétrico atmosférico de tempo bom (aberto) é para cima e positivo, de forma que, a variação do campo elétrico ambiente (campo elétrico da nuvem de tempestade superposto ao campo elétrico de tempo bom) devido a um relâmpago negativo seja negativa.

Após o período dos pulsos de *breakdown* (PB) e antes da primeira descarga de retorno (DR) há uma seqüência de pulsos denominada líder escalonado (LE), constituindo um trem de pulsos regulares ou irregulares (caóticos). Sua duração é da ordem de milissegundos e as amplitudes são entre uma ou duas ordens de magnitude menor do que as dos pulsos da descarga de retorno. Em geral há um intervalo relativamente suave em escala de milissegundos entre a fase caracterizada pelos pulsos de *breakdown* e o líder escalonado como pode ser visto na Figura 2.5.

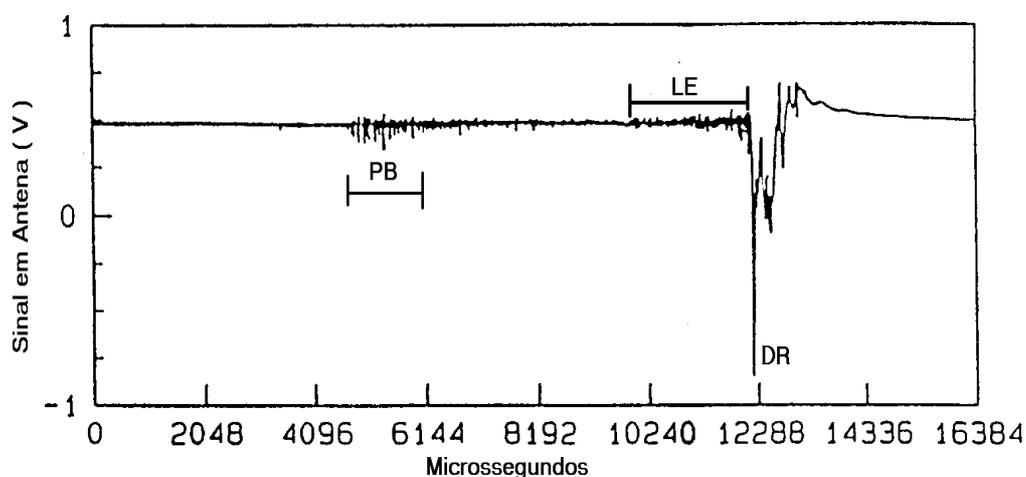


Fig. 2.5 - Intervalo de tempo entre os pulsos de *breakdown* e o líder escalonado em uma forma de onda de um relâmpago nuvem-solo negativo, ocorrido no verão a uma distância desconhecida.

FONTE: Adaptada de Rakov (1999).

Nos intervalos entre as descargas de retorno ou até mesmo após, pode-se ter pulsos regulares de corrente com amplitude relativamente pequena, cujos picos são

aproximadamente duas ordens de magnitude menores do que a primeira descarga de retorno no mesmo relâmpago.

Os relâmpagos nuvem-solo positivos, em geral apresentam uma única descarga de retorno cuja forma de onda é similar à forma de onda da primeira descarga de retorno de um relâmpago nuvem-solo negativo, com exceção da sua polaridade que é oposta. Um exemplo de forma de onda deste relâmpago é apresentado na Figura 2.6, onde pequenos pulsos antes do instante  $t = 0$  indicam a ocorrência do líder escalonado. O sinal de campo elétrico apresentado na Figura 2.6 foi obtido adotando-se a convenção de que o campo elétrico de tempo bom é para baixo e positivo, de forma que, a variação do campo elétrico ambiente devido a um relâmpago negativo é positiva. Assim, para fazer uma comparação entre as Figuras 2.5 e 2.6, deve-se adotar apenas uma convenção para o campo elétrico de tempo bom e fazer as inversões necessárias nos gráficos. O pico inicial do campo elétrico normalizado para 100km de distância entre o ponto de ocorrência do relâmpago e a estação de observação para a primeira descarga de retorno positiva é 11,5V/m, cerca de duas vezes maior do que para a primeira descarga de retorno negativa que é cerca de 5,3V/m (Rakov, 1999).

A estrutura dos relâmpagos dentro das nuvens inclui uma seqüência inicial de pulsos de amplitude relativamente grande, espaçadas algumas centenas de microssegundos, que ocorrem dentro de intervalos que duram desde alguns milissegundos até dezenas de milissegundos, seguidos por um número de pulsos regulares significativamente menores. A ocorrência dos pulsos maiores que compõem a seqüência inicial da forma de onda de campo elétrico dos relâmpagos na nuvem é ilustrada na Figura 2.7 e a forma de onda do período de *breakdown* é apresentada na Figura 2.8.

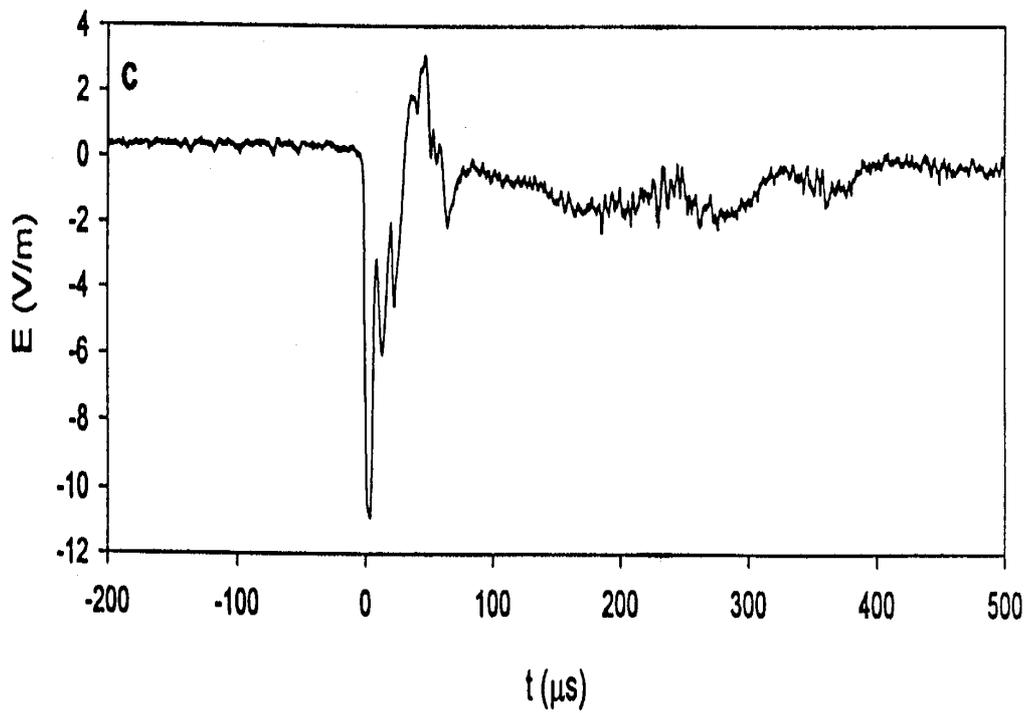


Fig. 2.6 - Forma de onda de campo elétrico da primeira descarga de retorno de um relâmpago positivo.

FONTE: Adaptada de Rakov, (1999).

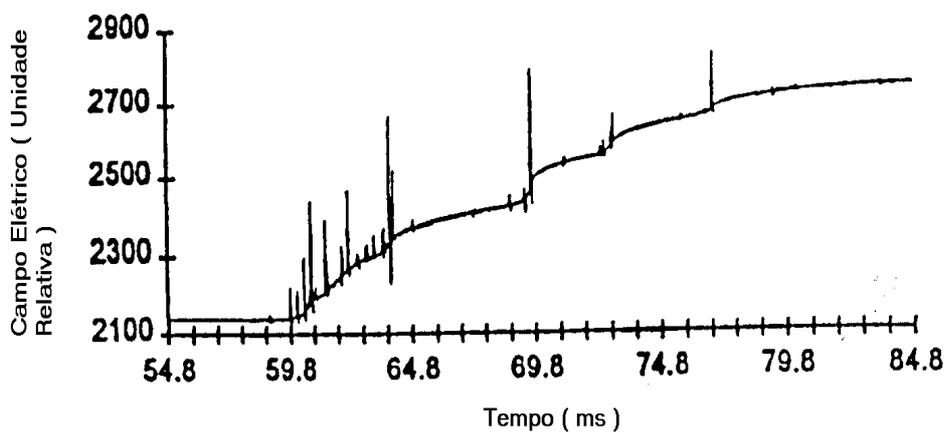


Fig. 2.7 - Forma de onda de um relâmpago na nuvem, durante os primeiros 25ms da primeira descarga.

FONTE: Adaptada de Rakov, (1999).

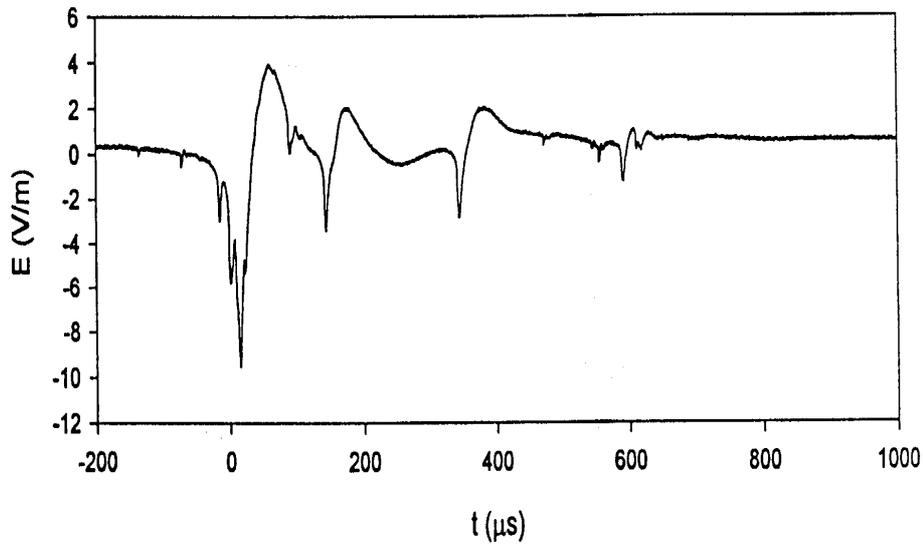


Fig. 2.8 - Forma de onda de pulsos de *breakdown* em relâmpagos nas nuvens.  
 FONTE: Adaptada de Rakov, (1999).

Há também pulsos em escala de microssegundos com amplitudes apreciavelmente menores do que as amplitudes de *breakdown*, os quais são dispersos ao longo do registro de campo elétrico do relâmpago. Alguns desses pulsos irregulares e menores são causados pelas descargas k, as quais por sua vez, são descargas que ocorrem dentro da nuvem precedendo novas descargas de retorno.

Pulsos isolados (pulsos bipolares estreitos) são apresentados na Figura 2.9. Estes possuem picos cujas intensidades e taxas de variação são comparáveis às intensidades e taxas de variação das descargas de retorno em relâmpagos nuvem-solo.

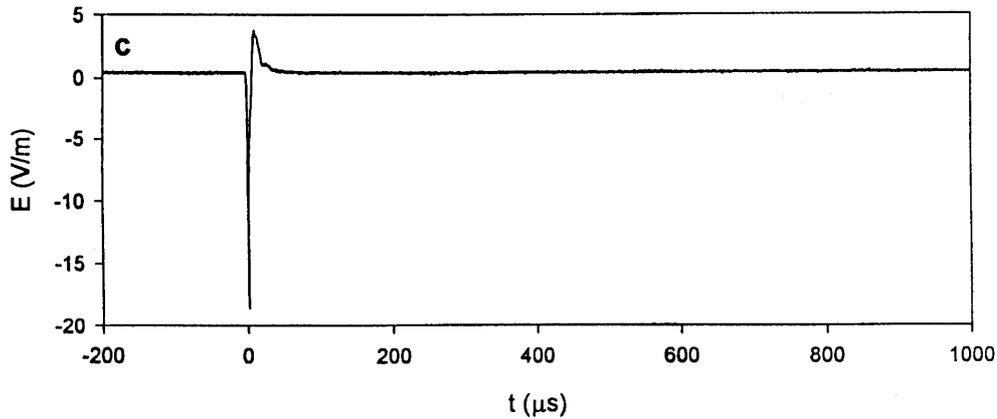


Fig. 2.9 - Forma de onda de um pulso isolado presumivelmente não associado a qualquer processo de descarga.

FONTE: Adaptada de Rakov, (1999).

Análises do espectro de frequências da radiação emitida pelos pulsos isolados indicam que eles irradiam bem mais intensamente do que as primeiras descargas de retorno em frequências entre 10 e 50 MHz (Willett et al., 1989). Um dos interesses no estudo destes pulsos deve-se ao fato de que os efeitos induzidos dos pulsos isolados podem representar uma das maiores ameaças às aeronaves durante o voo.

## 2.2 – PROCESSOS QUE OCORREM NO RELÂMPAGO NUVEM-SOLO

Entre os relâmpagos que atingem o solo, os negativos são os mais comuns e também os mais conhecidos. Esta seção abordará em mais detalhes vários processos que ocorrem em um relâmpago nuvem-solo negativo, fazendo menção às variações preliminares, à descarga de retorno e aos processos que ocorrem entre e ou após as descargas de retorno.

### 2.2.1 –VARIAÇÕES PRELIMINARES

Existe uma considerável publicação científica no que se refere à duração das variações de campo elétrico antes da ocorrência da primeira descarga de retorno, variações estas chamadas de preliminares. Segundo Uman (1987), Clarence e Malan (1957) na África do Sul registraram variações de campo elétrico antes da primeira descarga de retorno com até 200ms de duração, sendo que 50% excedia 30ms e 10% excedia 120ms. Kitagawa e Brook (1960) no Novo México registraram durações entre 10ms e 200ms, sendo o valor mais freqüente de 30ms. Em um trabalho mais recente, Beasley et al. (1982) na Flórida, consideraram variações preliminares àquelas desde o início do relâmpago até o início do líder escalonado. Eles examinaram registros de 79 relâmpagos ocorridos em tempestade sobre a Flórida e descobriram que a duração média das variações preliminares observadas por eles era de 90ms, com valor mediano de 42ms.

Clarence e Malan (1957) citados por Uman (1987) utilizaram a forma de onda das variações preliminares para localizar a região de ocorrência dos pulsos de *breakdown* na nuvem. Eles sugeriram que o processo de *breakdown* é uma descarga que ocorre dentro da nuvem, na direção vertical, podendo ser tanto para cima como para baixo. Um esquema da forma de onda de um relâmpago nuvem-solo sugerido por eles é ilustrado na Figura 2.10 .

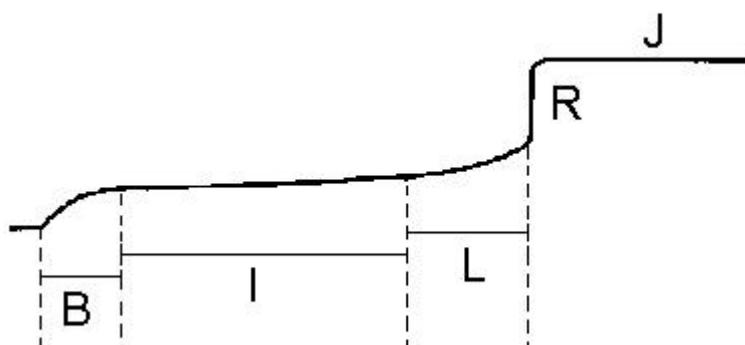


Fig. 2.10 - Esquema de variações de campo elétrico típicas de relâmpagos nuvem-solo ocorrido a 5km de distância da estação de observação.  
FONTE: Adaptada de Uman, (1987, p.73).

Segundo Clarence e Malan, as variações preliminares são constituídas por três períodos, sendo elas representadas pelas letras B, I e L. A variação de campo B, conhecida como período de *Breakdown*, é significativa e tem duração de poucos milissegundos. Está associada às descargas dentro da nuvem que iniciam o relâmpago e surgem como resultado da ruptura de rigidez dielétrica na nuvem. O período I é composto por uma variação irregular e lenta do campo elétrico, caracterizada por uma inclinação mais suave do que a do período de *breakdown*, é chamado de período intermediário. O período L corresponde às variações mais rápidas associadas às descargas que ocorrem fora da nuvem, na atmosfera entre a nuvem e o solo. Estas descargas são denominadas Líder Escalonado. Beasley et al. (1982) verificaram a validade do esquema B, I, L para as variações preliminares e descobriu que apenas 6% das formas de onda obtidas por eles se ajustou bem ao esquema BIL e que 15% se ajustaria bem, caso fosse aceitável que as variações B pudessem iniciar sem uma descontinuidade discernível na inclinação. Em algumas formas de onda, as variações preliminares não apresentaram o período I. Segundo Uman (1987), Krehbiel et al.(1979) descobriram que o movimento de cargas negativas dentro da nuvem é inicialmente vertical sendo do centro principal de cargas negativas para o pequeno centro de cargas positivas na base da nuvem, podendo ter posteriormente um movimento horizontal. Eles sugeriram que o período I fosse atribuído ao movimento horizontal das cargas, de forma que as variações preliminares que não continham o período intermediário (I), eram compostas apenas por movimentos dentro da nuvem sem componentes horizontais.

### **2.2.2 – DESCARGA DE RETORNO**

Recapitulando, segundo Clarence e Malan (1957), as primeiras variações de campo elétrico que ocorrem antes da primeira descarga de retorno são chamadas de variações preliminares, que correspondem aos processos de *breakdown*, intermediário e líder escalonado, os quais já foram abordados na seção anterior. Após o período do líder escalonado ocorre a descarga de retorno, que consiste na mais intensa corrente elétrica que resulta da aceleração das cargas do líder escalonado devido ao encontro delas com as cargas da descarga conectante.

A velocidade da primeira descarga de retorno e também das descargas de retorno subsequentes decrescem abruptamente à medida em que a frente de onda da descarga de retorno passa pelas ramificações do canal. Registros de velocidade a aproximadamente 1,3km de distância do solo, indicam uma velocidade média de  $9,6 \times 10^7$  m/s para a primeira descarga de retorno e  $1,2 \times 10^8$  m/s para as descargas de retorno subsequentes segundo Idone e Orville (1982), citados por Uman (1987).

Uma das formas de se estudar a descarga de retorno é através da análise da forma de onda da sua corrente. Sua corrente é medida em torres elevadas, instaladas em regiões altas. Nesta técnica para se obter as informações sobre a corrente é necessário que o relâmpago atinja a torre e as observações ficam restritas apenas às variações de corrente observadas no solo.

Formas de onda de corrente de descargas de retorno negativas ocorridas no monte San Salvatori (Suíça), são apresentadas na Figura 2.11. Foram obtidas de uma torre de 55m, no topo do monte o qual está 910m acima do nível do mar. A corrente média da primeira descarga de retorno é variável no tempo, tendo como valor médio para o pico de corrente 30kA, podendo alguns casos chegar a 100kA. Para as descargas de retorno subsequentes o valor médio do pico de corrente é de 15kA.

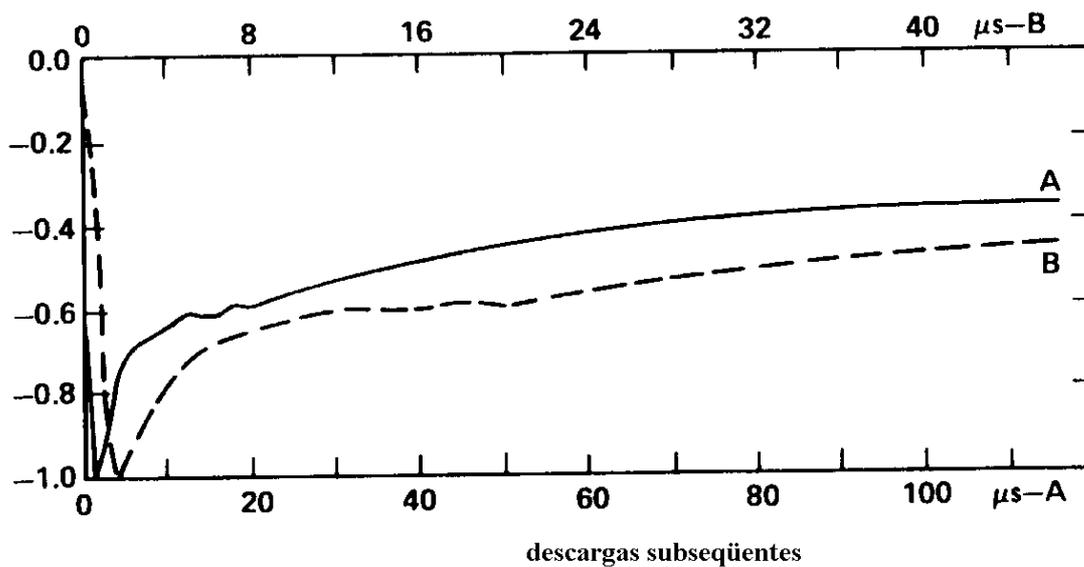
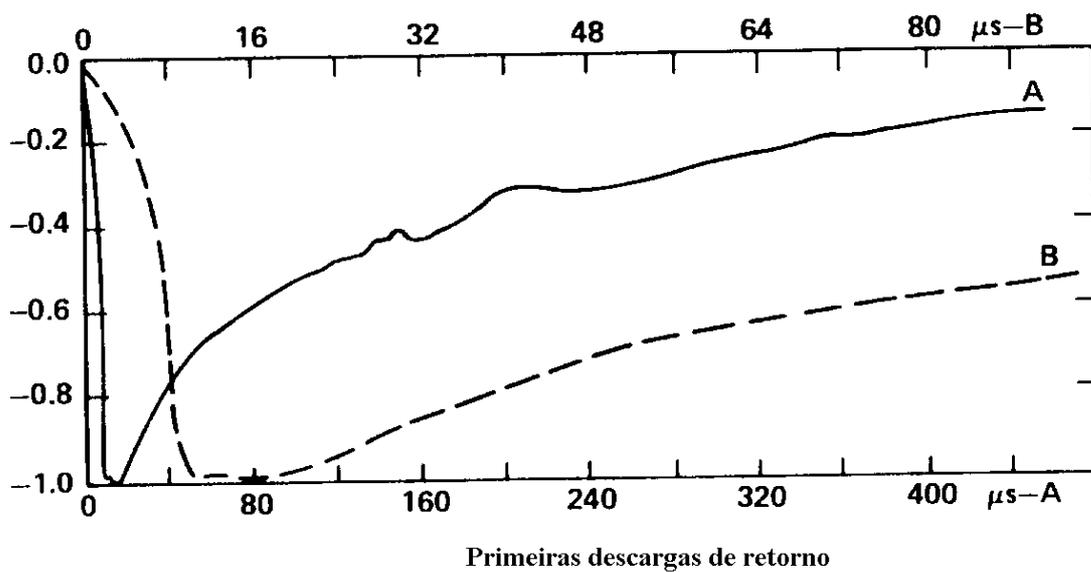


Fig. 2.11 - Formas de onda de descargas de retorno negativas com amplitude normalizada.

FONTE: Adaptada de Berger et al. (1975)

Na Figura 2.11 são apresentadas curvas médias de correntes de relâmpagos, medidas a partir de voltagens induzidas em *shunts* resistivos instalados nos topos de duas torres localizadas no pico do Monte San Salvatori. As curvas A e B associam-se a diferentes

escalas. As curvas B para as primeiras descargas de retorno e para as subseqüentes correspondem às escalas superiores e são expansões das curvas A, correspondentes às escalas inferiores, sendo que, para as descargas de retorno de primeira ordem elas correspondem à uma ampliação dos primeiros 80 microssegundos da escala inferior e para as descargas subseqüentes aos primeiros 40 microssegundos da escala inferior.

A carga transmitida ao solo por uma descarga de retorno é determinada integrando-se a forma de onda da corrente no tempo. Segundo Berger et al. (1975) a carga transferida pelas descargas negativas de primeira ordem é cerca de cinco vezes a carga transferida pelas descargas negativas subseqüentes.

Como pode ser visto na Figura 2.11, as correntes das descargas de retorno subseqüentes atingem seu valor máximo em intervalos de tempo menores do que nas primeiras descargas de retorno. Esta diferença é devido ao fato de que, o líder contínuo precedente às descargas de retorno subseqüentes se propaga mais rapidamente do que o líder escalonado, uma vez que ele aproveita o canal ionizado já formado pelo líder escalonado.

A descarga de retorno de um relâmpago é o processo que fornece o pulso de maior amplitude em registros de campo elétrico. A Figura 2.12 mostra os primeiros 50ms de uma forma de onda de um relâmpago nuvem-solo negativo ocorrido em janeiro de 1999 no Brasil.

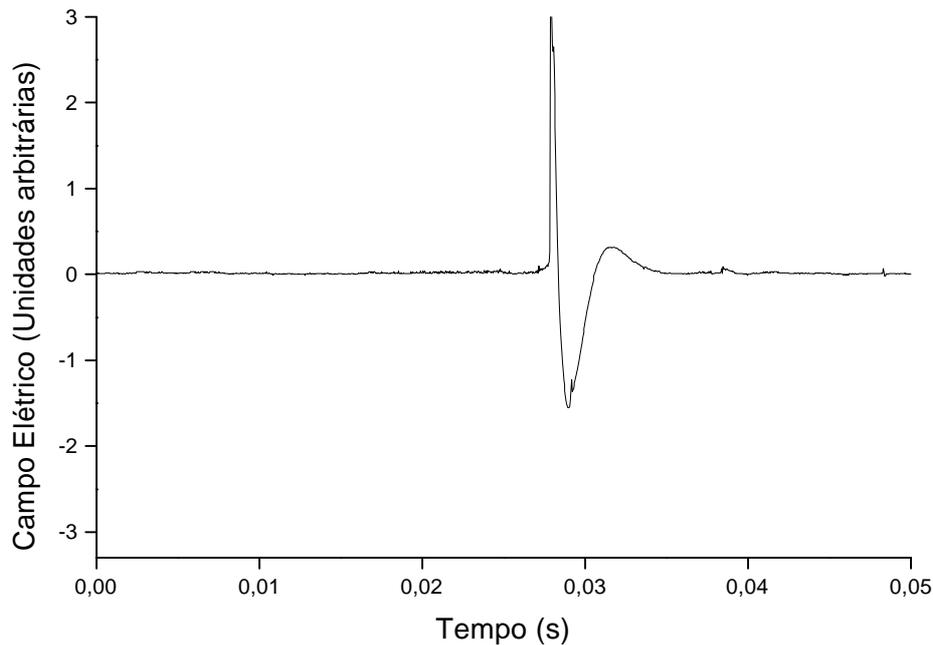


Fig. 2.12 - Forma de onda de campo elétrico de um relâmpago nuvem solo negativo, ocorrido no Brasil no dia 11 de janeiro de 1999 às 17:04:00 horas (LT).

Na Figura 2.12 pode-se observar claramente o pico de campo elétrico causado pela descarga de retorno. Neste trabalho, convencionou-se o campo elétrico de tempo bom, o qual é para baixo como sendo positivo. Assim, descargas de retorno que se iniciam com variações positivas de campo elétrico assim como a descarga de retorno apresentada na Figura 2.12 são correspondentes a relâmpagos negativos. O instante da ocorrência do relâmpago é dado em hora local, que em inglês escreve-se Local Time (LT). Nesta Figura a ordenada é apresentada em unidades arbitrárias, uma vez que, o sinal obtido pela antena consiste em uma tensão variável induzida pelo campo elétrico da radiação do relâmpago, sendo este sinal proporcional ao campo elétrico que o gerou. Assim, todas as formas de onda de campo elétrico obtidas no Brasil, são apresentadas com unidades arbitrárias para o campo elétrico e aquelas em que não é apresentada uma unidade para o campo elétrico, subentende-se que a unidade é arbitrária.

Dados estatísticos de descargas de retorno de primeira ordem e subsequentes foram publicados por vários investigadores. Alguns deles serão apresentados a seguir.

Segundo Uman (1987), os valores de pico normalizados para 100km foram analisados por Krider e Guo (1983); eles observaram 69 descargas de retorno de primeira ordem e 84 subseqüentes e obtiveram valores de pico em torno de 11,2V/m com um desvio padrão igual a 5,6V/m para as primeiras descargas e 4,6V/m para as descargas subseqüentes com um desvio padrão igual a 2,6V/m.

O tempo de cruzamento zero, é o instante em que o campo elétrico da descarga de retorno se torna nulo após ter atingido o seu valor máximo. O valor do tempo de cruzamento zero verificado por Lin et al. (1979) na Flórida é de 50 $\mu$ s. Cooray e Lundquist (1985) obtiveram um valor de 50 $\mu$ s para o tempo de cruzamento zero na Suécia e 90 $\mu$ s em Sri Lanka. Esta diferença foi atribuída às diferentes condições meteorológicas dessas regiões.

Em relâmpagos nuvem-solo negativos múltiplos, o tempo típico entre as descargas de retorno é igual a 60ms (Rakov, 1999) e a potência eletromagnética radiada devido à primeira descarga de retorno é de  $2 \times 10^{10}$ W, enquanto que, para as descargas subseqüentes esta potência chega a  $3 \times 10^9$ W segundo Krider e Guo (1983), citados por Uman (1987).

Formas de onda de campo elétrico associado às descargas de retorno em escala de milissegundos já foram publicadas por Brook et al. (1962), Kitagawa et al. (1962), Krehbiel et al. (1979) e em escala de microssegundos por Fisher e Uman (1972), Uman et al. (1975b), Tiller et al. (1976), Lin et al. (1979) e Cooray e Lundquist (1982, 1985).

### **2.2.3 - PROCESSOS APÓS A PRIMEIRA DESCARGA DE RETORNO**

Geralmente os relâmpagos da nuvem para o solo negativos não terminam logo após a primeira descarga de retorno; muitas vezes ocorrem outros processos tais como corrente contínua, descargas k, líder contínuo e até mesmo outras descargas de retorno. Nesta seção será falado um pouco sobre estes processos.

Muitas vezes ocorrem outras descargas de retorno em um mesmo relâmpago. Estas são precedidas por uma descarga chamada líder contínuo, que se inicia próxima à região onde começou o líder escalonado e consiste em uma quantidade de carga que é transportada da nuvem para o solo através do canal ionizado remanescente, em um movimento contínuo e não aos passos como no caso do líder escalonado. A Figura 2.2e é uma ilustração de um líder contínuo. Durante a fase do líder contínuo o canal já está invisível de modo que, o líder contínuo que o atravessa é visto como um risco luminoso com um comprimento menor do que o comprimento do canal. Os comprimentos desses riscos luminosos são na verdade os comprimentos dos líderes contínuos e são da ordem de dezenas de metros. Por exemplo, Schonland e Collens (1934) citados por Uman (1987) mediram comprimentos de líderes contínuos entre 25m e 112m, com um comprimento médio de 54m, para uma amostragem contendo nove líderes contínuos. A velocidade do líder contínuo varia de  $1 \times 10^6$  m/s até  $2,1 \times 10^8$  m/s, tendo como valor mais freqüente  $2 \times 10^6$  m/s (Schonland, 1956). Sua duração está associada ao intervalo entre as descargas de retorno, assim, líderes de longa duração correspondem a maiores intervalos entre as descargas de retorno.

Um outro tipo de corrente chamada de corrente contínua pode ocorrer após a primeira descarga de retorno. Consiste em um fluxo contínuo de cargas que se inicia no centro principal de cargas negativas da nuvem e desce para o solo, resultando em uma corrente do solo para a nuvem. Ela é evidenciada através de uma fraca luminosidade que persiste após a ocorrência da descarga de retorno, com duração da ordem de dezenas a centenas de milissegundos. A corrente contínua tem intensidade da ordem de 100A . Nos

relâmpagos nuvem-solo negativos múltiplos, geralmente a corrente contínua ocorre entre as descargas de retorno. Nos relâmpagos positivos, os quais a maioria é simples, a corrente contínua consiste no processo que transmite maior carga, devido à sua longa duração.

Às vezes a corrente contínua pode sofrer pequenas variações que podem ser evidenciadas através da sua luminosidade e também de pulsos superpostos ao campo elétrico gerado por ela medido no solo. Estas variações de campo elétrico são chamadas de componente M e o intervalo médio de tempo entre estas componentes é de 2,1ms (Thottappilli et al. , 1990).

São observadas variações lentas de campo elétrico entre descargas de retorno sucessivas ou no término dos relâmpagos. Estas variações lentas são atribuídas às descargas lentas que ocorrem dentro da nuvem, preparando-a para o início de um líder contínuo e conseqüentemente uma nova descarga de retorno, por isso, estas descargas são chamadas de processo de junção ou processo J, pois fazem a junção entre descargas de retorno sucessivas. As variações associadas ao processo J apresentam-se em escala de dezenas de milissegundos, em geral menores do que as variações de campo elétrico associadas às correntes contínuas e não são associadas a um canal luminoso. Variações de campo elétrico associadas ao processo J mostram que eles podem ser positivos ou negativos. Observações de variações de campo elétrico feitas com antenas rápidas (pequena constante de decaimento) em escala de microssegundos, mostram que o processo J é composto pela superposição de pequenas e rápidas descargas distanciadas entre si de 2 a 20ms, denominadas de descargas K e as variações de campo elétrico correspondentes de variações K. As descargas K possuem canais em torno de 1,3km e duração de aproximadamente 1ms. Sua velocidade é de aproximadamente  $1,3 \times 10^6$  m/s e tem uma corrente média de 1,4kA.

O processo J é visto por alguns investigadores como uma fonte de cargas que compõem o líder contínuo que precede as descargas de retorno subseqüentes. Porém, há aqueles que acreditam que os processos J não necessariamente exerçam o papel de fontes de

cargas para os líderes contínuos. Uma abordagem mais específica com respeito às descargas K e ao processo J será feita mais adiante.

## **2.3 – OUTROS TIPOS DE RELÂMPAGOS**

### **2.3.1 – RELÂMPAGOS POSITIVOS**

A maior parte dos relâmpagos que ocorrem envolvendo o solo é negativa e trazem cargas negativas para o solo. Há também os relâmpagos que trazem cargas positivas para o solo. Os relâmpagos positivos são interessantes pelo fato de que os maiores picos de correntes já detectados foram deles, sendo encontrados picos de correntes entre 200kA e 300kA. A carga transferida ao solo por eles geralmente é maior do que a transferida pelos relâmpagos negativos simples. Bruce e Golde (1941) revisaram as primeiras evidências de relâmpagos positivos através de campos elétrico e magnético e de correntes medidas no solo e constataram que, em dezessete trabalhos revisados os relâmpagos positivos consistiam de 0 a 30% dos relâmpagos.

É sugerido que os relâmpagos positivos têm início nas regiões de cargas positivas da nuvem e que eles ocorrem mais freqüentemente no término das nuvens de tempestade, quando as cargas positivas estão menos blindadas pelas cargas negativas, as quais são drenadas pela precipitação ou pelas descargas negativas. Também o deslocamento lateral do centro principal de cargas positivas devido a ação de ventos de cisalhamento inclina o eixo do dipolo da nuvem diminuindo a blindagem eletrostática exercida pelo centro principal de cargas negativas, favorecendo a ocorrência de relâmpagos positivos segundo Pierce (1955b) e Brook et al. (1982), citados por Uman (1987).

Berger e Vogelsanger em 1965 registraram que 15% de todos os líderes que se movem para baixo rumo às torres no Monte San Salvatore (Suíça) eram positivos. Em 1977 e 1978 Berger sugeriu que as descargas dos líderes positivos são melhores descritas como líderes negativos ascendentes e que, na sua opinião, líderes positivos descendentes que

ocorreram em áreas montanhosas quase sempre encontram longos líderes negativos ascendentes (Uman, 1987).

Os relâmpagos positivos geralmente são simples e quase sempre apresentam corrente contínua após sua descarga de retorno. Maior parte da carga é transferida pela corrente contínua, a qual confere ao relâmpago uma duração sete vezes maior do que a duração dos relâmpagos nuvem-solo negativos simples resultando em uma maior transferência de carga quando comparada com a transferência devida ao relâmpago nuvem-solo negativo. Eles ocorrem em maior percentual nas tempestades de inverno, ocasião em que há maior presença de ventos de cisalhamento e as nuvens são mais baixas.

Orville et al. (1983) utilizando o Sistema de Detecção de Relâmpagos *National Lightning Detection Network* (NLDN) dos Estados Unidos, descobriu que o percentual de relâmpagos positivos para o solo aumenta com o tempo de duração da tempestade, alcançando até 37% de ocorrência no final do período de atividade significativa de relâmpagos.

Registros de campo elétrico de relâmpagos positivos para o solo geralmente são similares aos registros de campo elétrico de relâmpagos negativos, exceto pelo fato de que as polaridades são invertidas e os relâmpagos positivos geralmente apresentam corrente contínua no seu término. Pierce (1955a) citado por Uman (1987), verificou que as variações preliminares nas formas de onda de campo elétrico de relâmpagos nuvem-solo positivos eram de maior duração e tinham aproximadamente duas vezes a magnitude das variações preliminares dos relâmpagos nuvem-solo negativos. Estas características o levou a pensar que os relâmpagos positivos se iniciam em uma região mais alta na nuvem.

Estudos de correntes e cargas transferidas em relâmpagos positivos são feitos através de medidas diretas de correntes obtidas em torres e de análises de formas de ondas de campo elétrico. A Figura 2.13 é uma forma de onda de corrente de um relâmpago positivo obtida por Berger em 1977 citada por Uman (1987). Ela está em uma escala

que permite observar a corrente atribuída ao líder negativo ascendente que inicia o relâmpago nuvem-solo positivo. As medidas de correntes positivas feitas até então, evidenciam que o tempo de elevação das correntes até o valor de pico é maior do que nas correntes negativas e o tempo de queda a partir do pico é muito maior do que o observado nas correntes negativas.

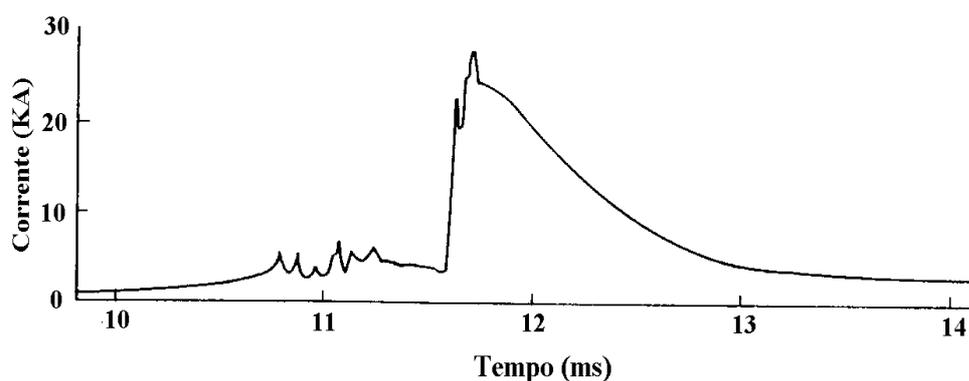


Fig. 2.13 - Corrente de um relâmpago positivo.

FONTE: Adaptada de Uman (1987, p.199).

O valor médio das descargas de retorno para os relâmpagos positivos é em torno de 35kA. Porém, valores chegando até 300kA também foram registrados.

Através da análise de formas de onda de campo elétrico, foi descoberto que, relâmpagos nuvem-solo positivos ocorridos no Japão durante o inverno frequentemente exibiram corrente contínua maior do que  $10^4$ A por um período de até 10ms segundo Brook et al. (1982), citado por Uman (1987). Uma das descargas estudadas apresentou uma corrente contínua de  $10^5$ A até 2ms após o início do relâmpago. Após 4ms a partir do início do relâmpago, a corrente apresentou um valor de  $10^4$ A e a carga positiva transferida ao solo excedeu a 300C.

### 2.3.2 – RELÂMPAGOS SOLO-NUVEM

O relâmpago solo-nuvem tem início através de um líder escalonado ascendente, não apresentando a primeira descarga de retorno como a que normalmente é observada em relâmpagos nuvem-solo, no seu lugar é observada a presença de uma corrente contínua assim que o líder ascendente alcança a nuvem. Após esses processos, segue uma combinação de líderes contínuos descendentes seguidos por descargas de retorno subsequentes ascendentes similares aos que ocorrem em relâmpagos nuvem-solo. Segundo Uman (1987), os relâmpagos solo-nuvem cujos líderes têm início em estruturas proeminentes naturais (topo de montanhas, árvores, etc.) são conhecidos como relâmpagos naturais, já aqueles cujos líderes têm início a partir de superfícies proeminentes artificiais (prédios, etc.) ou através de uma intervenção proposital (lançamento de foguetes) ou eventual (vôos de aeronaves) são conhecidos como artificiais.

Geralmente os líderes ascendentes que iniciam os relâmpagos solo-nuvem são precedidos por relâmpagos na nuvem, que geram em fração de segundos um forte campo elétrico próximo às superfícies proeminentes capaz de iniciá-los. Os relâmpagos solo-nuvem quando positivos raramente apresentam ramificações, porém quando apresentam, elas são para cima em decorrência do líder ser ascendente.

McEachron (1939), citado por Uman (1987), descobriu que cada passo luminoso do líder escalonado ascendente possui comprimento médio de 8,2m. O intervalo de tempo médio entre os passos do líder é de  $30\mu\text{s}$  e sua velocidade média ascendente é de  $2,6 \times 10^5 \text{m/s}$ .

A Figura 2.14 mostra uma forma de onda de corrente de um relâmpago solo-nuvem publicada por Berger (1967), citada por Uman (1987).

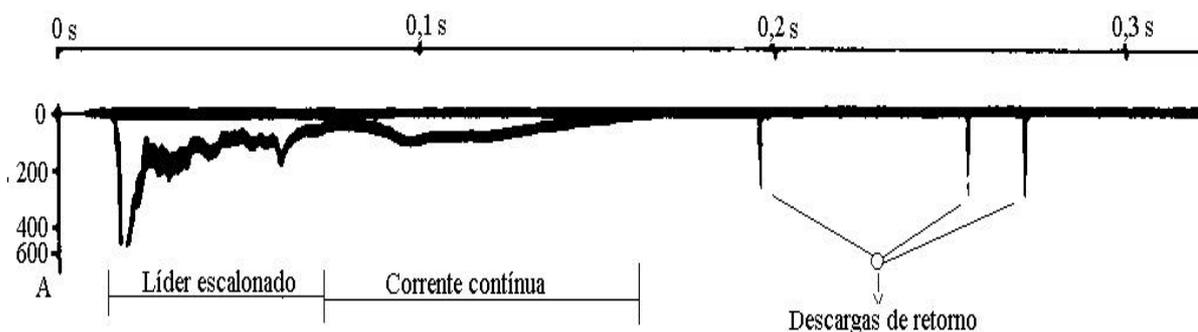


Fig. 2.14 - Forma de onda de corrente de um relâmpago solo-nuvem.

FONTE: Adaptada de Uman (1987, p. 211)

As variações de corrente durante os primeiros instantes, que possuem até algumas centenas de ampères, correspondem ao líder escalonado ascendente. O tempo para a corrente atingir o valor máximo é de centésimos a décimos de segundos. A corrente contínua apresenta-se após o líder escalonado, com valor da ordem de centenas de ampères e tendo duração total de décimos de segundos. Nesta forma de onda de corrente podem ser observados também, intervalos de tempo com ausência de corrente contínua, apresentando apenas os pulsos das descargas de retorno subsequentes.

Segundo Uman (1987), Berger (1977, 1978) encontrou descargas nas quais um líder escalonado negativo ascendente pode iniciar descargas de retorno descendentes. A carga média positiva transferida para o solo em 28 relâmpagos com líderes negativos ascendentes ocorridos entre 1955 e 1965 foi de 64C. A análise de dados obtidos entre 1963 e 1973 fornece um valor mediano para a carga transferida de 26C para 37 casos nos quais não havia descargas de retorno descendentes positivas e 84C para 35 casos em que ocorreram descargas de retorno descendentes positivas. Estudos de cargas transferidas por relâmpagos iniciados por líderes ascendentes positivos relatam um valor médio de 22C para 329 relâmpagos, com carga máxima transferida igual a 220C. Berger (1978), citado por Uman (1987), para 172 relâmpagos, descobriu uma carga mediana de 23C.

### **2.3.3 – RELÂMPAGOS NO CÉU**

Além dos relâmpagos até agora comentados, existem também os relâmpagos que não atingem o solo. Eles ocorrem dentro da nuvem, entre nuvens, ou entre nuvens e bolsões invisíveis de cargas localizados no ar (descargas para o ar) ou da nuvem para o alto, no sentido da nuvem para a ionosfera. Todos estes relâmpagos possuem mecanismos similares e são chamados de relâmpagos no céu. Entre os relâmpagos no céu, os relâmpagos dentro da nuvem são os que ocorrem em maior percentual dentro da totalidade dos relâmpagos, sendo em torno de 90% dos relâmpagos que ocorrem em regiões de baixas latitudes, próximas ao equador geográfico e em torno de 50% em regiões de altas latitudes, próximas aos pólos geográficos (Pinto Jr e Pinto, 1996), não possuindo canal visível. No caso de relâmpagos entre nuvens o canal pode ser visto. Nas descargas para o ar o canal é visto fora da nuvem, sendo direcionado a um bolsão invisível de cargas.

Os relâmpagos na nuvem geralmente começam com uma descarga positiva mais lenta a partir da base do centro de cargas positivas, podendo se propagar tanto para baixo quanto na direção horizontal formando um caminho ramificado. A descarga distribui cargas positivas ao longo do caminho ramificado em um processo parecido ao processo de *breakdown* em descargas para o solo. À medida em que a descarga vai se propagando e a região de onde suas cargas saíram vai ficando escassa em cargas, pode ocorrer que a descarga encontre pacotes de cargas opostas que penetrem no caminho ramificado através de suas pontas e neutralizem as cargas positivas sob a forma de uma descarga mais rápida. Estas descargas mais rápidas são conhecidas como descargas K e provocam mudanças no campo elétrico medido no solo denominadas variações K. Quando as cargas positivas encontram pacotes mais intensos de cargas opostas ocorrem descargas mais intensas, análogas às descargas de retorno em um relâmpago nuvem-solo. A descarga como um todo tem a duração de 500ms e a corrente dessas descargas é da ordem de 1000A .

### **2.3.4 – RELÂMPAGOS INDUZIDOS**

Os relâmpagos induzidos são iniciados através de uma atuação proposital ou eventual do homem, sendo classificados também como artificiais. Uma técnica de se induzir relâmpagos consiste em lançar foguetes aterrados por um fio em direção à uma nuvem sem carga suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar e iniciar o relâmpago por si mesma. Esta técnica é baseada na distorção do campo elétrico resultando na sua intensificação. Este efeito é provocado pela introdução de um condutor (foguetes) no meio onde há o campo elétrico. A rápida introdução do condutor evita que a corrente corona que surge devido à intensificação do campo, tenha tempo para inibir a ocorrência da descarga elétrica, uma vez que a corrente corona tende a impedir que o campo elétrico atinja o valor de ruptura da rigidez dielétrica. Os relâmpagos induzidos podem ser gerados pelo lançamento de foguetes ligados ao solo por um fio condutor, o qual serve como caminho para o relâmpago. Este método possui a vantagem de saber onde o relâmpago cairá. Esse experimento foi realizado primeiramente sobre o mar (Newman et al., 1967) e posteriormente de forma similar sobre o solo (Fieux et al., 1975), citado por Uman (1987). Objetos condutores não ligados ao solo também podem induzir relâmpagos. Como exemplo pode-se citar a Apollo 12 atingida por dois relâmpagos durante sua ascensão (Godfrey et al., 1970), citado por Uman (1987).

## **2.4 – OUTRAS SITUAÇÕES EM QUE OCORREM RELÂMPAGOS**

Além das tempestades, os relâmpagos também podem ocorrer durante as erupções vulcânicas, explosões nucleares e às vezes, em grandes terremotos e tempestades de areia. Muitas pessoas testemunharam a ocorrência de relâmpagos em terremotos, porém, confirmações científicas ainda não existem.

Existem relâmpagos incomuns e o primeiro deles a ser comentado aqui é o *relâmpago fita*. Neste relâmpago o canal se apresenta mais largo devido ao seu espalhamento pela ação do vento. A dimensão da faixa do relâmpago dependerá da força do vento e do ângulo entre os olhos do observador e a direção do vento.

Outro tipo, é o *relâmpago bola*. É uma esfera luminosa de 10 a 20cm de diâmetro, que às vezes surge após um relâmpago nuvem-solo. Se move próximo ao solo ou pelo ar com velocidade que ainda não é bem conhecida, porém relatos dizem que ela pode variar desde a velocidade de uma caminhada até à velocidade de uma corrida de um homem. Às vezes é oval, tendo uma coloração que pode ser branca, vermelha, amarela ou até azul. Geralmente tem duração de alguns segundos podendo algumas vezes durar até minutos. Desaparece silenciosamente ou até mesmo explode quando em contato com árvores, casas, etc. Ainda não se tem certeza, mas o *relâmpago bola* pode talvez ser uma esfera gasosa de plasma. Alguns pesquisadores tentam sintetizar o *relâmpago bola* em laboratório.

Existe também o *relâmpago tracejado*. Primeiramente apresenta-se com um canal comum e com o tempo a luminosidade vai se tornando mais fraca em alguns pontos, dando ao canal uma estrutura como a de traços luminosos. Estes relâmpagos possuem longa duração e ocorrem apenas em fortes tempestades. Segundo Uman (1987), a literatura sobre *relâmpagos bola* e *relâmpagos tracejados* é revista por Barry (1980).

Relâmpagos vulcânicos são aqueles que ocorrem durante as erupções vulcânicas. Ocorrem no violento fluxo de cinzas que sai da cratera. Às vezes eles podem sair da nuvem de cinzas podendo ser melhor visualizados. Há correntes ascendentes e descendentes dentro da nuvem de cinzas responsáveis pelo movimento entre as partículas pequenas e grandes, as quais por atrito se tornam carregadas. Eletrificação por atrito também ocorre durante a ejeção em alta velocidade das cinzas da cratera. As partículas maiores caem mais rapidamente do que as menores, de modo que, a porção superior da nuvem é rica em partículas pequenas e a parte inferior de partículas grandes. Discussões sobre relâmpagos vulcânicos são apresentadas por Anderson et al. (1965) e bonitas fotos são encontradas em Salanave (1980).

Sabe-se que as grandes queimadas também são responsáveis pelo aumento do número de nuvens de tempestade e de relâmpagos. Como exemplo pode-se citar as grandes queimadas que surgiram durante os ataques na segunda guerra mundial, principalmente

no momento da explosão da bomba atômica em Hiroshima em 1945, tendo como um dos resultados uma chuva negra acompanhada de relâmpagos.

Há evidências experimentais de que detonações nucleares geram relâmpagos. No experimento chamado Ivy-Mike, realizado no oceano Pacífico em 1952, uma bomba de hidrogênio foi testada e após 10ms ocorreram relâmpagos (Uman et al., 1972). A explosão ocorreu com forma de uma bola de fogo hemisférica. Os relâmpagos iniciaram-se próximos ao solo em torno da bola de fogo e progrediram se ramificando pela bola de fogo. Simulações em laboratório foram feitas para provar que o relâmpago era induzido nos pontos no solo, onde o campo elétrico era grande e viajava para cima através de uma região de maior carga negativa.



## CAPÍTULO 3

### TÉCNICA EXPERIMENTAL E METODOLOGIA DE TRABALHO

#### 3.1 - TÉCNICA EXPERIMENTAL

O equipamento para obtenção das formas de onda de campo elétrico de relâmpagos, consistiu em uma antena e um aparato eletrônico para aquisição e processamento de sinais (eletrônica), compondo o detector de relâmpagos. Esse detector foi projetado pelo Laboratório de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do INPE e será comentado a seguir. A campanha na qual esse detector foi utilizado ocorreu no período de outubro de 1998 a março de 1999. Esta campanha foi realizada no Brasil, no estado de São Paulo, na cidade de São José dos Campos (45,864° W, 23,215° S), a uma altitude de 630m, sendo que o sítio do experimento localiza-se no Centro Técnico Aeroespacial (CTA).

Além do detector de relâmpagos foram utilizados também computadores para coleta e armazenamento das informações adquiridas e um *Electric Field Mill* para verificação da possibilidade da ocorrência de relâmpagos. O *Electric Field Mill* é um instrumento que mede variações lentas de campo elétrico e por isso pode ser usado na monitoração dos campos elétricos das nuvens, podendo-se também observar a presença de picos de campo elétrico associados às descargas de retorno dos relâmpagos. Na Figura 3.1 pode-se ver o *Electric Field Mill* utilizado na campanha.



Fig. 3.1 - *Electric Field Mill* utilizado para monitoração do campo elétrico das nuvens de tempestade.

A antena utilizada para obtenção de forma de onda de campo elétrico consiste em uma haste de cobre instalada em um ponto alto na superfície da Terra. Como a antena foi desenvolvida pelo próprio ELAT, o grupo tem em mãos não apenas as medidas feitas por ela mas também o conhecimento do seu próprio funcionamento, o que ajuda na análise dos dados. Além da antena, também são utilizados outros instrumentos tais como, computadores, filmadoras, um *Electric Field Mill*, câmera fotográfica e um GPS. Estes instrumentos estão instalados em uma torre de 28m de altura, cuja localização é em uma área livre de estruturas proeminentes que poderiam distorcer os sinais que chegam até ela e também distante de fontes quaisquer de ruídos. Localiza-se em um ponto estratégico, o qual associado à sua arquitetura favorece um campo visual de quase 360º, o que é importante na monitoração de tempestades e observação dos relâmpagos. Estas características tornam o sítio interessante para pesquisa em relâmpagos. A Figura 3.2 é uma foto da torre onde se encontra o detector de relâmpagos juntamente aos outros equipamentos utilizados na campanha.



Fig. 3.2 - Torre localizada no CTA, em São José dos Campos, onde os instrumentos estão instalados.

Ao ocorrer o relâmpago, a radiação eletromagnética por ele gerada se propaga pelo espaço. Ao entrar em contato com a antena, o campo elétrico variável no tempo induz nela um sinal de tensão também variável no tempo. Este sinal possui um amplo intervalo de frequência e é conduzido por um fio até à eletrônica, onde há um filtro de frequências (passa alta) de dois ou duzentos hertz. Os sinais com frequência iguais ou acima do valor ajustado, são amplificados e selecionados para serem registrados. Além disso, a eletrônica indica a ocorrência de relâmpagos através de sinais sonoros (bips).

O registro dos sinais é feito em um microcomputador que recebe os sinais selecionados pela eletrônica. Esse microcomputador possui uma placa de aquisição de dados, que faz a leitura de um dado sinal a cada  $37\mu\text{s}$ , gravando um conjunto de dados em arquivos de 1s de duração. A Figura 3.3 mostra as antenas instaladas na torre. Utiliza-se uma das antenas pequenas para se fazer medidas quando os relâmpagos estão ocorrendo

próximos à torre, evitando assim saturação do sinal e uma das grandes quando os relâmpagos estão distante.



Fig. 3.3 - Antenas de detecção da forma de onda de campo elétrico de relâmpagos.

Para melhor entendimento sobre o funcionamento da eletrônica, a mesma pode ser dividida em oito blocos, os quais podem ser vistos no esquema apresentado na Figura 3.4.

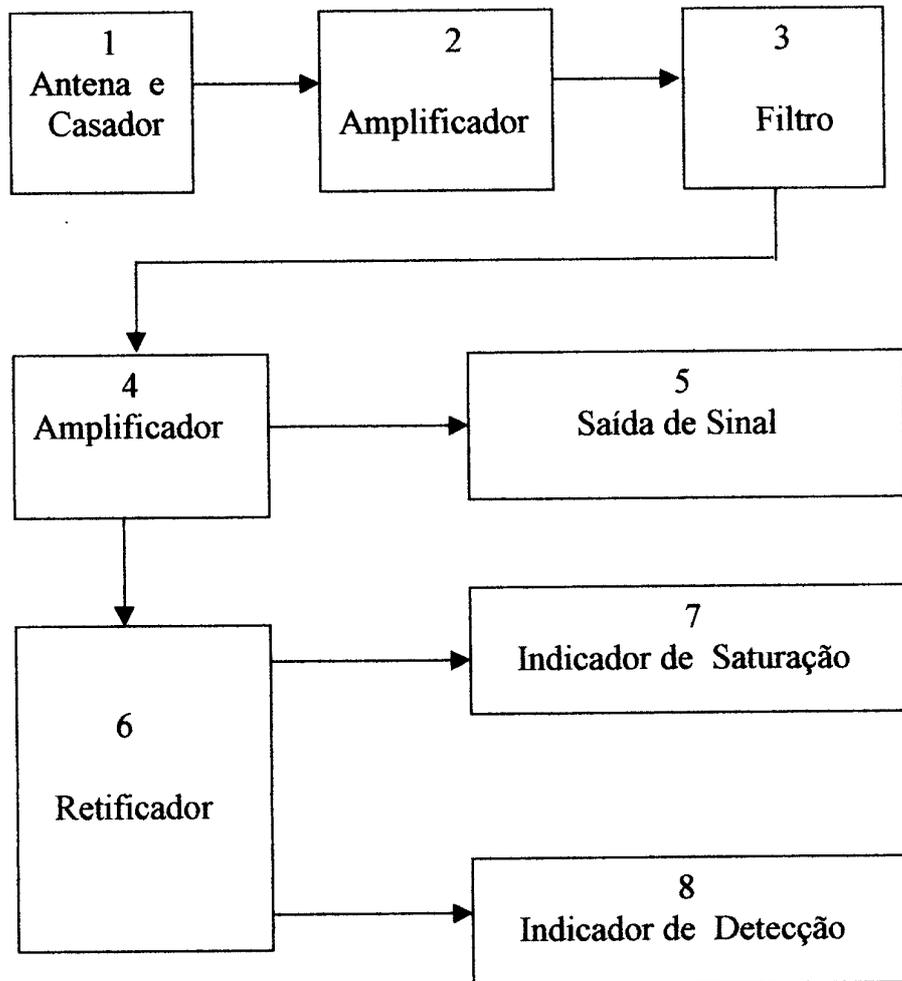


Fig. 3.4 - Esquema da eletrônica do detector de relâmpagos.

O bloco 1 é composto pela antena externa (Figura3.3) juntamente a um casador. Neste casador tem-se um amplificador que possui uma entrada diferencial FET (transistor de efeito de campo), garantindo alta impedância de entrada e que isola a antena da eletrônica, evitando assim que haja interferência de uma sobre a outra de modo a modificar o sinal. Tendo em vista que descargas próximas podem induzir na antena tensões acima de 15V, as quais poderiam danificar a eletrônica, existe também uma proteção contra surtos acima de deste valor. O sinal ao passar pelo bloco 1 ele tem sua fase invertida, assim, no bloco 2 tem-se um amplificador inversor que garante que a fase do sinal de saída seja a mesma fase do sinal de entrada. Através deste amplificador inversor o ganho pode ser ajustado de tal forma que o ganho total dos módulos 1, 2 e 3 seja unitário.

Após o sinal ser processado nos blocos 1 e 2, deve-se selecionar o sinal de interesse, pois o relâmpago gera uma radiação com amplo espectro de frequência. No bloco 3 tem-se um filtro ativo passa alta com frequência de 2Hz ou 200Hz, com atenuação de 24db/dec e ganho aproximadamente unitário. Porém, devido a uma limitação dos componentes da eletrônica, os sinais com frequência acima de 200KHz são eliminados, de forma que a eletrônica como um todo funciona como um filtro passa faixa de 2Hz ou 200Hz a 200KHz.

No bloco 4 tem-se um amplificador cujo ganho pode ser ajustado através de uma chave seletora na eletrônica. Este bloco permite a detecção de formas de onda de relâmpagos que ocorram a dezenas de quilômetros e também a distâncias menores. Isto é necessário porque, o movimento relativo entre a tempestade e a antena causa variação nos sinais dos relâmpagos, podendo ocorrer a saturação ou a atenuação do sinal.

No bloco 5 tem-se um atenuador passivo de sinal que opera em conjunto com um grampeador a diodo zener, garantindo uma tensão máxima de saída de 5V para o conversor A/D. Este conversor consiste em uma placa de digitalização instalada em um microcomputador, responsável pelo armazenamento digital do sinal de tensão induzido na antena pelo relâmpago.

Para a indicação da ocorrência do relâmpago e também da saturação do sinal, é necessário que a eletrônica compare os sinais com limites pré-estabelecidos. Estes limites consistem em dois valores mínimos de tensão para a indicação da ocorrência do relâmpago sendo um positivo e outro negativo e dois valores máximos de tensão que indicam a saturação, sendo um positivo e outro negativo. São necessários valores positivos e negativos devido ao fato de que a polaridade dos sinais dependerá do tipo do relâmpago, relâmpagos positivos geram sinais com polaridade diferente dos sinais gerados por relâmpagos negativos. Com o objetivo de tornar a indicação da ocorrência do relâmpago e da saturação do sinal um processo mais rápido, no bloco 6 tem-se um retificador de onda completa, o qual inverte os sinais negativos, para que todos os sinais, sejam eles positivos ou negativos, possam ser comparados apenas com os limites positivos para a indicação da ocorrência do relâmpago ou da saturação do sinal.

O bloco 7 é composto por um dispositivo que indica saturação do sinal, situação que ocorre quando o sinal da antena recebido pela eletrônica é superior ao seu limite de tolerância. A indicação de saturação é feita por um LED (diodo emissor de luz) que se acende indicando de saturação do sinal.

Finalmente, no bloco 8 tem-se um indicador sonoro de sinal que produz um “bip” quando um sinal com amplitude maior do que um valor pré determinado é recebido pela eletrônica. Este indicador de sinal é importante, pois ele, associado à observação visual dos arquivos de dados digitalizados através da interface do microcomputador, permite encontrar o arquivo em que o sinal está, uma vez que a placa de aquisição de dados trabalha continuamente construindo arquivos independente da ocorrência de relâmpagos. A Figura 3.5 é uma foto da eletrônica (detector de relâmpagos) construída pelo ELAT.



Fig. 3.5 - Detector de relâmpagos.

Este equipamento já testado apresenta razoável desempenho, o que dá confiabilidade nos dados obtidos. No entanto, como existem processos que ocorrem a uma escala superior à taxa de aquisição da placa digitalizadora, esses processos não ficam evidentes na forma de onda obtida pela antena, de forma que os dados ficam limitados ao estudo de processos que ocorrem a uma velocidade menor ou de mesma ordem de grandeza dessa taxa. Um parâmetro que geralmente é estudado na forma de onda de campo elétrico dos relâmpagos é a sua amplitude. Porém, com utilização de uma placa de  $37\mu\text{s}$ , sabe-se que este parâmetro pode ser “mascarado”. Por exemplo, durante a ocorrência de uma descarga de retorno, como a taxa de aquisição da placa é menor do que a taxa de variação da própria radiação, pode ocorrer que os pontos que correspondem aos valores de picos das descargas de retorno não sejam registrados, tendo como resultado uma forma de onda digitalizada com amplitude menor do que a real. Como o estudo da amplitude da forma de onda de campo elétrico não é objetivo deste trabalho, as limitações da eletrônica não impedem um estudo das formas de onda obtidas por ela.

## 3.2 - METODOLOGIA DE TRABALHO

Em resumo a diretriz de trabalho consistiu em:

a) Obter formas de onda de campo elétrico de relâmpagos identificados visualmente como nuvem-solo, ou no céu;

b) Seleção das formas de onda a serem analisadas;

c) Análise das formas de onda;

d) Registro dos resultados, discussão e conclusão do trabalho.

A obtenção dos dados foi realizada durante a campanha. Foram armazenadas no banco de dados apenas as formas de onda de relâmpagos identificados visualmente. Para tal foram necessárias pelo menos duas pessoas, uma para observar visualmente a ocorrência dos relâmpagos, relatando se o mesmo ocorreu para o solo ou no céu e outra para cuidar da aquisição dos dados, verificando no computador o arquivo no qual a forma de onda do relâmpago identificado pela primeira pessoa foi registrada. Para cada relâmpago identificado, o número do arquivo contendo sua forma de onda era anotado para depois eliminarmos do banco de dados todos os arquivos que não continham registro de relâmpago.

Após a aquisição das formas de onda, foi feita a redução dos dados. Nesta etapa, primeiramente os arquivos foram separados em relâmpagos nuvem-solo e no céu. A partir daí, todas as formas de onda foram impressas para uma posterior observação seletiva. Os arquivos contendo pulsos significativos quando comparados ao ruído da rede, 28 relâmpagos nuvem-solo no total, foram selecionados para análise de suas formas de onda. Da mesma forma foram selecionadas as formas de onda de relâmpagos no céu, sendo que cinco formas de onda de relâmpagos no céu foram selecionadas para análise. Após a seleção das formas de onda as próximas etapas foram análise das

mesmas, obtendo-se os resultados que são apresentados e discutidos no capítulo 4, seguida das conclusões que são apresentadas no capítulo 5.

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste Capítulo serão apresentados os resultados obtidos na análise de formas de onda de campo elétrico adquiridas no Brasil, nos meses de outubro de 1998 a fevereiro de 1999. Este estudo foi realizado pela primeira vez no Brasil e os tópicos de análise foram:

- a) O tempo entre as descargas de retorno sucessivas em relâmpagos múltiplos;
- b) O tempo entre as descargas K;
- c) Duração das variações preliminares;
- d) Observação das formas de onda de campo elétrico dos relâmpagos no céu;
- e) Observação de formas de onda de campo elétrico atípicas.

#### **4.1 – TEMPO MÉDIO ENTRE DESCARGAS DE RETORNO**

Para uma análise do tempo médio entre as descargas de retorno foram utilizadas 28 formas de onda, onde o critério de seleção destas formas de onda exigiu a necessidade da identificação visual do relâmpago como sendo nuvem-solo e a existência de pulsos que se destacassem em relação ao ruído da rede. A Figura 4.1 apresenta o gráfico do percentual de ocorrência das descargas de retorno em função de sua ordem, para relâmpagos registrados nos meses de janeiro de 1999 a fevereiro de 1999. A ordem de uma descarga de retorno corresponde à sua posição dentro da seqüência de ocorrência das descargas de retorno em um relâmpago múltiplo.

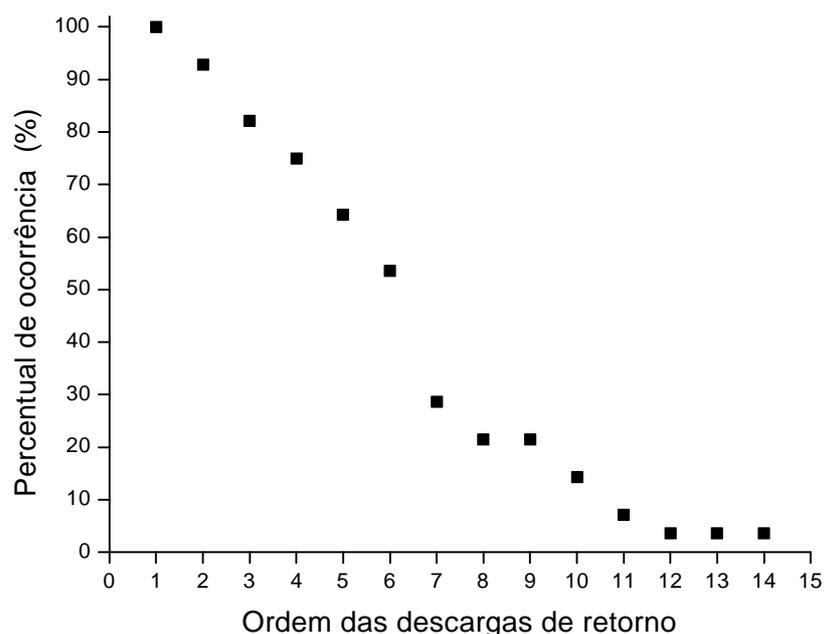


Fig. 4.1 - Percentual de ocorrência de descargas de retorno de uma determinada ordem, em relâmpagos nuvem-solo registrados no período de janeiro de 1999 a fevereiro de 1999.

Este gráfico foi obtido a partir da análise de 28 relâmpagos nuvem-solo, onde foi feita uma contagem do número de descargas de retorno de uma determinada ordem dentro do espaço amostral, independente da multiplicidade dos relâmpagos. Na Figura 4.1 pode-se ver que a ocorrência de uma descarga de retorno em um relâmpago diminui à medida em que a ordem da descarga aumenta. Esse comportamento para a distribuição das descargas de retorno tem como base física o fato de que, à medida em que há ocorrências de descargas de retorno com ordens cada vez maiores, a nuvem fica cada vez mais descarregada, desfavorecendo a ocorrência de descargas de retorno de ordens maiores. Pode-se ver que o percentual de ocorrência de uma determinada descarga de retorno cuja ordem assuma um valor qualquer que varie de 1 a 6 é maior ou igual a 50%, ao passo que, o percentual de ocorrência de uma determinada descarga de retorno cuja ordem assuma um valor qualquer variando de 7 a 14 é menor ou igual a 30%. Observa-se um maior decréscimo no percentual de ocorrência da sexta descarga de retorno para a sétima, o que mostra uma ocorrência de descargas de retorno com ordens

acima de seis bem menor do que a ocorrência das descargas de retorno com ordens inferiores ou iguais a seis.

Schonland (1956) na África do Sul analisou a multiplicidade de 1800 relâmpagos nuvem-solo, obtendo como resultado o histograma apresentado na Figura 4.2a. Pode-se observar que há um pico na multiplicidade igual a cinco, o qual foi atribuído à ocorrência de tempestades oriundas de sistemas frontais, uma vez que, Holzer (1953) afirmou que tais tempestades são responsáveis por um aumento no valor da multiplicidade. Porém, Thomson et al. (1984) na Flórida analisaram a multiplicidade de 105 relâmpagos oriundos apenas de tempestades convectivas, cujo resultado é mostrado na Figura 4.2b, apresentando picos na multiplicidade. Assim, não ficam claras quais são as causas do aumento de multiplicidade para determinadas ordens.

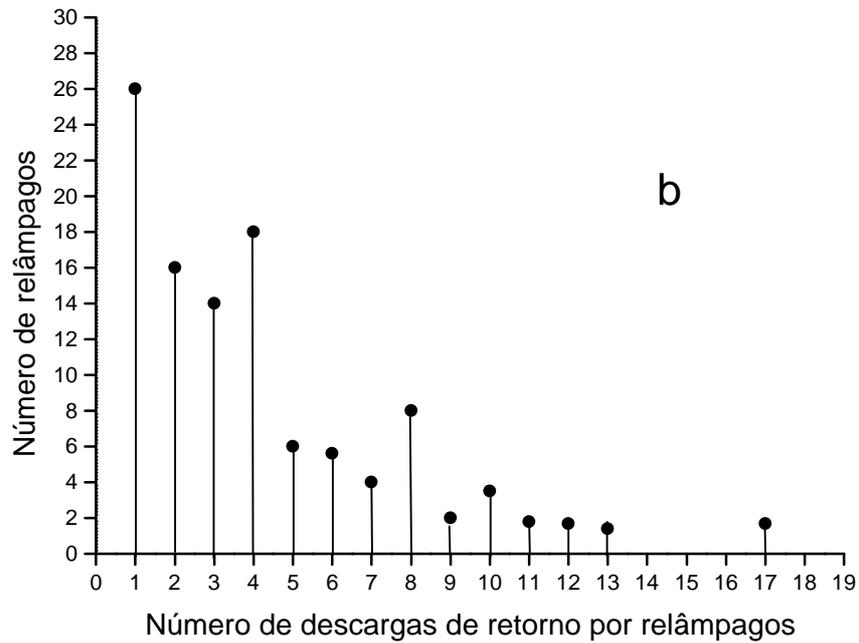
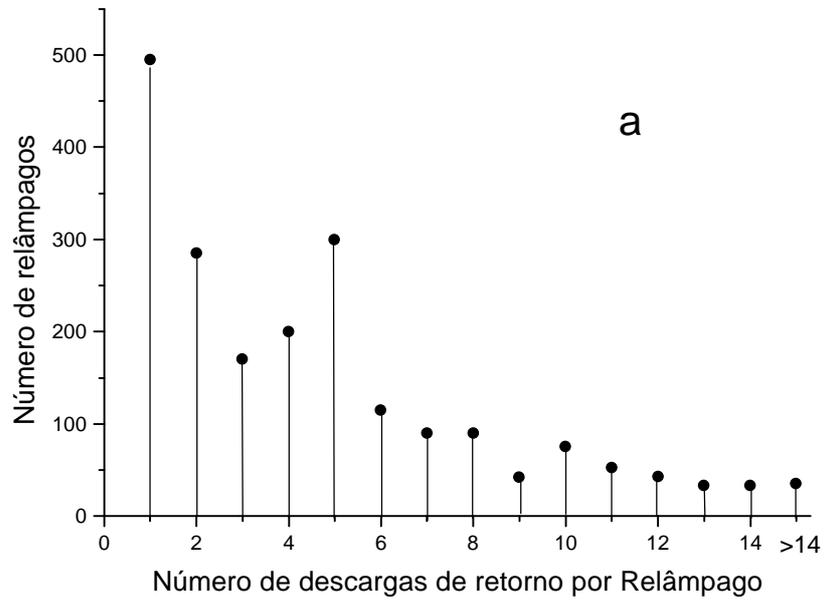


Fig. 4.2 - Histograma da multiplicidade de relâmpagos. a) 1800 relâmpagos analisados por Schonland (1956) na África do Sul; b) 105 relâmpagos analisados por Thomson et al. (1984) na Flórida.

FONTE: Adaptada de Uman (1987, p.18).

A Figura 4.3 ilustra a distribuição da multiplicidade dos relâmpagos ocorridos no Brasil.

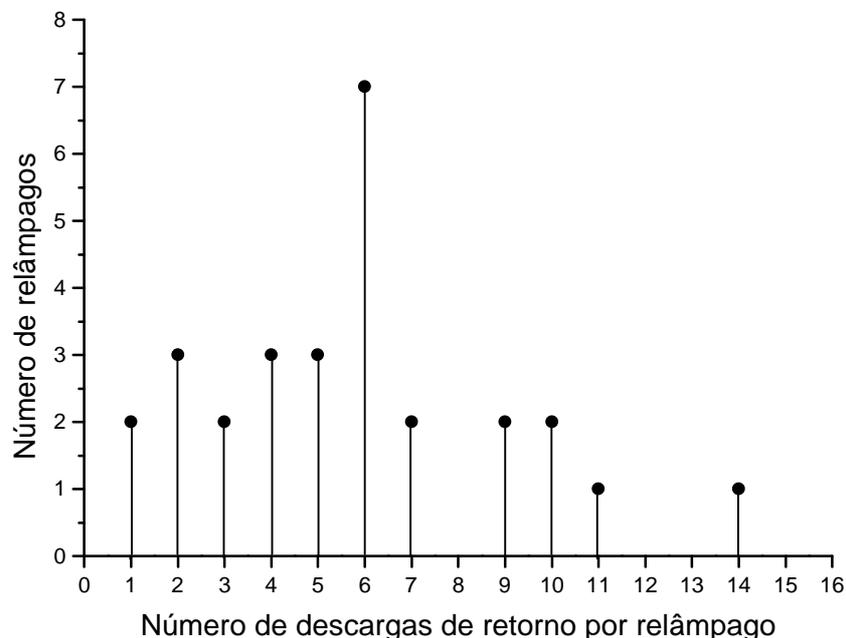


Fig. 4.3 - Histograma da multiplicidade de relâmpagos obtido a partir de 28 relâmpagos nuvem-solo ocorridos no período de janeiro de 1998 a fevereiro de 1999.

Comparando-se os histogramas das Figura 4.3 com a Figura 4.2a,b nota-se que as Figuras 4.1a e 4.1b são semelhantes e indicam que o número de relâmpagos em função da multiplicidade decai exponencialmente para ordens maiores tanto na África do Sul quanto na Flórida. Porém, o mesmo não pode ser dito a partir da Figura 4.3.

Na Figura 4.3, dois aspectos interessantes devem ser observados: o primeiro é a existência de um pico localizado na sexta descarga de retorno e o segundo, é o fato de que a primeira descarga de retorno não corresponde ao valor máximo na distribuição, ao contrário do que é observado na Figuras 4.2a e 4.2b.

O segundo aspecto pode ser devido ao fato de que a observação visual de relâmpagos de maior multiplicidade (mais duradouros) é mais fácil devido à sua maior exposição. Isto

confere ao relâmpago de maior multiplicidade uma probabilidade maior de fazer parte do banco de dados, uma vez que, para isso, além de ser obtida a sua forma de onda, é necessário que ele seja observado visualmente. Desta forma, o banco de dados ao ser construído apresenta uma maior tendência em possuir maior número de relâmpagos com maior multiplicidade. Este efeito foi denominado de “Polarização” do banco de dados. O leitor pode ser levado a pensar então que, o número de relâmpagos com multiplicidade maior deveria ser sempre maior do que o número de relâmpagos com multiplicidade menor, o que não é observado para multiplicidades maiores do que 7 (sete). Isto ocorre porque, o fato de que o número de relâmpagos com multiplicidade cada vez maior decai, como pode ser observado na Figura 4.2a,b, predomina sobre o efeito de polarização para multiplicidades maiores do que 7 (sete). Com relação ao primeiro aspecto, pode-se dizer a partir da observação da Figura 4.3 que, parece que os relâmpagos ocorridos no Brasil, possuem uma multiplicidade típica igual a 6 (seis). Tal evidência está em concordância com recentes resultados publicados para uma mesma região do Brasil (Pinto et al., 1999a,b).

Com respeito aos intervalos de tempo entre as descargas de retorno, primeiramente foi calculado o intervalo de tempo entre elas considerando-se as suas ordens de ocorrência. A tabela 4 mostra a estatística do tempo entre as descargas de retorno. Na primeira coluna tem-se as combinações entre as sucessivas ordens das descargas de retorno. A média dos tempos entre as sucessivas descargas de retorno calculada para 26 relâmpagos analisados é apresentada na segunda coluna, seguida de seus desvios padrões e o número de intervalos de tempo utilizados nos cálculos, apresentados nas duas últimas colunas. Foram utilizados apenas 26 dos 28 relâmpagos pelo fato de que 2 relâmpagos foram simples, não apresentando intervalo de tempo entre descargas de retorno.

**TABELA 4 – ESTATÍSTICA DO TEMPO ENTRE AS DESCARGAS DE  
RETORNO DOS RELÂMPAGOS NUVEM-SOLO OCORRIDOS NO BRASIL  
NO PERÍODO DE OUTUBRO DE 1998 A MARÇO DE 1999**

Ordem das Sucessivas Descargas de Retorno	Intervalo de Tempo Médio (ms)	Desvio Padrão (ms)	Número de Intervalos de Tempo
1-2	57,03	43,06	26
2-3	60,78	61,12	23
3-4	66,62	66,18	20
4-5	75,13	49,31	18
5-6	88,47	66,55	15
6-7	67,63	34,87	08
7-8	56,83	22,77	06
8-9	62,50	27,00	06
9-10	55,50	21,89	04
10-11	159,50	23,33	02
11-12	241,00	0,00	01
12-13	69,00	0,00	01
13-14	16,00	0,00	01

A Figura 4.4 é o gráfico dos intervalos de tempo médio entre as descargas de retorno em função da ordem das descargas, obtido a partir dos dados apresentados na tabela 4.

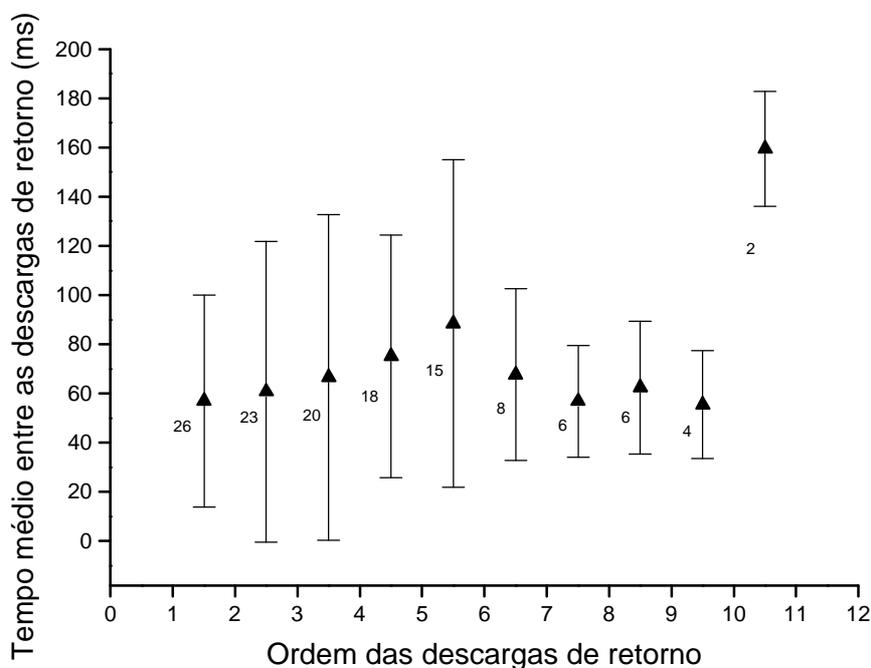


Fig. 4.4 - Tempo médio entre as descargas de retorno em função da ordem das descargas.

Na Figura 4.4, os números acima dos triângulos indicam o número de intervalos utilizados para o cálculo do tempo médio entre duas descargas de retorno sucessivas consideradas e as barras são os desvios padrões. Por exemplo, foram considerados os intervalos de tempo entre as descargas de retorno de ordens 3 e 4 e foi feita uma média entre esses tempos, obtendo-se um valor igual a 66,62ms para o tempo entre elas. Na Figura 4.4 são observados valores elevados para os desvios padrões e também uma tendência dos valores dos tempos entre as descargas de retorno flutuarem em torno de um valor médio, de forma que, não foi encontrada uma dependência do tempo entre as descargas de retorno com as suas ordens. Assim, fizemos então um cálculo para o tempo médio entre as descargas de retorno dos relâmpagos ocorridos no Brasil

independentemente das ordens das descargas de retorno e como resultado foi obtido um tempo médio de 69ms e desvio padrão de 55ms. Para este cálculo foram utilizados 131 intervalos de tempo entre descargas de retorno.

Da Figura 4.4 nota-se que, apesar do desvio padrão elevado, existe uma tendência do tempo entre as descargas de retorno crescer à medida em que ordens mais elevadas das descargas são consideradas, apresentando um valor máximo entre as descargas de ordens 5 e 6, caindo para intervalos entre descargas de ordem superior a 6.

A Figura 4.5 ilustra a distribuição dos intervalos de tempo entre descargas de retorno sucessivas para relâmpagos obtidos por Schonland (1956) na África do Sul. Este histograma foi obtido a partir de estatística feita sobre 1482 relâmpagos ocorridos na África do Sul (Schonland, 1956). Thomson et al. (1984) observaram que os tempos entre as descargas de retorno dos 105 relâmpagos que eles analisaram estavam distribuídos segundo uma curva semelhante à apresentada na Figura 4.5. Observaram também que, o logaritmo dos intervalos de tempo entre as descargas de retorno analisadas por eles, estavam distribuídos segundo a curva apresentada na Figura 4.6, verificando então que o tempo entre as descargas de retorno em relâmpagos nuvem-solo segue uma distribuição log normal.

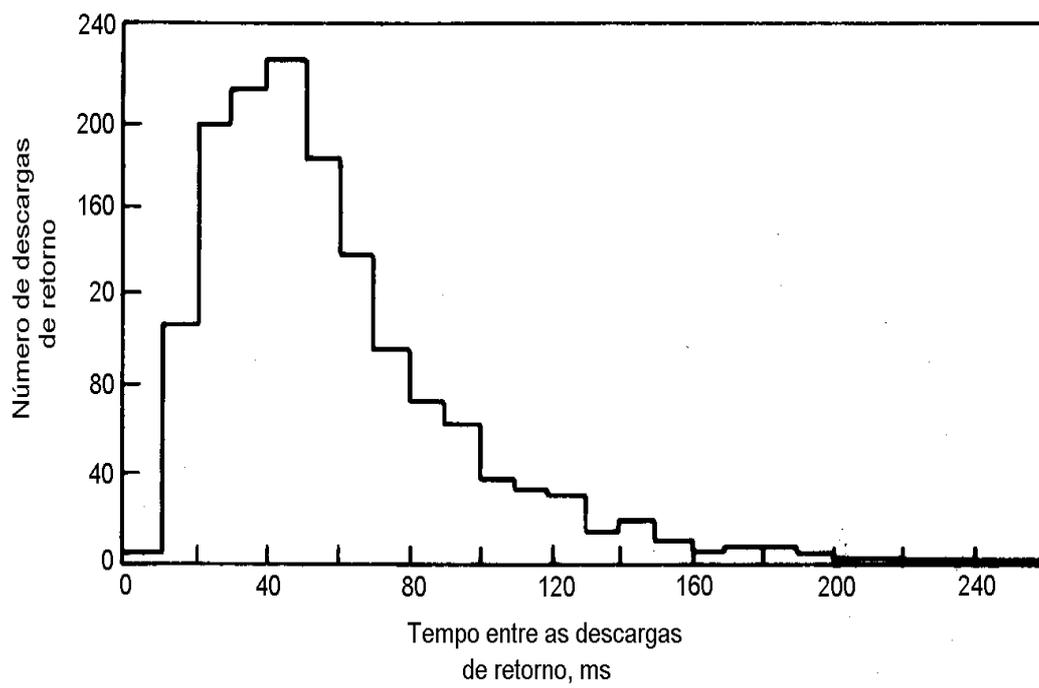


Fig. 4.5 - Histograma dos intervalos de tempo entre as descargas de retorno sucessivas.

FONTE: Adaptada de Schonland (1956,p. 578)

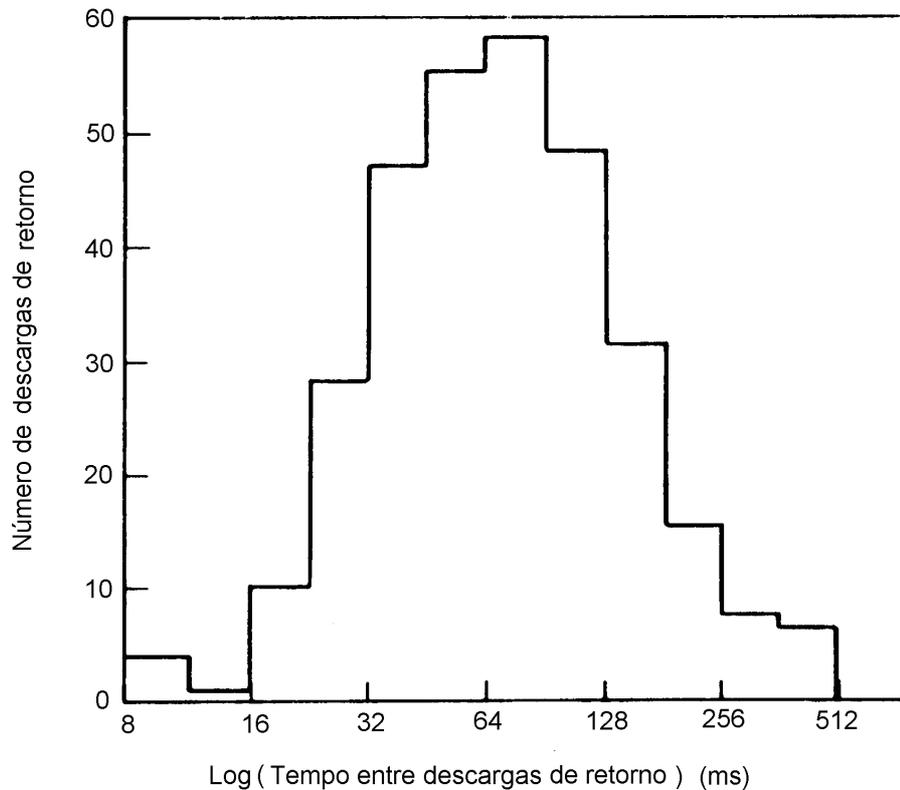


Fig. 4.6 - Histograma dos intervalos de tempo (em escala logarítmica) entre descargas de retorno sucessivas.

FONTE: Adaptada de Thomson et al.(1984).

As Figuras 4.7 e 4.8 são histogramas dos intervalos de tempo entre as descargas de retorno de relâmpagos ocorridos no Brasil, o primeiro em escala temporal linear e o segundo com o eixo do tempo em escala logarítmica, através dos quais observa-se que a distribuição dos intervalos de tempo entre as descargas de retorno no Brasil também segue uma distribuição log normal.

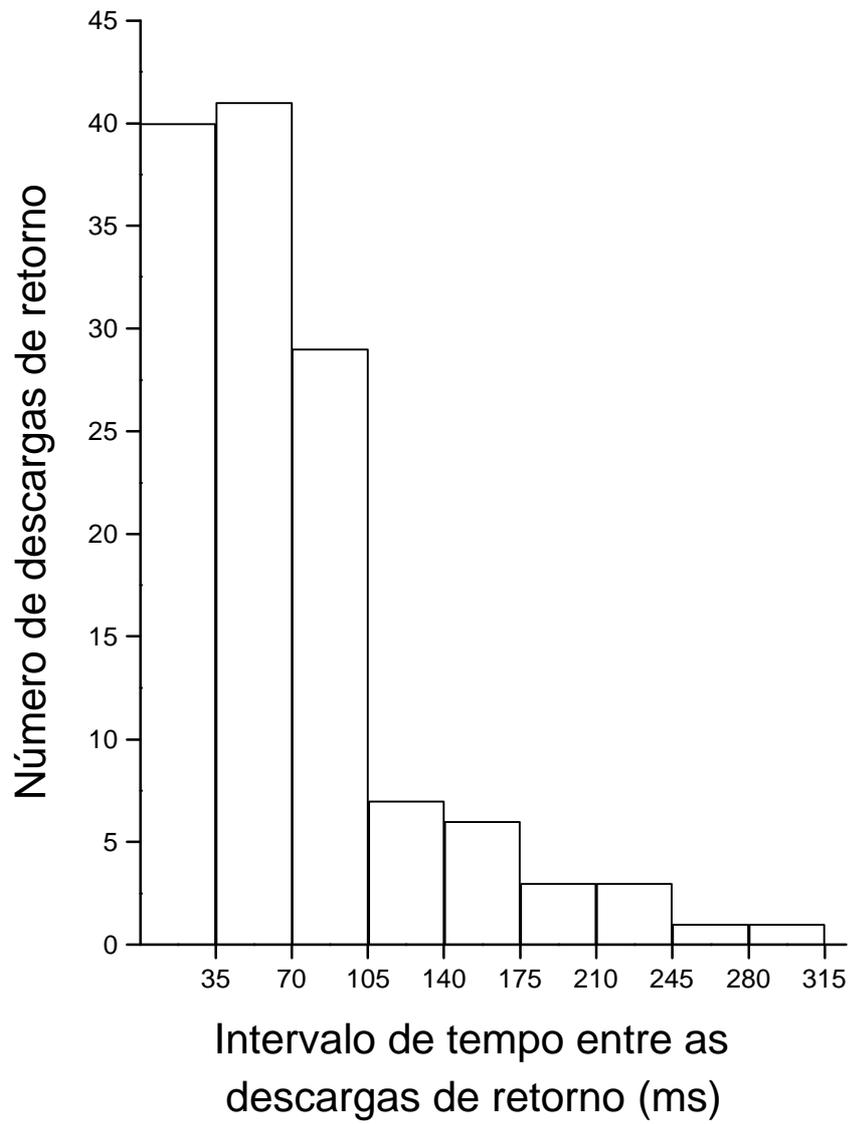


Fig. 4.7 - Histograma dos intervalos de tempo entre descargas de retorno sucessivas em relâmpagos nuvem-solo.

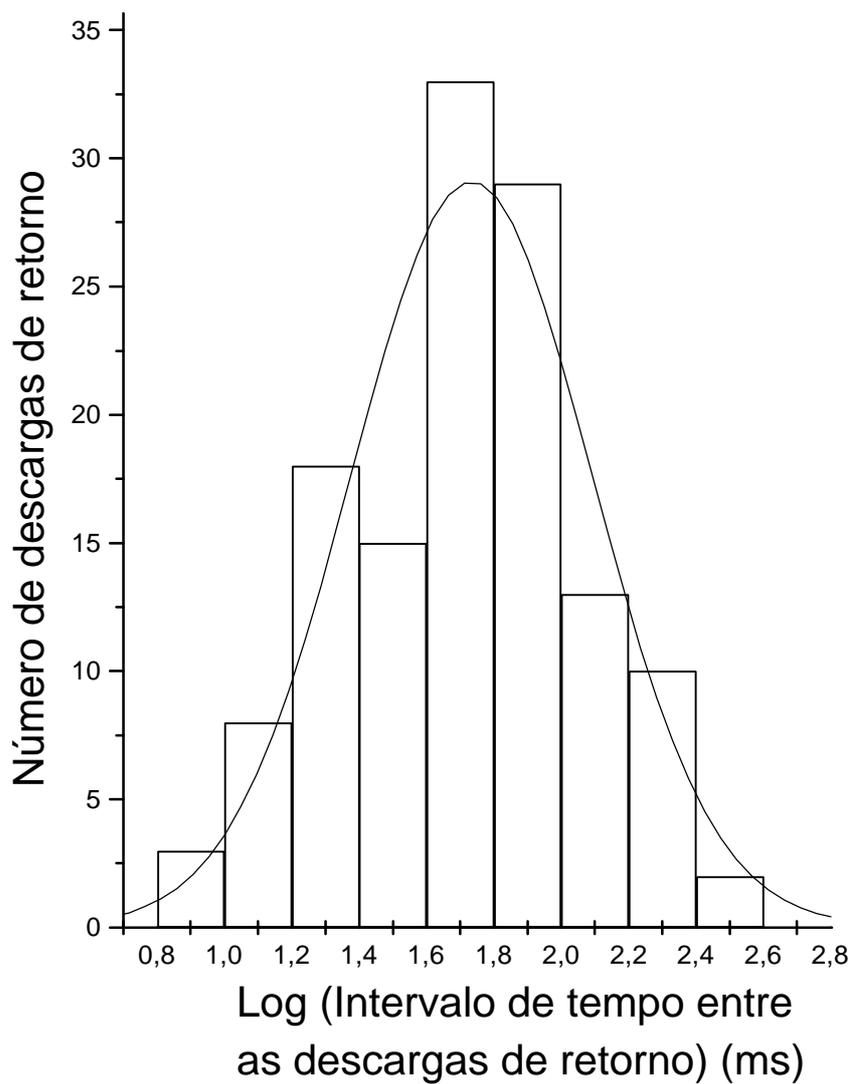


Fig. 4.8 - Histograma dos intervalos de tempo (escala logarítmica) entre descargas de retorno sucessivas em relâmpagos nuvem-solo.

É interessante observar que esses resultados concordam com os resultados de Schonland (1956) e Thomson (1984).

## 4.2 – TEMPO MÉDIO ENTRE AS DESCARGAS K

Em relâmpagos nuvem-solo múltiplos, muitas vezes ocorrem descargas dentro da nuvem nos intervalos entre duas descargas de retorno consecutivas. O conjunto destas descargas com finalidade de fazer a junção entre descargas de retorno sucessivas é denominado de processo de Junção ou processo J. O processo J produz uma variação lenta do campo elétrico medido no solo, cuja amplitude é menor do que a amplitude do campo elétrico produzido pela descarga de retorno, a qual pode ser detectada por antenas sensíveis às variações lentas de campo elétrico. É sugerido que o processo J inicia-se com o movimento de cargas positivas a partir do topo do canal remanescente, as quais penetram lentamente nas regiões da nuvem que contenham certa densidade de cargas negativas e lentamente este fluxo positivo é neutralizado, resultando em uma variação lenta do campo elétrico medido no solo. Dentro deste “mar” de cargas negativas existem pacotes concentrados de cargas negativas. Pode ocorrer que, durante o movimento do fluxo positivo, ele encontre um pacote concentrado de cargas negativas, resultando em uma descarga mais rápida e apenas dentro da nuvem, descarga esta chamada de descarga K (Ogawa e Brook, 1964). Para pacotes de cargas mais concentrados, a descarga pode ocorrer também fora da nuvem, ocorrendo um líder contínuo o qual restabelece o canal remanescente, precedendo uma nova descarga de retorno. Alguns investigadores acreditam que o processo J prepara a nuvem para uma nova descarga de retorno ao reconstruir o canal dentro da nuvem e favorecer a formação de um líder contínuo. As variações de campo elétrico associadas ao processo J podem ser positivas ou negativas, sendo geralmente menor do que as variações de campo elétrico geradas por corrente contínua, podendo durar até dezenas de milissegundos (Uman, 1987). As descargas K estão associadas a pequenas e rápidas variações do campo elétrico medido no solo, as quais se apresentam superpostas às variações de campo associadas ao processo J. Assim, é sugerido que as descargas associadas ao processo J sejam uma integração temporal de uma série de descargas K rápidas com duração menor do que 1ms (Brook e Vonnegut, 1960; Kitagawa e Brook, 1960). Permanece a seguinte questão: uma vez que alguns pesquisadores acreditam que o

processo J prepara a nuvem para uma nova descarga de retorno, as descargas K as quais se superpõem ao processo J também exercem o mesmo papel ?

O critério para a identificação das descargas K nos dados obtidos na campanha realizada no Brasil é explicado a seguir. Primeiramente para cada forma de onda do campo elétrico dos 28 relâmpagos analisados, foi feita uma estatística das amplitudes das supostas variações K, as quais estavam misturadas aos ruídos da rede e de processos internos à nuvem, que não as descargas K. O objetivo deste critério foi distinguir as variações de campo elétrico associadas às descargas K destas outras variações. A distinção entre as descargas de retorno e as variações K foi feita visualmente, uma vez que, as variações de campo elétrico produzidas pelas descargas de retorno se destacam frente às variações K. Foram eliminadas as descargas de retorno e as variações preliminares. Para as variações de campo elétrico remanescentes foram calculados os valores médios de suas amplitudes juntamente aos seus desvios padrões. Foram identificadas como variações K os pulsos com amplitudes maiores do que a soma do valor médio das amplitudes com o valor do seu desvio padrão ou menor do que a subtração do seu valor médio de amplitude com seu desvio padrão. Os pulsos localizados dentro desse intervalo foram considerados como ruídos. Uma análise visual dos dados frente a este critério mostrou que poucos pulsos apresentaram dúvidas na sua identificação seja como variações K, seja como ruído. Kitagawa e Brook (1960) no seu estudo sobre descargas K utilizaram como critério apenas a observação visual dos pulsos, o que pode levar a erros maiores pelo fato de que a seleção das variações K se torna um tanto mais subjetiva. Kitagawa e Brook (1960) compararam as formas de onda de campo elétrico de relâmpagos nuvem-solo com relâmpagos na nuvem e fizeram histogramas de intervalos de tempo entre as descargas K que ocorrem entre descargas de retorno sucessivas em relâmpagos nuvem-solo e das descargas K que ocorrem no final dos relâmpagos na nuvem. Estes histogramas são apresentados na Figura 4.9 e a forte semelhança entre ele sugere que ambos os processos são similares.

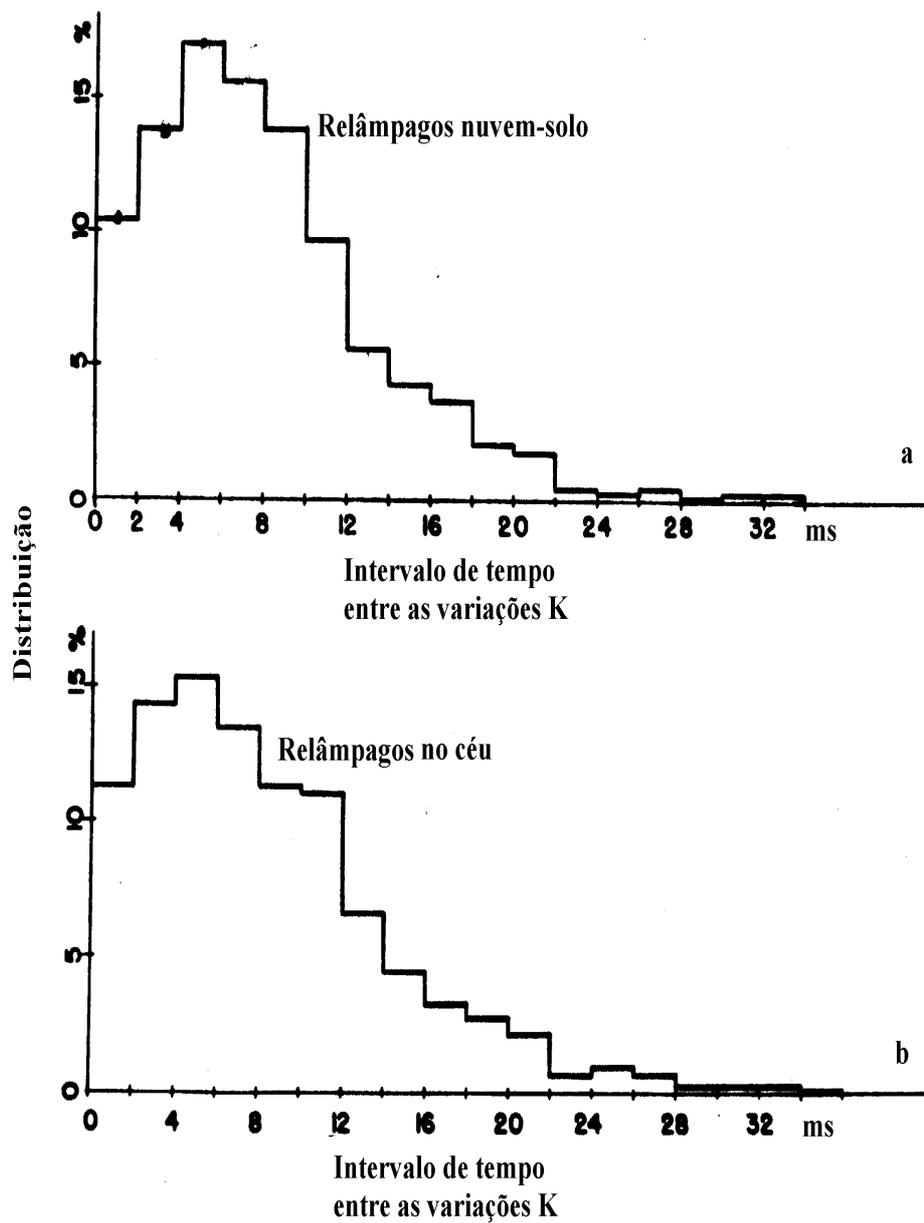


Fig. 4.9 - Distribuição dos intervalos de tempo entre descargas K. a) relâmpagos nuvem-solo. b) relâmpagos na nuvem.

FONTE: Kitagawa e Brook (1960)

O histograma 4.9a foi obtido a partir da estatística de 671 descargas para o solo e o histograma 4.9b de 1318 descargas na nuvem. O tempo entre as descargas K variou de 2 a 34ms apresentando um valor médio de 8,5ms, tanto para os relâmpagos nuvem-solo quanto para os relâmpagos na nuvem.

No presente trabalho foram feitos cálculos estatísticos do tempo entre as descargas K ocorridas entre descargas de retorno sucessivas. A tabela 4.1 mostra os resultados obtidos para essa estatística.

**TABELA 4.1 – ESTATÍSTICA DO TEMPO ENTRE AS DESCARGAS K DOS RELÂMPAGOS NUVEM-SOLO OCORRIDOS NO BRASIL NO PERÍODO DE OUTUBRO DE 1998 A MARÇO DE 1999**

Ordem das descargas de retorno	Tempo Médio (ms)	Desvio Padrão (ms)	Número de Intervalos
1-2	24,99	19,76	73
2-3	15,44	10,37	66
3-4	27,01	19,44	69
4-5	20,72	25,76	64
5-6	11,27	8,77	79
6-7	11,18	5,46	26
7-8	10,12	8,22	19
8-9	10,82	6,71	10
9-10	8,51	8,79	05
10-11	17,36	23,81	15
11-12	29,53	13,68	07
12-13	18,66	3,17	02
13-14	--	--	--

Na primeira coluna estão indicadas a combinação entre as sucessivas ordens das descargas de retorno. Na segunda coluna estão os tempos médios entre as variações K calculados para sua respectiva combinação entre as sucessivas descargas de retorno. A tabela também apresenta os desvios padrões, bem como o número de intervalos entre as variações K envolvidos na estatística. A Figura 4.10 representa a distribuição obtida para os tempos médios entre as variações K entre descargas de retorno em relâmpagos nuvem-solo em função da ordem entre as sucessivas descargas de retorno.

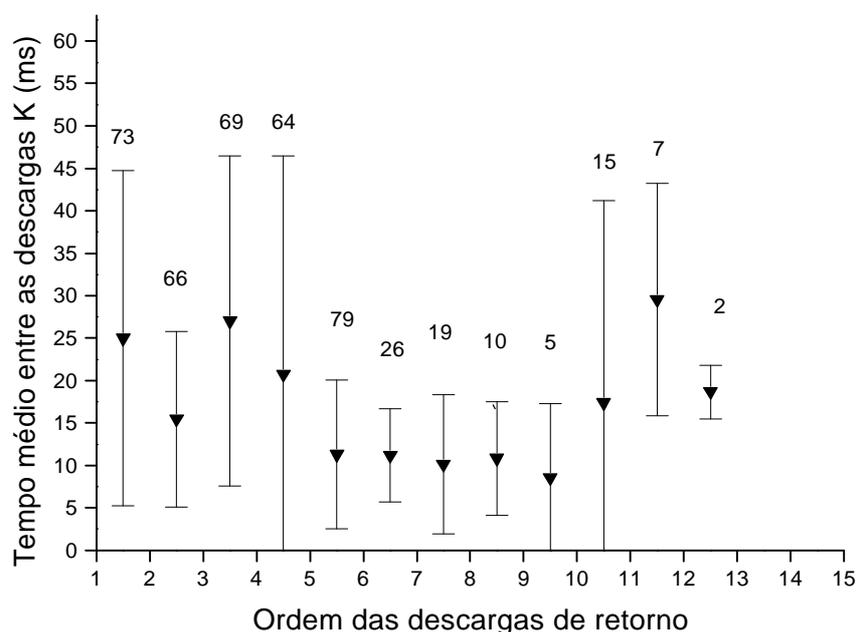


Fig. 4.10 - Tempo entre as descargas K em função da ordem das descargas de retorno para os relâmpagos ocorridos no Brasil.

Na Figura 4.10 os números acima das barras de desvio padrão indicam o número de intervalos de tempo entre descargas K utilizados para o cálculo do tempo médio entre as mesmas para cada combinação entre as ordens sucessivas das descargas de retorno. Os elevados desvios padrões indicam que o tempo entre as descargas K possui uma ampla variabilidade em torno do valor médio, e além disso, os valores de tempo médio flutuam em torno de um certo valor, de forma que, não foi encontrada uma dependência do tempo entre as descargas K com as ordens das descargas de retorno. Portanto, o tempo

médio entre as descargas K foi calculado desconsiderando-se as ordens das descargas de retorno, tendo como resultado o valor de 18,5ms, cerca de duas vezes o resultado obtido por Kitagawa e Brook (1960), com um desvio padrão de 17,8ms. O número médio de descargas K entre descargas de retorno sucessivas é 2,7 e o número médio de variações K por relâmpago é 16. Uma das possíveis explicações para a diferença dos tempos entre as descargas K, é que, talvez os pacotes de cargas negativas distribuídos no centro principal de cargas negativas das nuvens as quais originaram os relâmpagos analisados neste trabalho, estejam mais distantes um do outro, de forma que, o tempo de descarga do fluxo positivo que se propaga dentro do centro principal de cargas negativas, seja maior. Outra possibilidade, é que, talvez a velocidade das cargas que compõem a corrente do processo J e das descargas K a ele associadas, seja menor nas nuvens geradoras dos relâmpagos analisados neste trabalho, o que pode ser resultado da menor condutividade da nuvem, que por sua vez depende da quantidade de gotículas de água, partículas de gelo, ou seja da composição da nuvem. Outra possível causa, está no método utilizado para identificação das descargas K. Kitagawa e Brook (1960) ao selecionar visualmente as descargas K podem ter selecionados pulsos que não fossem de descargas K, aumentando a quantidade de pulsos de descargas K entre duas descargas de retorno sucessivas, tendo como um resultado um tempo menor. A investigação de qual destas hipóteses é a verdadeira explicação para tal diferença entre os tempos entre as descargas K fica como sugestão para um trabalho futuro. A Figura 4.11 ilustra a distribuição das descargas K por relâmpago em função da ordem das descargas de retorno.

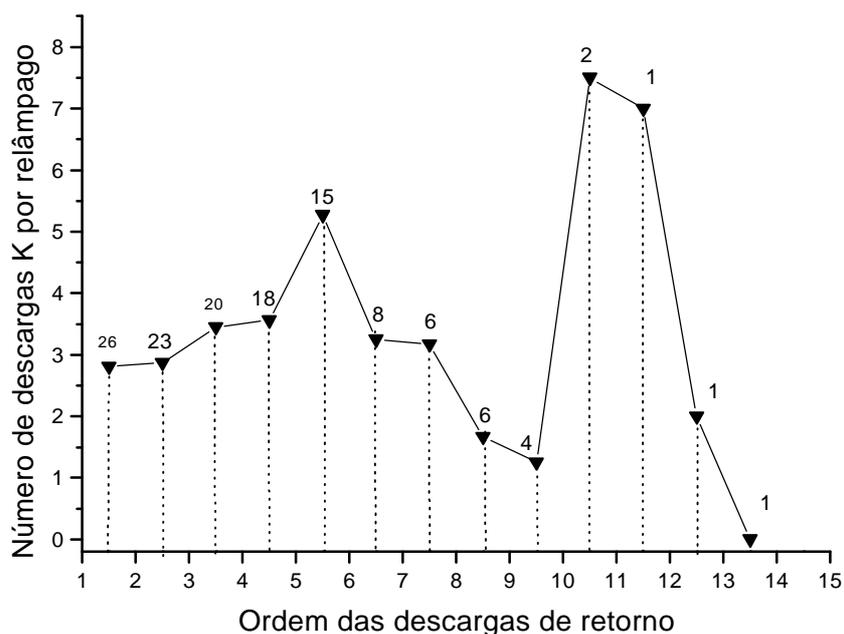


Fig. 4.11 - Distribuição das descargas K por relâmpago em função da ordem das descargas de retorno

Na Figura 4.11 cada triângulo corresponde ao número de descargas K por relâmpago, ocorridas entre descargas de retorno sucessivas cuja ordem é indicada na abscissa. Os números acima dos triângulos correspondem ao número de relâmpagos que contiveram as descargas K em determinadas descargas de retorno sucessivas. Na análise deste gráfico, podem ser descartados os quatro últimos pontos, pois eles não são estatisticamente significantes devido ao fato de que foram utilizados poucos dados na obtenção de tais pontos. Uma observação da Figura 4.11 mostra que o número de descargas K por relâmpago cresce à medida em que se caminha em direção às descargas de retorno de ordens mais elevadas, até atingir um valor de pico entre as descargas de ordem cinco e seis, passando a partir daí a decrescer até o período entre as descargas de ordens nove e dez. A explicação desse comportamento e deste pico localizado entre as descargas de retorno de ordens cinco e seis, encontra-se no fato de que o tempo entre estas descargas de retorno também varia de maneira similar como pode ser visto na Figura 4.4, apresentando também um valor máximo para o tempo entre as descargas de retorno de ordens cinco e seis. A comparação entre as Figuras 4.4 e 4.11 sugere então

que, o número de descargas K entre duas descargas de retorno sucessivas seja diretamente proporcional ao tempo entre estas descargas de retorno, justificando assim o maior número de descargas K em intervalos de tempo maiores entre as descargas de retorno. Observa-se ainda na Figura 4.11, que o número de relâmpagos que apresentam descargas K diminui para ordens cada vez maiores, indicando que fisicamente há uma tendência em ocorrer menos descargas K à medida em que as descargas de retorno ocorrem, reforçando a idéia de que o pico apresentado surge devido ao fato de que o tempo entre as descargas de retorno de ordens cinco e seis ser maior e não devido ao fato de que as descargas K ocorrem a uma taxa mais elevada neste intervalo. O fato de que não foi encontrada uma dependência do tempo entre as descargas K e as ordens das descargas de retorno entre as quais elas ocorrem (Figura 4.10), juntamente ao fato de que a quantidade de descargas K ser diretamente proporcional ao tempo entre as descargas de retorno, nos leva a pensar que as descargas K estão simplesmente ocorrendo entre as descargas de retorno a uma taxa invariável. Sugere-se que elas não preparam a nuvem para a ocorrência de novas descargas de retorno, uma vez que, o que prepara a nuvem para uma descarga são os processos responsáveis pelo surgimento de cargas na nuvem, as descargas K pelo contrário neutralizam cargas na nuvem. Assim, sugere-se também que as descargas K simplesmente ocorrem antes e ou após as descargas de retorno.

A Figura 4.12 é um histograma do intervalo de tempo entre as descargas K para uma amostra de 435 descargas K distribuídas em 26 relâmpagos nuvem-solo. Embora a amostragem seja pequena se comparada com a utilizada por Kitagawa e Brook (1960), observa-se que o tempo entre descargas K ocorridas entre sucessivas descargas de retorno para relâmpagos ocorridos no Brasil também obedece a distribuição similar à que foi descoberta por eles e que o logaritmo desses tempos (Figura 4.13) se distribui segundo uma curva Normal. Assim, pode-se dizer que a distribuição do tempo entre as descargas K que ocorrem entre descargas de retorno sucessivas nos relâmpagos nuvem-solo ocorridos no Brasil também segue uma distribuição log normal.

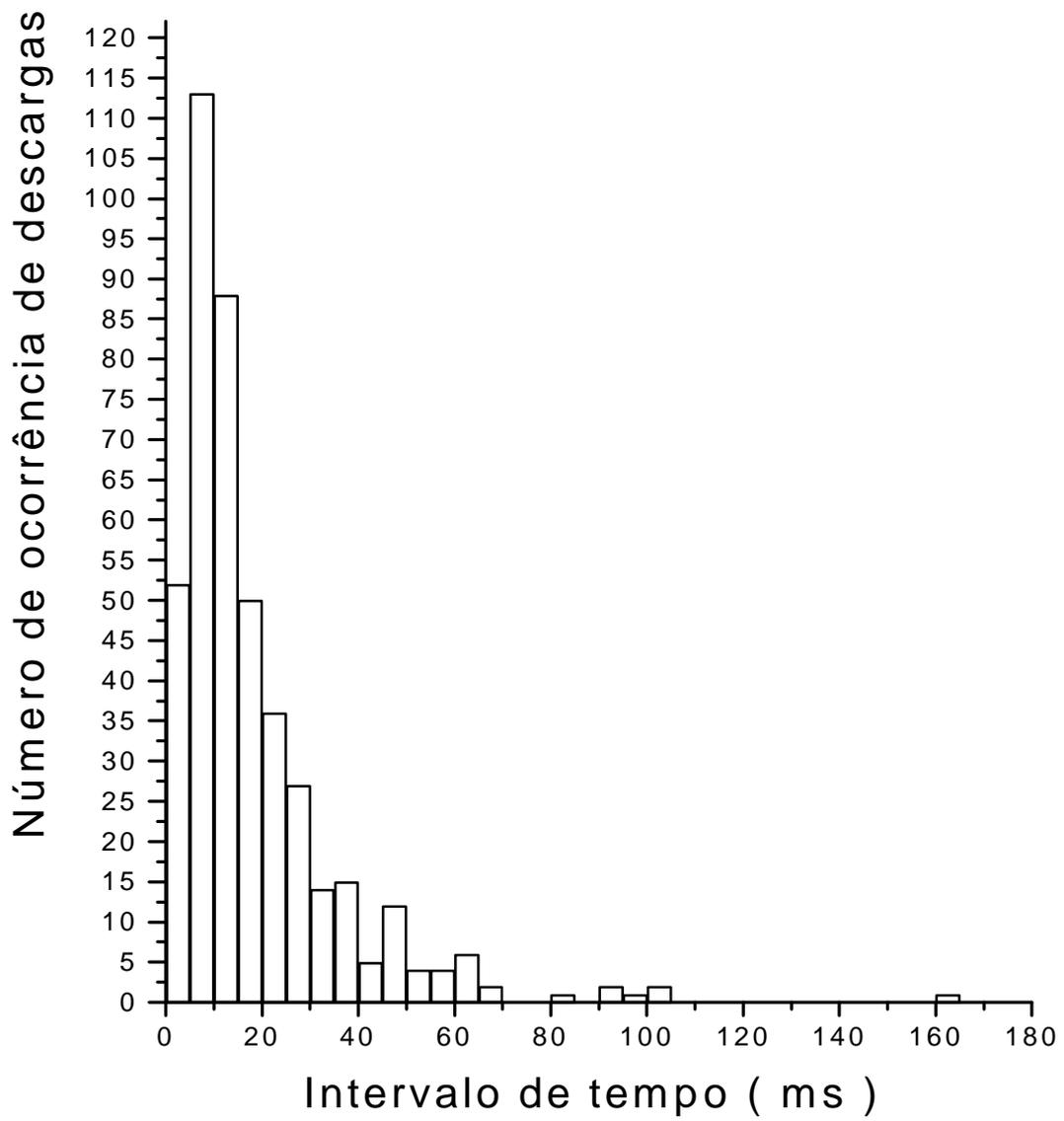


Fig. 4.12 - Intervalo de tempo entre as descargas K presentes entre descargas de retorno sucessivas em relâmpagos nuvem-solo ocorridos no Brasil no período de janeiro de 1998 a fevereiro de 1999.

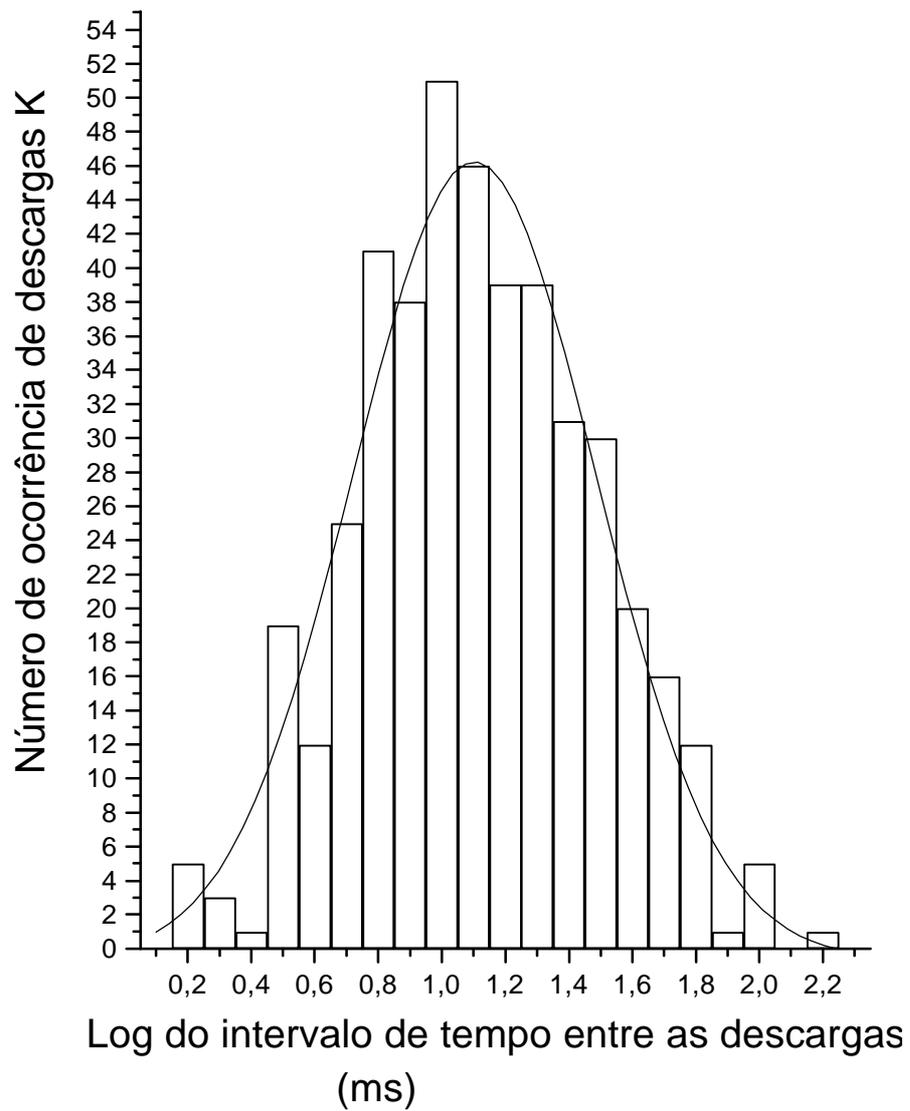


Fig. 4.13 - Histograma dos intervalos de tempo (escala logarítmica) entre descargas K presentes em relâmpagos nuvem-solo ocorridos no Brasil no período de janeiro de 1999 a fevereiro de 1999.

### 4.3 – DURAÇÃO MÉDIA DAS VARIAÇÕES PRELIMINARES

Neste trabalho são consideradas variações preliminares, aquelas variações de campo elétrico que, como o próprio nome diz, precedem a primeira descarga de retorno do relâmpago. Estas variações podem durar desde algumas dezenas de milissegundos até poucas centenas de milissegundos. A tabela 4.2 mostra os resultados de estudos de variações preliminares obtidos por alguns pesquisadores.

**TABELA 4.2 – DURAÇÃO DE VARIAÇÕES PRELIMINARES**

Pesquisador	Local	Intervalo de Duração (ms)	Duração Média (ms)
Clarence e Malan	África do Sul, (1957)	0 – 200	–
Kitagawa e Brook	Novo México, (1960)	10 – 200	–
Thomson	Papua Nova Guiné, (1980)		240
Beasley et al.	Flórida, (1982)		118

Como já foi visto na seção 2.2.1, Clarence e Malan (1957) chamaram de variações preliminares às variações de campo elétrico que precedem a primeira descarga de retorno do relâmpago, compostas pelos períodos B, I e L, como pode ser visto na Figura 2.10. Embora Beasley et al. (1982) na Flórida, consideraram variações preliminares àquelas antes do início do período de líder escalonado, com uma duração média de 90ms, uma duração média de 118ms para a variação de campo elétrico desde o início do

relâmpago até a primeira descarga de retorno (chamadas de preliminar por Clarence e Malan), foi obtida.

Beasley et al. (1982) também fizeram uma verificação da validade da estrutura BIL (*Breakdown*, Intermediário e Líder Escalonado) para os seus dados e viram que apenas 6% dos seus dados se adequaram bem à estrutura. Algumas vezes o período B não estava presente, em alguns casos o período B apresentava características diferentes daquelas evidenciadas na estrutura BIL.

Uma dificuldade relatada por Beasley et al. (1982) foi a identificação do término do período I ou o começo do período L. Esta dificuldade esteve presente também na análise dos dados obtidos no Brasil. Houve casos entre os relâmpagos ocorridos no Brasil, onde as variações anteriores à primeira descarga de retorno se adequaram bem à estrutura BIL, havendo também a facilidade na identificação do término do período I ou início do período L, porém houve casos onde apenas o período B ou os períodos B e I ou apenas o período L se apresentaram. Acredita-se que a fase I às vezes não se apresentou devido ao fato que não houve movimento horizontal das cargas durante a ocorrência de descargas dentro da nuvem, porém a ausência de uma das fase B ou L é certamente atribuída ao fato das descargas serem fracas ou distantes ao ponto da sensibilidade do sistema de aquisição de dados não ser o suficiente para a sua detecção. Diante destas dificuldades foi decidido adotar a definição de Clarence e Malan (1957) para as variações preliminares e não a de Beasley et al. (1982). Foram analisadas 28 variações preliminares que variaram em um intervalo de 15ms até 272ms. Cerca de 39% das variações preliminares analisadas se adequou bem à estrutura BIL, podendo-se facilmente determinar o início e o término entre os períodos. Os 61% restantes não se adequaram bem ao esquema BIL. Às vezes apresentava apenas o período B ou L ou apenas ambos, tendo ausente o período I. A Figura 4.14 ilustra uma das variações preliminares analisadas, a qual se adequa à estrutura BIL.

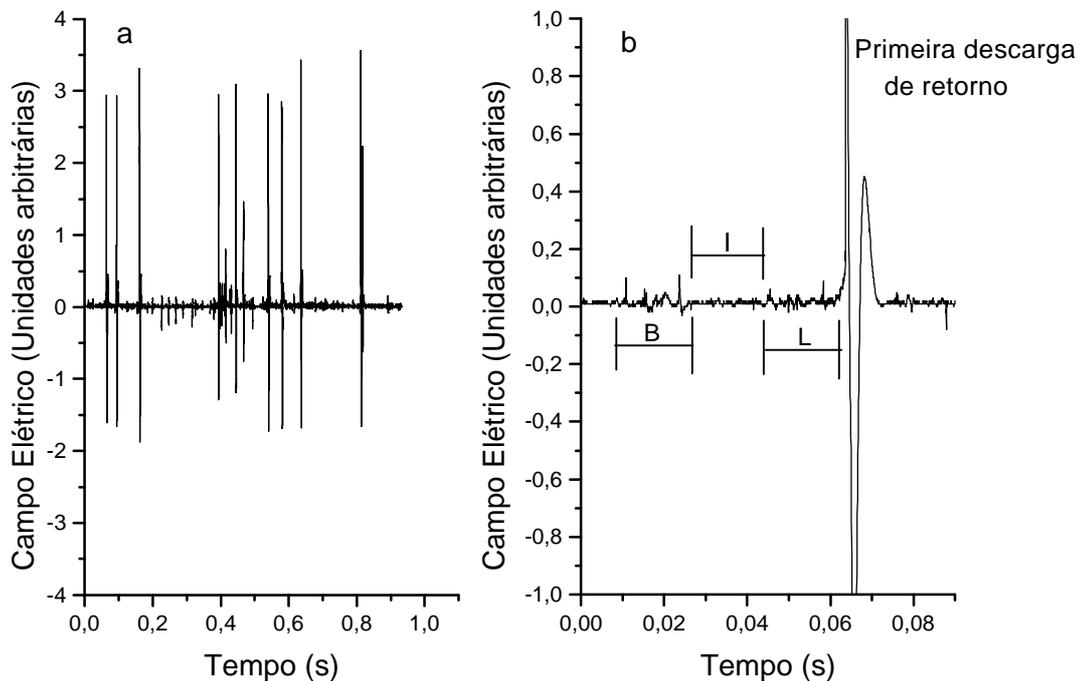


Fig. 4.14 - Variações preliminares de um relâmpago nuvem-solo ocorrido no Brasil no dia 11 de fevereiro de 1999, às 17:49:35 LT.

Na Figura 4.14a tem-se a forma de onda de campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo ocorrido em São José dos Campos contendo 10 descargas de retorno. A Figura 4.14b é uma ampliação das variações preliminares deste relâmpago até à primeira descarga de retorno. Pode-se observar claramente os três períodos que compõem a estrutura BIL proposta por Clarence e Malan (1957), com duração de aproximadamente 54ms.

A Figura 4.15 apresenta um histograma da duração das variações preliminares. O tempo médio da duração das variações preliminares foi de 118ms, com desvio padrão igual a 78ms e com mediana 99ms.

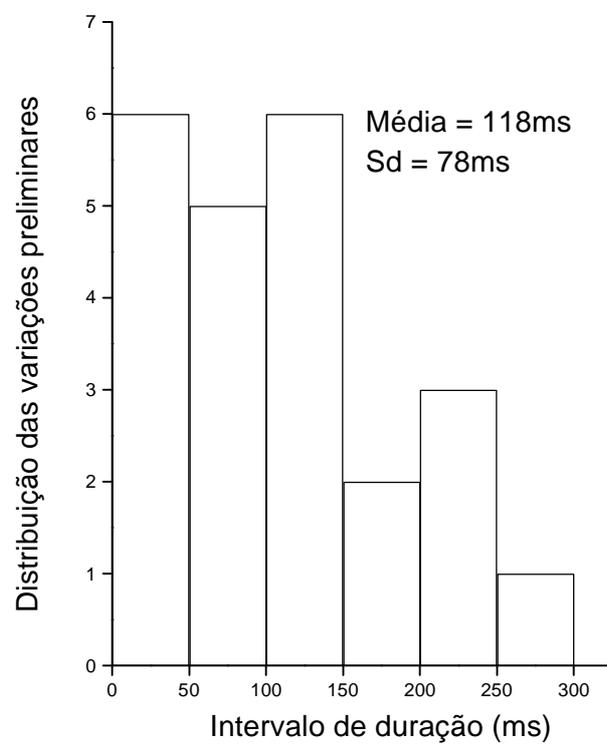


Fig. 4.15 - Histograma do tempo de duração das variações preliminares de relâmpagos ocorridos no Brasil. Período de janeiro de 1999 a fevereiro de 1999.

#### 4.4 – OBSERVAÇÃO DA FORMA DE ONDA DE RELÂMPAGOS NO CÉU

Kitagawa e Brook (1960) analisaram 1400 formas de onda de campo elétrico geradas por relâmpagos no céu e observaram que elas eram diferentes das formas de onda de campo elétrico de relâmpagos nuvem-solo, exceto o seu final que se parece com o processo J que ocorre entre descargas de retorno em relâmpagos nuvem-solo. Concluíram portanto que é possível identificar o relâmpago a partir de sua forma de onda e propuseram um padrão para as formas de onda de campo elétrico de relâmpagos no céu. A Figura 4.16 é uma exemplificação deste padrão de forma de onda. Nela, a curva superior corresponde às variações de campo elétrico detectadas por uma antena rápida e a inferior detectada por uma antena lenta. Este padrão de forma de onda é composto por três partes: uma parte inicial (I), uma segunda parte muito ativa (MA) e a terceira e última parte conhecida como final (F). A parte I possui duração bem variável e é composta por pulsos com pequenas amplitudes. Na parte MA os pulsos se tornam maiores, as formas dos pulsos e os intervalos entre si se tornam mais irregulares e a quantidade de pulsos se torna maior. A parte F é similar aos processos de junção (J) que ocorrem na nuvem entre descargas de retorno sucessivas em relâmpagos nuvem-solo. As variações de campo elétrico detectadas por antenas rápidas mostram que a parte F também é caracterizada por uma série de variações rápidas de campo elétrico distanciadas entre si de 2 a 20ms chamadas de variações K por serem similares às variações K apresentadas em relâmpagos nuvem-solo. A parte F quando comparada com as partes I e MA é bem distinta, porém as partes I e MA não possuem um limite bem discernível, pois a transição de uma para outra ocorre de forma gradual (Kitagawa e Brook, 1960). Pode ocorrer casos em que a forma de onda apresente apenas as partes MA e F, sendo a parte I ausente, ou às vezes pode faltar as partes MA e F e a descarga como um todo apresentar apenas a parte inicial. Dos 1400 relâmpagos analisados por Kitagawa e Brook (1960), 50% continha as 3 partes, 40% continha as partes MA e F e 10% faltou a parte F e consistiu das partes I ou MA ou de ambas.

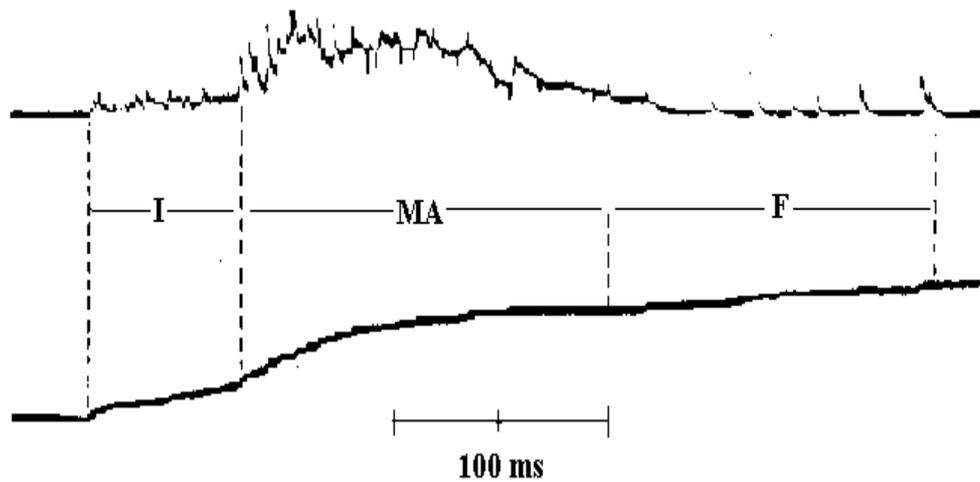


Fig. 4.16 - Forma de onda de campo elétrico de um relâmpago no céu.

FONTE: Kitagawa e Brook (1960)

Quanto à parte inicial (I) de um relâmpago no céu, um exame superficial pode levar a concluir que ela é parecida com as variações preliminares dos relâmpagos nuvem-solo, com exceção de sua amplitude que é menor e a periodicidade de repetição dos pulsos que é um tanto irregular. Porém uma comparação detalhada entre as formas de onda de campo elétrico dos dois relâmpagos em questão mostram duas diferenças que o caracterizam. A primeira está na duração da parte I e das variações preliminares em relâmpagos nuvem-solo. A parte inicial dos relâmpagos no céu apresentou uma duração que variou de 50 a 300ms, enquanto as variações preliminares em relâmpagos nuvem-solo com duração de 10 a 150ms, ou seja, 2 a 5 vezes menor do que a parte inicial em relâmpagos no céu. A segunda diferença está no período de repetição dos pulsos (Kitagawa e Brook, 1960). A distribuição dos intervalos entre os pulsos do líder escalonado nos relâmpagos nuvem-solo apresenta um valor mais freqüente entre 40 e 60 $\mu$ s e um valor médio de 80 $\mu$ s para relâmpagos ocorridos no Novo México, enquanto o tempo médio entre os pulsos da parte inicial de relâmpagos no céu foi de 680 $\mu$ s, para relâmpagos também ocorridos no Novo México.

Com respeito aos relâmpagos no céu ocorridos no Brasil, foram observadas cinco formas de onda. O critério de seleção foi a observação visual da descarga elétrica. A Figura 4.17 representa uma forma de onda de um relâmpago no céu ocorrido no Brasil.

Nenhum dos cinco casos analisados se adequou ao padrão observado por Kitagawa e Brook (1960). Eles são compostos por 2 etapas, a primeira etapa é muito ativa (MA) e a segunda parte é de menor atividade, sendo denominada parte F, faltando a parte I, como pode ser visto na Figura 4.17. A parte MA com duração de 5,6ms a 12,5ms e média de 10ms, geralmente é composta por pulsos tanto mono como bipolares. A Figura 4.18a mostra a ocorrência de pulsos mono e bipolares na parte MA da forma de onda ilustrada na Figura 4.17. Após o período ativo, tem-se um período de menor atividade (parte F) com período de duração que variou de 20 a 47ms, tendo uma duração média de aproximadamente 29ms, contendo pulsos menores e mais distanciados, os quais são semelhantes às descargas K que ocorrem entre descargas de retorno sucessivas nos relâmpagos nuvem-solo.

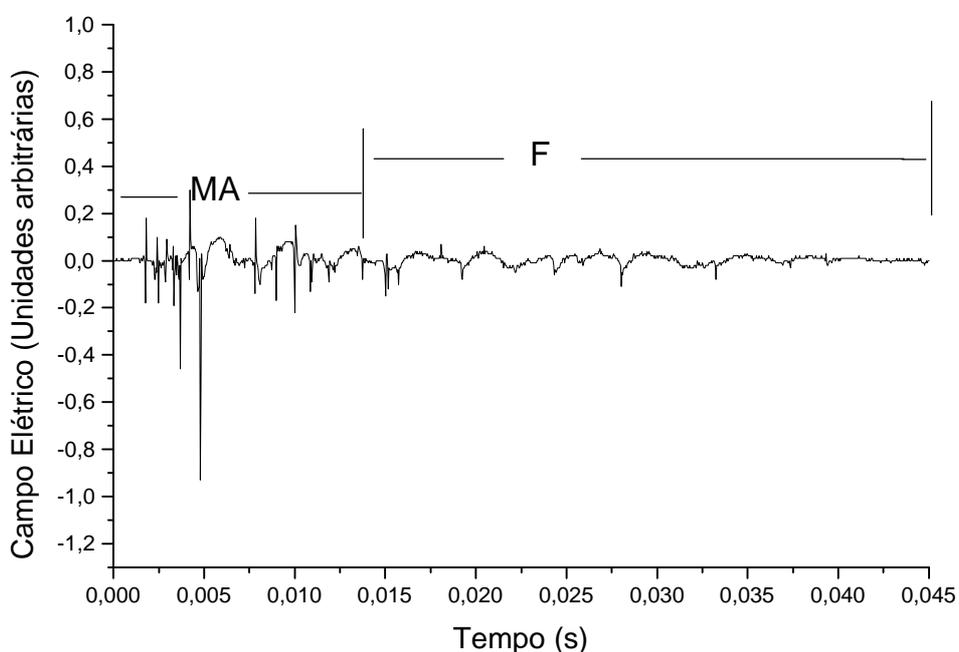


Fig. 4.17 - Forma de onda de campo elétrico de um relâmpago no céu ocorrido no Brasil.

A Figura 4.18b ilustra a presença dos pulsos componentes da parte F inicialmente apresentados na Figura 4.17. O valor médio das razões entre o número de pulsos monopulares e o número de pulsos bipolares em um relâmpago no céu é 1,91. Esta razão mostra que parece haver uma tendência em ocorrer um número de pulsos monopulares maior do que o número de pulsos bipolares. Uma característica interessante observada nos dados do Brasil é a presença de variações lentas (VL), não só na parte final (F) como também durante o período ativo como pode ser visto na Figura 4.19. O período final (F) é tal que os pulsos são unipolares e em geral menores do que os pulsos do período ativo.

As formas de onda de relâmpagos no céu analisadas neste trabalho, também se diferem das formas de onda dos relâmpagos nuvem-solo. Por exemplo, pode-se citar a diferença entre a duração das variações preliminares (início do relâmpago nuvem-solo) que no caso dos relâmpagos nuvem-solo dura entre muitas dezenas a algumas centenas de milissegundos enquanto a parte MA (início do relâmpago no céu) da forma de onda de relâmpagos no céu tem duração de alguns milissegundos, além do fato de que a parte MA não é parecida com nenhuma parte de um relâmpago nuvem-solo. Elas parecem diferir-se também do padrão de forma de onda de relâmpagos no céu proposto por Kitagawa e Brook (1960). Em todas elas notou-se a ausência da fase inicial I proposta por Kitagawa e Brook (1960). Esta ausência pode ter pelo menos duas causas: ou elas realmente não existem, confirmando que as formas de onda de relâmpagos no céu ocorridos no Brasil não se encaixam na forma padrão ou as descargas que compõem a fase I foram fracas ao ponto de não serem detectadas pela antena.

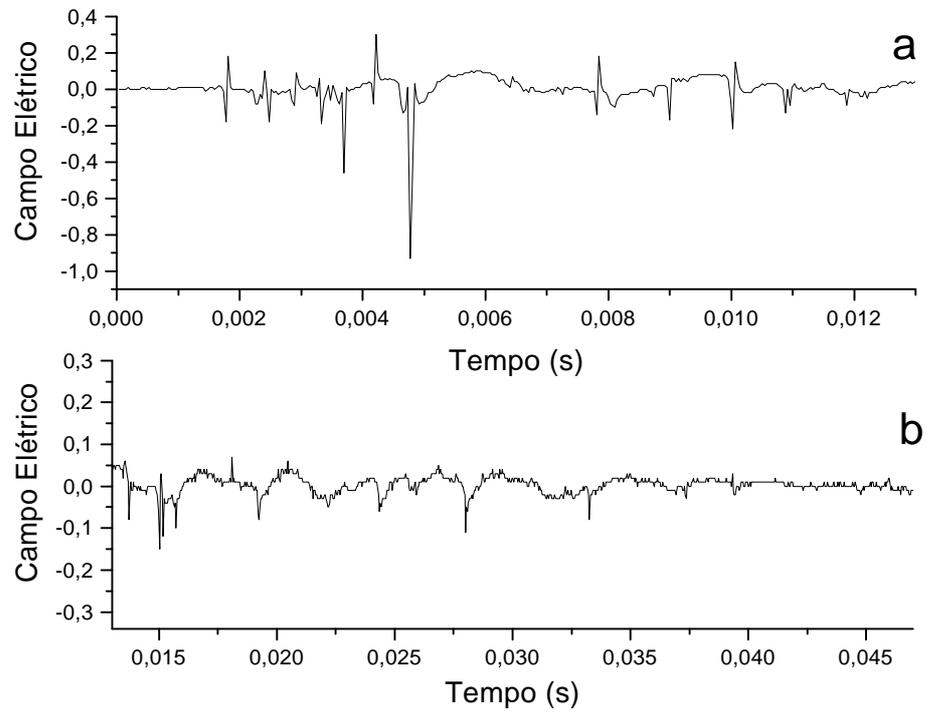


Fig. 4.18 - Pulsos monopolares e bipolares presentes nas partes MA e F de um relâmpago no céu ocorrido no Brasil, no dia 20 de janeiro de 1999, às 20:57:41 LT.

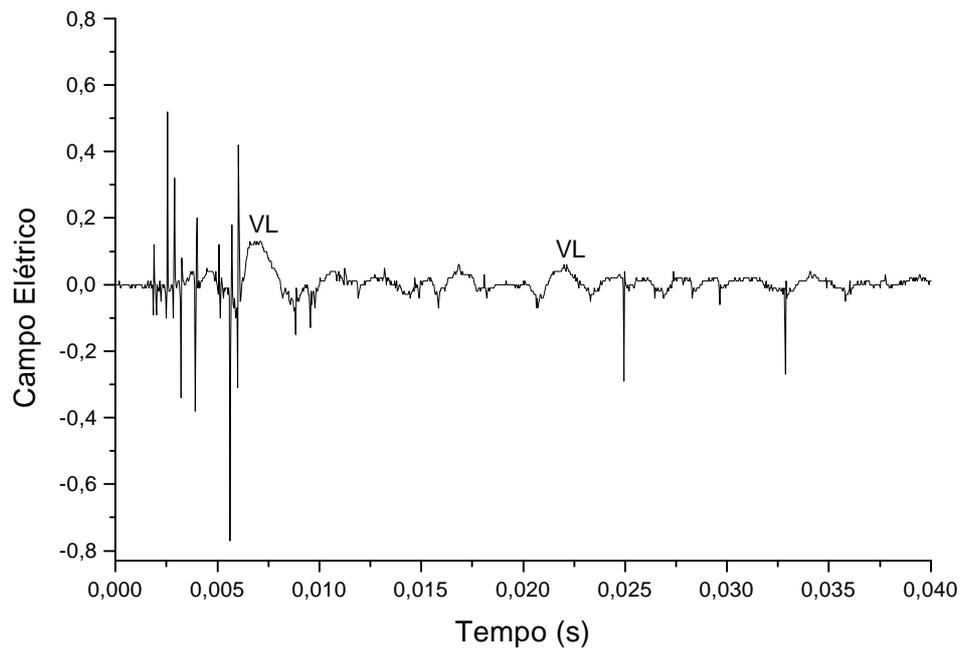


Fig. 4.19 - Ocorrência de variações lentas na forma de onda de um relâmpago no céu ocorrido no Brasil, no dia 20 de janeiro de 1999 às 20:59:31 LT.

#### 4.5 – FORMAS DE ONDA TÍPICAS E ATÍPICAS DE CAMPO ELÉTRICO OBTIDAS NO BRASIL

Os dados obtidos pelo grupo de eletricidade atmosférica do INPE, correspondem a um período de tempestades de verão, época em que a incidência de relâmpagos negativos é em geral maior do que a de relâmpagos positivos. A Figura 4.20 é um exemplo de forma de onda típica de um relâmpago nuvem-solo negativo.

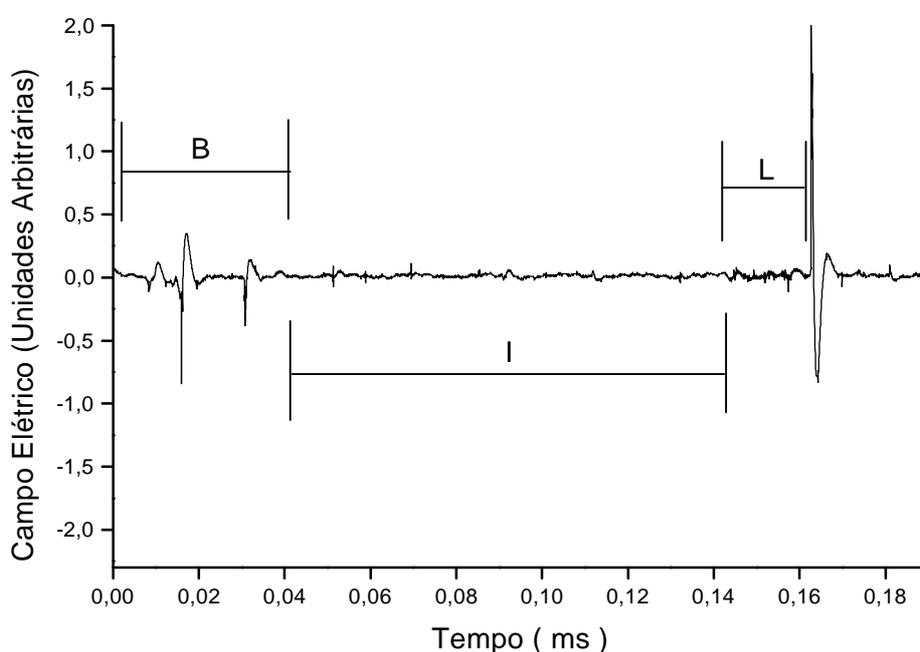


Fig. 4.20 - Forma de onda de campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo negativo ocorrido no Brasil, no dia 11 de janeiro de 1999 às 17:33:39 LT.

A Figura 4.20 ilustra uma parte da forma de onda de um relâmpago negativo que ocorreu no dia 11 de janeiro de 1999 às 17:33:39 horas (hora local) na cidade de São José dos Campos. Este relâmpago teve a duração de 0,8 segundos e apresentou 5 descargas de retorno. Apenas uma parte de sua forma de onda foi mostrada para que as variações preliminares e a primeira descarga de retorno pudessem ser observadas com

mais detalhes. Pode-se ver claramente as variações preliminares com duração de 160 milissegundos, sendo composta pelos períodos B, I e L. Neste relâmpago, entre as descargas de retorno podem ser observadas pequenas variações de campo elétrico correspondentes às descargas K como pode ser visto na Figura 4.21.

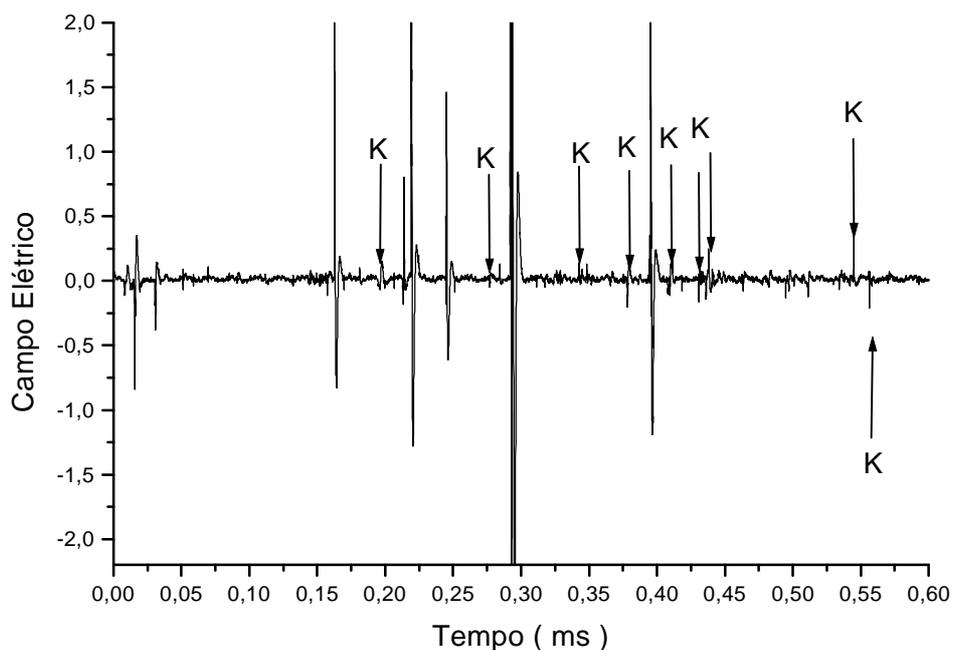


Fig. 4.21 - Ocorrência de descargas K entre descargas de retorno do relâmpago apresentado na Figura 4.20.

As variações associadas às descargas de retorno para o solo são constituídas por dois picos, um inicial para cima e um seguinte para baixo caso a descarga de retorno seja negativa ou o inverso caso a descarga de retorno seja positiva.

Dos 28 relâmpagos analisados apenas dois eram positivos. A Figura 4.22 apresenta a forma de onda de campo elétrico de um deles, como uma típica forma de onda de campo elétrico de relâmpagos positivos.

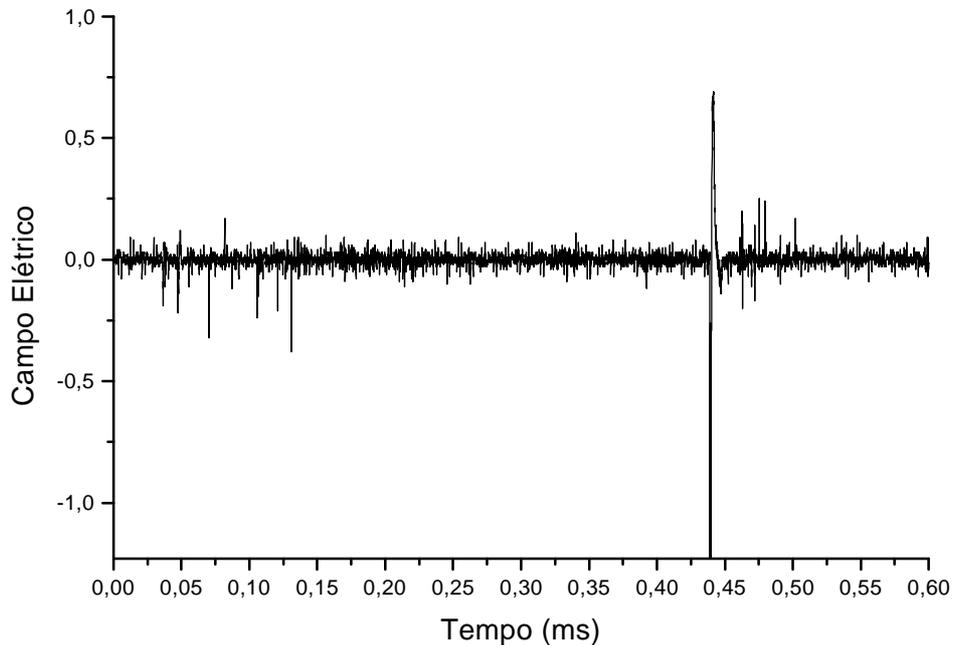


Fig. 4.22 - Forma de onda de um relâmpago nuvem-solo positivo ocorrido no Brasil no dia 08 de janeiro de 1999.

Nesse caso onde há apenas uma descarga de retorno, a “destruição” de cargas positivas na nuvem causa uma variação de campo elétrico invertida em relação à variação causada pelos relâmpagos negativos, de modo que o pulso associado à descarga de retorno é composta por um primeiro pico para baixo seguido por um segundo para cima, analogamente ao que acontece com a radiação gerada pelo relâmpago negativo. Nesse registro um ruído incomum cuja fonte é desconhecida, acabou por mascarar as variações preliminares.

Uma forma de onda de campo elétrico um tanto curiosa obtida durante a campanha é mostrada na Figura 4.23. Nela pode-se observar uma forma de onda de um relâmpago negativo simples com variações preliminares que duram cerca de 70ms. Os pulsos iniciais são os pulsos do período de *breakdown* (PB), logo após tem-se o período intermediário (I) cujo final se confunde com o início do período do Líder escalonado

(LE), que pode ser visto como um suave crescimento do campo elétrico antecedendo o sinal da descarga de retorno. O que é intrigante nesta forma de onda, é o fato de que a descarga de retorno é negativa, ao passo que todas as outras descargas, tanto as preliminares quanto as posteriores são positivas.

Outra forma de onda desconhecida e intrigante de um relâmpago nuvem-solo é apresentada na Figura 4.24. Ela apresenta dois pulsos de amplitudes bem maiores do que a amplitude do ruído da rede e bem estreitos se comparados com os pulsos de todas as descargas de retorno dos relâmpagos analisadas. Acredita-se que o sinal realmente seja uma forma de onda atípica e desconhecida de um relâmpago, da qual não se sabe a sua origem.

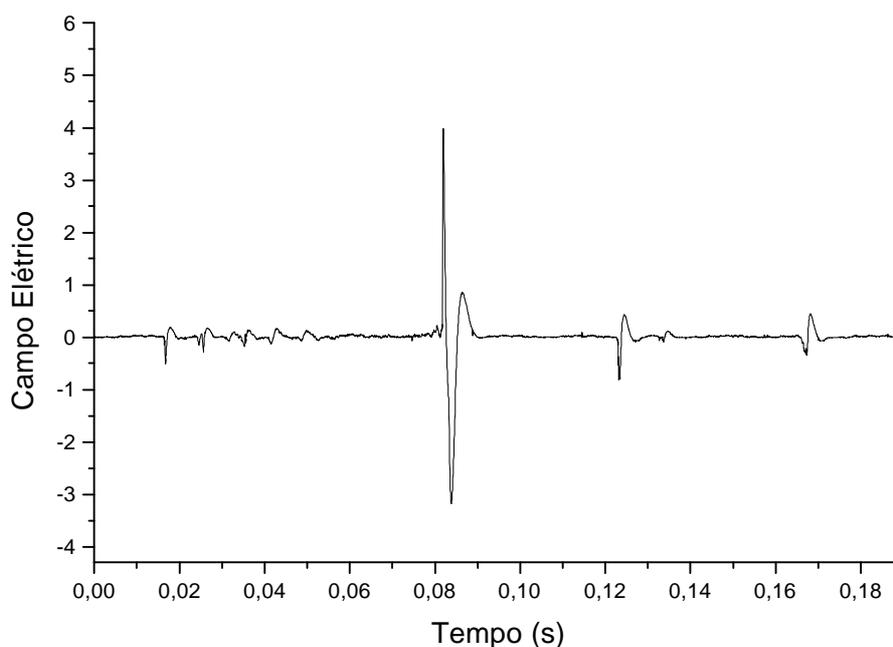


Fig. 4.23 - Descarga de retorno negativa precedida e seguida por descargas positivas, de um relâmpago nuvem-solo ocorrido no Brasil no dia 11 de janeiro de 1999 às 17:31:36 LT.

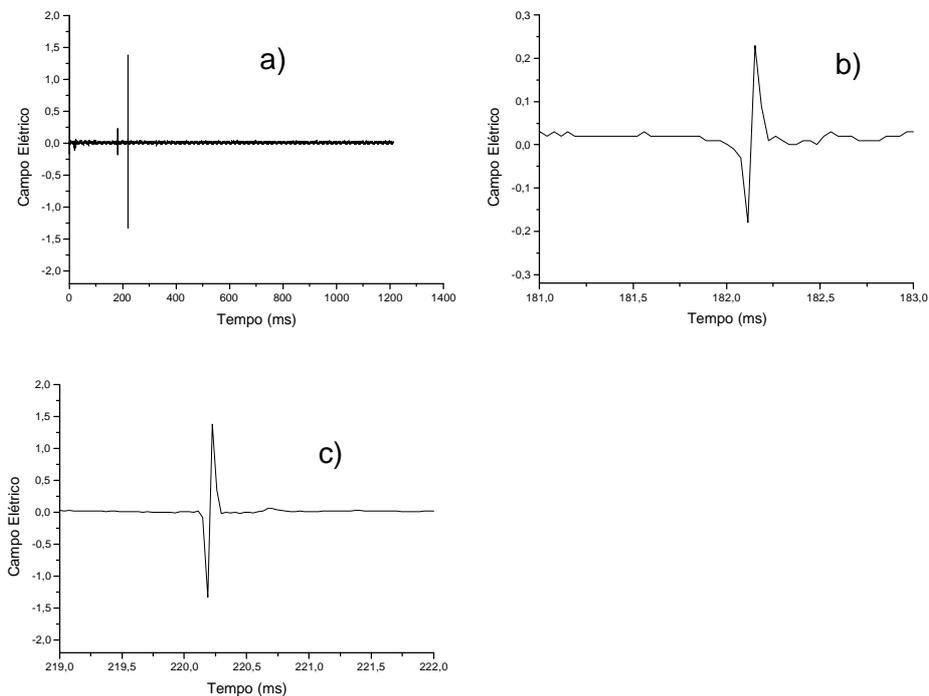


Fig. 4.24 - Forma de onda de campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo apresentando pulsos similares às descargas de retorno positivas, porém muito estreitas. Evento ocorrido no Brasil, no dia 11 de janeiro de 1999 às 17:43:18 LT.

A Figura 4.24a é a forma de onda completa do relâmpago. Nela pode-se ver que os pulsos são bem estreitos se comparados com as formas até então discutidas. As Figuras 4.24b e 4.24c correspondem aos primeiro e segundo picos respectivamente e nos mostram que os pulsos realmente são similares ao pulsos de descargas de retorno positivas.

Um comportamento anormal verificado em outra forma de onda é apresentado na Figura 4.25.

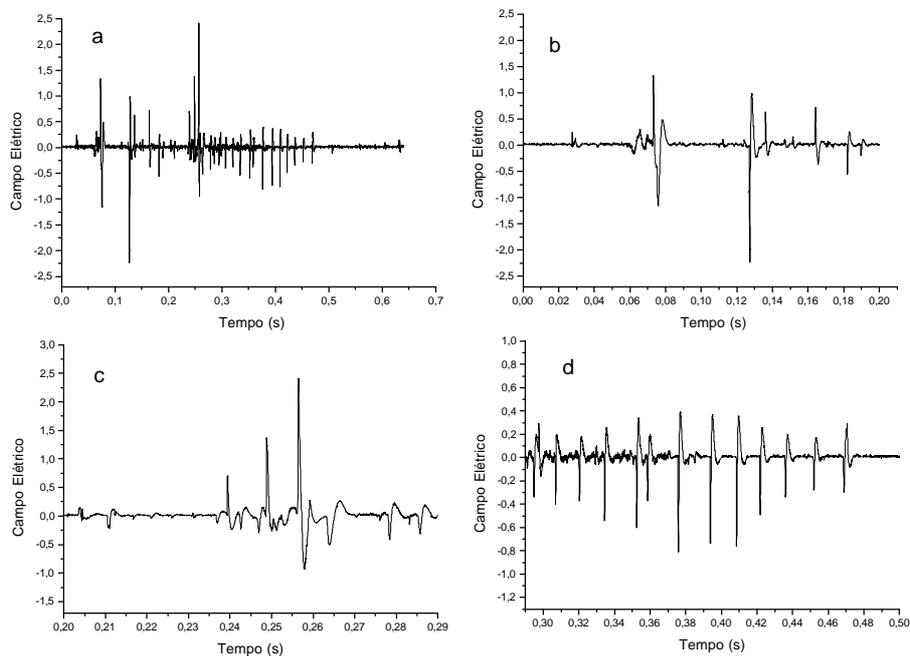


Fig. 4.25 - Forma de onda de campo elétrico de um relâmpago nuvem-solo ocorrido no Brasil, apresentando pulsos com polaridades invertidas e moduladas.

A Figura 4.25a é a forma de onda de campo elétrico completa. As Figuras 4.25b,c e d são partes ampliadas da Figura 4.25a. Na Figura 4.25a não é possível ver detalhes interessantes, porém, ao observar as Figuras 4.25b e 4.25c, tem-se a ocorrência alternada de descargas de polaridades invertidas, um evento que não é comum nas formas de onda de relâmpagos nuvem-solo. Um outro aspecto curioso que pode ser observado tanto na Figura 4.25a quanto na Figura 4.25d, é a existência de um intervalo de pulsos bipolares de mesma polaridade, localizado entre os instantes 0,3 e 0,5 segundos. O que é interessante é que estes pulsos possuem amplitudes moduladas e que todas as descargas são positivas, o que torna esta forma de onda atípica.

A Figura 4.26 é um outro caso de forma de onda de campo elétrico atípica de um relâmpago. Existem duas características que chamam a atenção nesta forma de onda. O

primeiro deles é a ocorrência de vários pulsos bem próximos um do outro, chamados de pulsos amortecidos e modulados (PAM) que se amortecem com o tempo, compondo um trem de pulsos modulados. A ocorrência de pulsos com estas características não é comum e também não é referenciada na literatura. A outra característica desta forma de onda, é apresentada na Figura 4.27. Esta Figura apresenta a primeira descarga de retorno da forma de onda apresentada na Figura 4.26. Esta descarga de retorno é positiva e apresenta uma forma incomum tanto para o primeiro pico como para o segundo pico, apresentando um número de descontinuidades além do que é observado normalmente, dando a impressão de estar ocorrendo várias descargas de retorno consecutivas de menor intensidade compondo uma descarga de retorno ordinária. Este fenômeno foi também observado em alguns casos de relâmpagos negativos, dos quais um deles é apresentado na Figura 4.28. Acredita-se que, talvez a causa desse comportamento anômalo evidenciado nas Figuras 4.27 e 4.28, seja a elevada ocorrência de ramificações e ou tortuosidade, as quais são responsáveis pela introdução de ondas eletromagnéticas de elevada frequência no espectro.

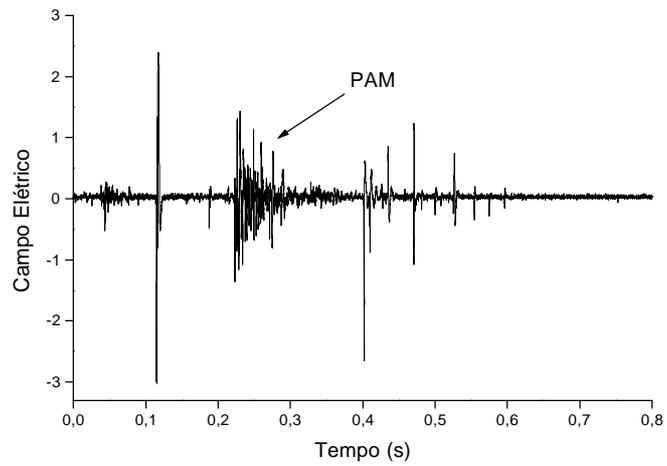


Fig. 4.26 - Ocorrência de pulsos amortecidos e modulados (PAM) em um relâmpago nuvem-solo, que ocorreu no Brasil no dia 4 de outubro de 1998 às 20:08:41 LT.

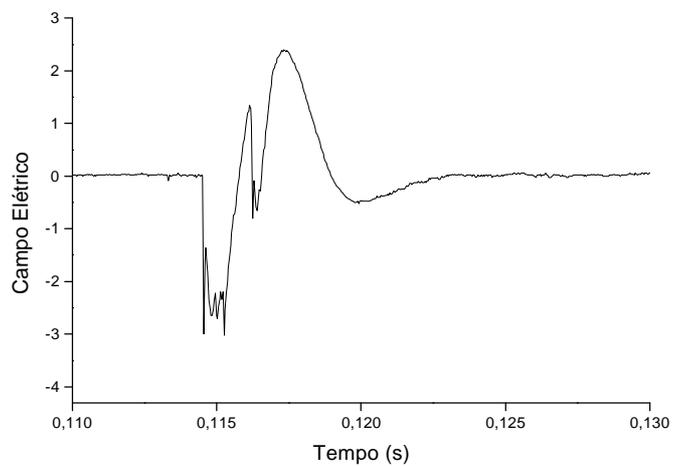


Fig. 4.27 - Descarga de retorno positiva de um relâmpago nuvem-solo, composta por vários pulsos.

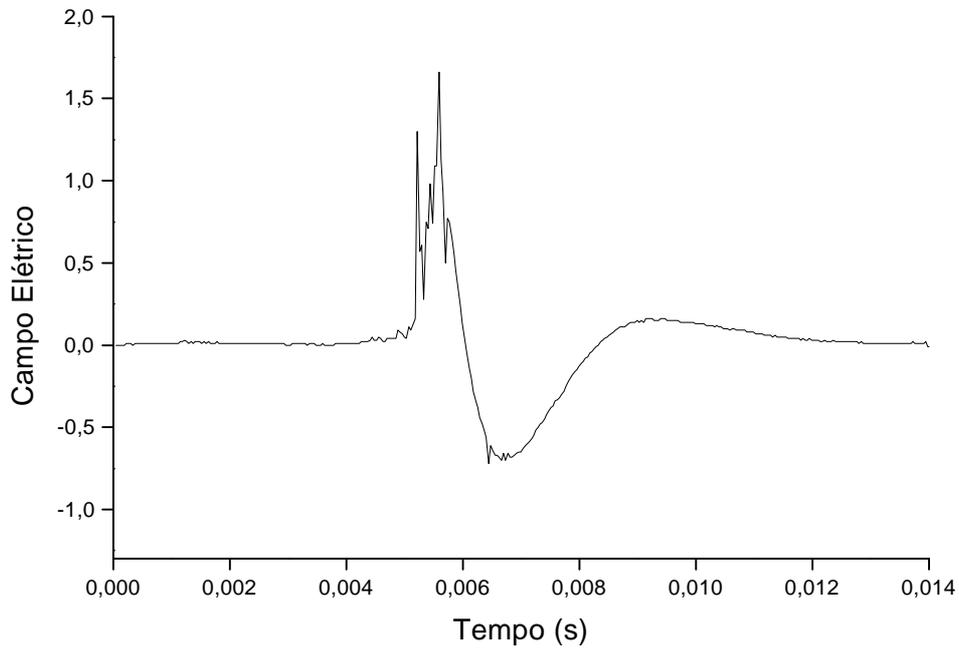


Fig. 4.28 - Descarga de retorno negativa de um relâmpago nuvem-solo, composta por vários pulsos. Este relâmpago ocorreu no Brasil no dia 11 de fevereiro de 1999 às 17:48:15 LT.

Outra forma de onda atípica é apresentada na Figura 4.29. Ela ilustra a ocorrência de duas descargas de retorno sobrepostas. Elas ocorreram dentro do intervalo de tempo em que geralmente ocorre apenas uma descarga de retorno. Esta é a quarta descarga de retorno de um relâmpago nuvem-solo de multiplicidade 6, que ocorreu no dia 11 de janeiro de 1999, às 17:33:39 horas (LT).

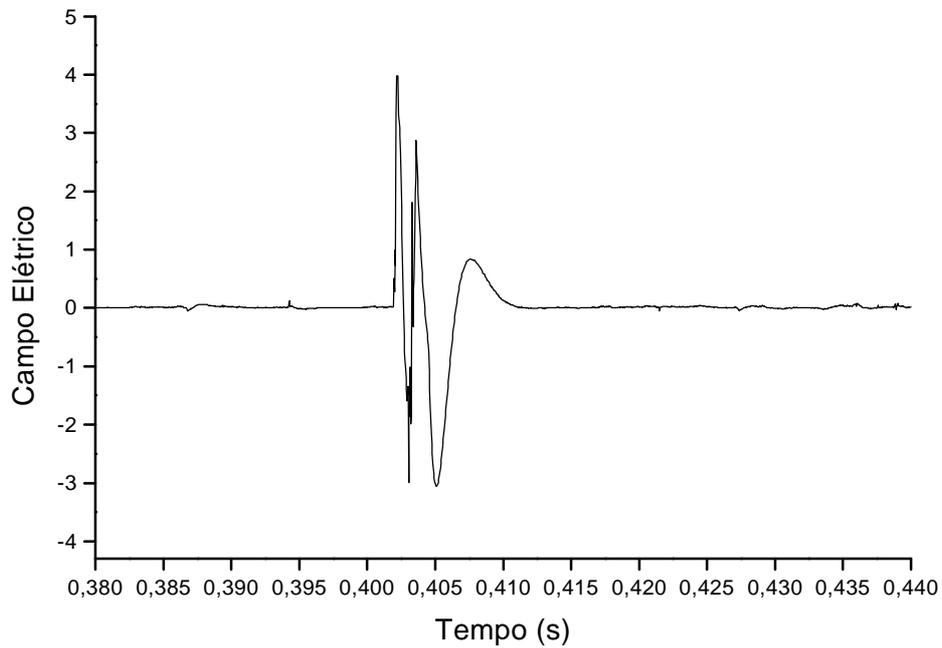


Fig. 4.29 - Forma de onda de campo elétrico de descargas de retorno sobrepostas.

Outro fenômeno desconhecido foi evidenciado em algumas formas de onda de campo elétrico. Este fenômeno ao qual foi dado o nome Sinal Dente de Serra (SDS), consiste em um sinal de frequência elevada que se apresenta nas variações preliminares e entre as descargas de retorno, sendo que este sinal se atenua à medida em que ele passa pelas descargas de ordens superiores até se extinguir na fase terminal do relâmpago, como pode ser visto na Figura 4.30. A Figura 4.31 mostra em escala ampliada parte do SDS nos primeiros três milissegundos do relâmpago.

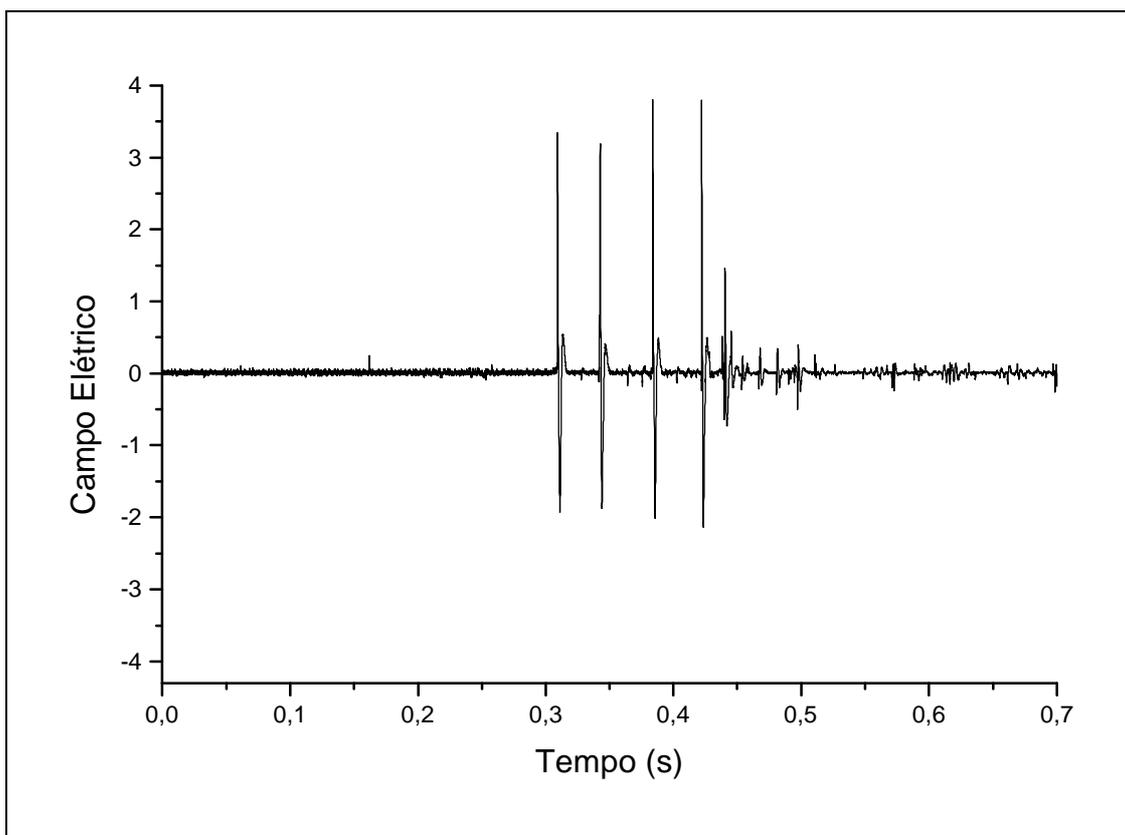


Fig. 4.30 - Sinal SDS presente na forma de onda de campo elétrico de um relâmpago ocorrido no dia 11 de fevereiro de 1999 às 18:11:30 LT.

O sinal SDS apresentado nas Figuras 4.30 e 4.31 possui uma frequência de aproximadamente 2kHz, sendo cada dente composto por pulsos na forma de degraus. Não se sabe ainda se a causa desse sinal é devido a um processo desconhecido no relâmpago ou a uma influência do aumento do campo elétrico ambiente sobre a eletrônica.

Finalmente, a Figura 4.32 mostra a forma de onda de um campo elétrico com descargas de retorno de polaridades opostas, o que caracteriza esta forma de onda como a de um possível relâmpago nuvem-solo bipolar. Este relâmpago ocorreu no dia 4 de outubro de 1999, às 20:01:14 horas (LT). Esta forma de onda apresenta um ruído que talvez possa ter escondido as variações de campo elétrico associadas a outros processos que ocorrem no relâmpago além das descargas de retorno. Para poder dizer que a forma de onda de

campo elétrico apresentada na Figura 4.32 é com certeza de um relâmpago bipolar e não de dois relâmpagos distintos que ocorreram quase no mesmo instante, duas condições devem ser satisfeitas. A primeira é que as descargas de retorno estejam afastadas entre si por no máximo 300ms. Esta condição é satisfeita, pois as descargas de retorno estão separadas por aproximadamente 260ms. A segunda condição é que as duas descargas de retorno devem ter o mesmo canal ou pelo menos parte do canal em comum. Para verificar se esta segunda condição foi satisfeita deveria ser utilizado o sistema SAFIR. Este sistema mapeia a trajetória do canal desde o seu ponto de origem dentro da nuvem (se o relâmpago for nuvem-solo) até o ponto onde o canal terminar. Como esta segunda condição não foi verificada, diz-se que a forma de onda mostrada na Figura 4.32 é de um possível relâmpago bipolar.

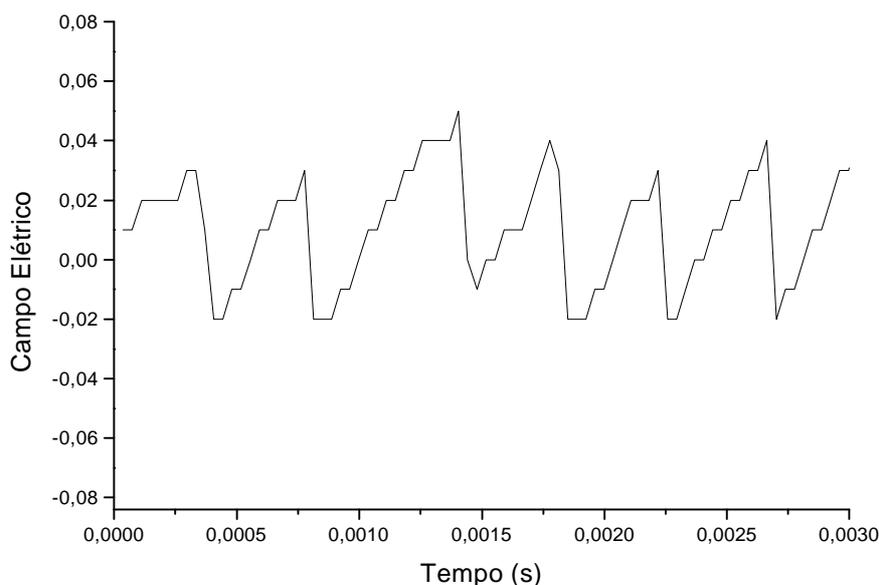


Fig. 4.31 - Ampliação do período inicial do sinal SDS apresentado anteriormente na Figura 4.30.

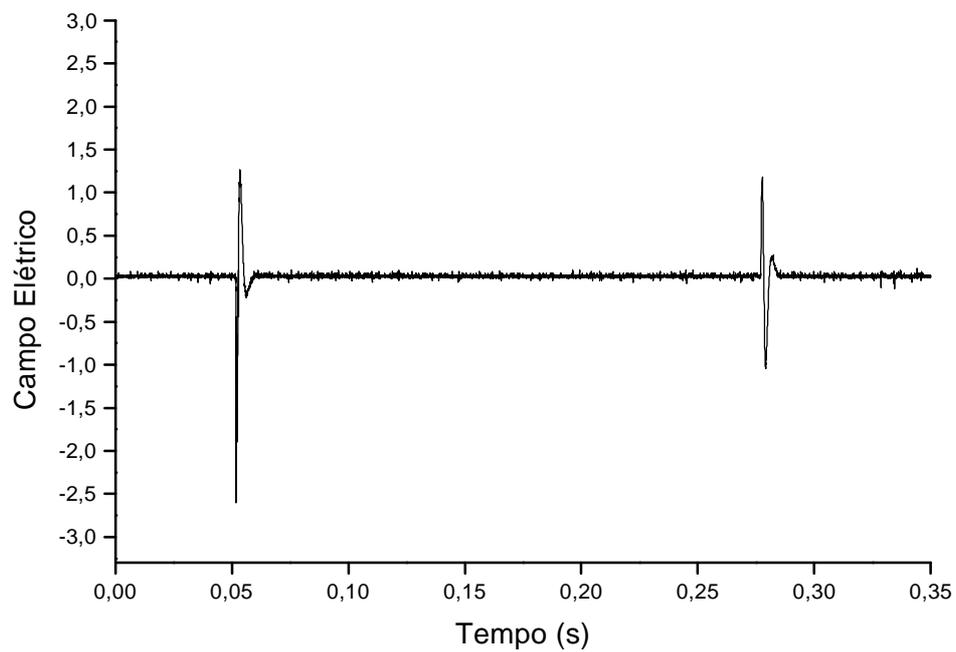


Fig. 4.32 - Forma de onda de campo elétrico de um possível relâmpago bipolar.

Para finalizar, a tabela 4.3 resume os principais resultados obtidos.

**TABELA 4.3 – PRINCIPAIS RESULTADOS**

Tempo médio entre descargas de retorno	69ms
Tempo médio entre descargas K	18,5ms
Multiplicidade típica	6 descargas de retorno
Duração média das variações preliminares	118ms



## 5 – CONCLUSÕES

Este Capítulo finaliza o trabalho apresentando as principais conclusões obtidas a partir do estudo realizado.

Com respeito ao estudo do tempo entre as descargas de retorno em relâmpagos múltiplos ocorridos no Brasil, conclui-se que não há uma dependência do tempo entre as descargas de retorno com a ordem das descargas. O tempo entre as descargas de retorno tem duração de dezenas a centenas de milissegundos, apresentando um valor médio de 69ms. Este valor está de acordo com Schonland (1956). Quanto à multiplicidade, parece que os relâmpagos no Brasil possuem uma multiplicidade típica igual a 6 (seis).

Outra conclusão importante obtida a partir do estudo realizado em cima do tempo entre as descargas de retorno, é que ele obedece uma distribuição log normal, o que pode ser evidenciado nas Figuras 4.7 e 4.8.

Com relação ao estudo das descargas K, conclui-se que o tempo entre as descargas K que ocorrem em relâmpagos nuvem-solo, também não depende da ordem das descargas de retorno entre as quais elas ocorrem. Esta conclusão foi a mesma em que Kitagawa e Brook (1960) chegaram ao estudar descargas K ocorridas no Novo México. O tempo médio entre as descargas K obtido por eles foi de 8,5ms, enquanto o tempo médio entre as descargas K ocorridas aqui no Brasil foi de 18,5ms.

Conforme foi observado na Figura 4.11, um maior número de descargas K ocorre entre a quinta e a sexta descarga de retorno. Ao se comparar a Figura 4.11 com a Figura 4.4, nota-se que ambas possuem comportamentos similares e são tais que, onde há um acréscimo de tempo entre as descargas de retorno, há também um acréscimo no número de descargas K na ordem considerada. Isto nos levou a concluir que, as descargas K nos relâmpagos simplesmente acontecem a uma taxa constante, de forma que, o pico do número de descargas K por relâmpago em função da ordem da descarga é explicado pelo maior intervalo de tempo existente entre a quinta e a sexta descargas de retorno.

Este fato juntamente ao fato de que as descargas K correspondem à neutralização de cargas na nuvem, sugere que as descargas K não preparam a nuvem para a ocorrência de novas descargas de retorno ou até mesmo outros relâmpagos.

Outra conclusão também interessante e original é que a distribuição dos intervalos de tempo entre as descargas K que ocorrem nos relâmpagos nuvem-solo também obedece uma distribuição log normal como pode ser visto nas Figuras 4.12 e 4.13.

Com relação ao estudo das variações preliminares, conclui-se que elas parecem não possuir uma tendência a seguir o esquema BIL proposto por Clarence e Malan (1957), pois, como foi visto apenas 39% das variações preliminares se encaixam perfeitamente neste esquema. Os outros 61% estavam divididos entre variações que apresentavam apenas os períodos B, I ou L, ou talvez apenas dois deles. Talvez, a causa da ausência de algum dos períodos (B,I ou L) seja atribuída ao fato da sensibilidade da antena não ter sido suficiente para detectar o sinal, seja pela baixa intensidade deste ou pela atenuação do sinal com a distância. Não obstante, não se pode descartar a idéia de que, talvez, a ausência do período (I) seja atribuída ao fato de que ele realmente não exista. Sugere-se para o futuro que um estudo similar a este seja feito utilizando uma antena de detecção de campo elétrico com maior sensibilidade, para que se possa chegar a resultados mais conclusivos. A duração média das variações preliminares dos relâmpagos ocorridos no Brasil é de 118ms, a mesma duração encontrada por Beasley et al. (1982) na Flórida.

Neste trabalho foram observadas cinco formas de onda de campo elétrico de relâmpagos no céu bem diferentes das formas de onda de campo elétrico dos relâmpagos nuvem-solo. Assim, conclui-se que é possível a identificação dos relâmpagos como sendo no céu ou nuvem-solo através da sua forma de onda de campo elétrico, sem que haja a sua observação visual. Isso facilita um estudo estatístico de uma grande quantidade de formas de onda, já que dispensaria a necessidade da observação visual do relâmpago para a sua identificação. Os relâmpagos no céu observados são compostos apenas por duas fases, uma muito ativa (MA) e outra final mais lenta (F), não contendo a parte inicial (I) proposta por Kitagawa e Brook (1960). A ausência da parte I pode ser devida

ao fato de que os relâmpagos no céu são mais fracos, de modo que o sinal associado à fase I também seja mais fraco e portanto de difícil detecção ou ao fato de que realmente a fase I não exista. Assim, não se pode afirmar com certeza que as formas de onda de campo elétrico de relâmpagos no céu ocorridos no Brasil, seguem um padrão diferente do padrão proposto por Kitagawa e Brook (1960). Além disso, o padrão obtido em 1960 por Kitagawa e Brook é resultado da observação de 1400 formas de ondas. Da mesma forma, para obtermos um padrão brasileiro seria necessária a observação de um número maior de formas de onda de campo elétrico de relâmpagos no céu, obtidas com uma antena que possua maior sensibilidade com a finalidade de observar a ocorrência ou não da fase I.

A seção 4.5 desta dissertação apresenta uma série de formas de onda de campo elétrico de relâmpagos ocorridos no Brasil, as quais são atípicas, apresentando variações de campo elétrico que não são comuns na literatura. Assim, pode-se ver que o estudo das formas de onda de campo elétrico de relâmpagos ocorridos no Brasil é uma interessante área de investigação.

Com relação ao trabalho como um todo, conclui-se que, mesmo com todas as dificuldades pertinentes a um trabalho realizado pela primeira vez, todos os objetivos foram conseguidos e os resultados provavelmente servirão como fonte de pesquisa para trabalhos futuros. Este trabalho é o marco inicial das pesquisas da radiação eletromagnética dos relâmpagos no Brasil, tendo em vista que novos trabalhos na área serão desenvolvidos.

No Brasil, o grupo de eletricidade atmosférica (ELAT) do INPE, além dos equipamentos já possuídos para estudo dos relâmpagos, adquiriu dois novos osciloscópios capazes de trabalhar a uma taxa de aquisição de 10 nanossegundos, o que permite fazer uma pesquisa de ponta em se tratando da radiação gerada pelo relâmpago. Assim, uma sugestão para trabalhos futuros é o estudo de estruturas finas nos relâmpagos e também das amplitudes dos pulsos associados às descargas que ocorrem no relâmpago, o que é permitido pela alta taxa de aquisição dos osciloscópios. O ELAT

também está desenvolvendo um sítio para lançamento de foguetes com o fim de induzir relâmpagos. Tendo em mãos estes osciloscópios e este sítio, sugere-se para um trabalho futuro, a comparação entre as formas de onda de campo elétrico de relâmpagos naturais e induzidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, R.; Bjornsson, S.; Blanchard, D.C.; Gathman, S.; Hughes, J.; Janasson, S.; Moor, C.B.; Survilas, H.J.; Vonnegut, B. Electricity in volcanic clouds. **Science**, v.148, n. 3674, p. 1179-1189, 1965.
- Barry, J. D. **Ball lightning and bead lightning**. New York: Plenum, 1980.
- Beasley, W.; Uman, M. A.; Rustan, P. L. Jr. Electric fields preceding cloud-to-ground lightning flashes. **J. Geophys. Res.**, v. 87, n. C7, p. 4883-4902, June 1982.
- Berger, K.; Anderson, R. B.; Kroninger, H. Parameters of lightning flashes, **Electra**. v. 80, p. 23-37, 1975.
- Brook, M.; Vonnegut, B. Visual confirmation of the junction processes in the lightning discharges. **J. Geophys. Res.**, v. 65, n. 4, p. 1302-1303, 1960.
- Brook, M.; Kitagawa, N.; Workman, E. J. Quantitative study of strokes and continuing currentes in lightning discharges to ground. **J. Geophys.Res.**, v. 67, n. 2, p. 649-657, 1962.
- Brook, M.; Nakano, M.; Krehbiel, P.; Takeuti, T. The electrical structure of the Hokuriku winter thunderstorm. **J. Geophys. Res.**, v. 87, n. C2, p. 1207-1215, 1982.
- Bruce, C.E.R.; Golde, R.H. The lightning discharge. **J. Inst. Electr. Eng.**, v.88, p. 487-520, 1941.
- Cooray, V.; Lundquist, S. On the Characteristics of some radiation fields from lightning and their possible origin in positive ground flashes. **J. Geophys. Res.**, v. 87, n. C13, p. 11,203-11,214, 1982.

- Cooray, V.; Lundquist, S. Characteristics of the radiation fields from lightning in Sri Lanka in the tropics. **J. Geophys. Res.**, v. 90, n. D4, p. 6099-6109, 1985.
- Fisher, R. J.; Uman, M. A Measured electric fields risetimes for first and subsequent lightning return strokes. **J. Geophys. Res.**, v. 77, n. 3, p. 399-406, 1972.
- Holzer, R. G. Simultaneous measurement of sferics signals and thunderstorm activity. In: Byers, H. G.; ed. **Thunderstorm electricity**. Chicago: University of Chicago Press, 1953. p. 267-275.
- Idone, V. P.; Orville, R. E. Lightning return stroke velocities in the Thunderstorm Research International Program (TRIP). **J. Geophys. Res.**, v.87, n. C7, p. 4903-4915, 1982.
- Iribarne, J.V. Cho, H.R. **Atmospheric Physics**, Dorecht: Reidel, 1980.
- Kitagawa, N.; Brook, M. A comparison of intracloud and cloud-to-ground lightning discharges. **J. Geophys. Res.** v. 65, n. 4, p. 1189-1201, 1960.
- Kitagawa, N.; Brook, M.; Workman, E. J. Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges. **J. Geophys. Res.** ,v. 67, n. 2, p. 637-647, 1962.
- Krehbiel, P. R.; Brook, M.; McCrory R. A. An analysis of the charge structure of lightning discharges to ground. **J. Geophys. Res.** v. 84, n. C5, p. 2432-2455, 1979.
- Krider, E. P.; Guo, C. The peak electromagnetic power radiated by lightning return strokes. **J. Geophys. Res.**, v. 88, n. C13; p. 8471-8474, 1983.

- Lin, Y.T.; Uman, M. A.; Tiller, J. A.; Brantley, R. D.; Beasley, H. W.; Krider, E. P.; Weidman, C. D. Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurements. **J. Geophys. Res.**, v. 84, n. C10; p. 6307-6314, 1979.
- Lin, Y.T.; Uman, M. A.; Standler, R. B. Lightning return stroke models. **J. Geophys. Res.**, v. 85, n. C3; p. 1571-1583, 1980.
- Mclain, D.K.; Uman, M.A. Exact expression and moment approximation for the electric field intensity of the lightning return stroke , **J. Geophys. Res.**, v. 76, n. 9; p. 2101-2105, 1971.
- Newman, M. M.; Stahmann, J. R.; Robb, J. D.; Lewis, E. A. ; Martin, S. G.; Zinn, S. V. Triggered lightning strokes at very close range. **J. Geophys. Res.**, v. 72, n. 18, p. 4761-4764, 1967.
- Ogawa, T.; Brook, M. The mechanism of the intracloud lightning discharge. **J. Geophys. Res.**, v. 69, n. 24, p. 5141-5150, 1964.
- Ogawa, T. Lightning currents. In: Volland, H. ed. **Handbook of atmospheric electroynamics**. Bonn: Radioastronomical Institute, University of Bonn, CRC Press, v. 1. p. 93-136, 1994.
- Orville, R. E.; Henderson, R. W.; Bosart, L. F. An east coast lightning detection network. **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, v. 64, n. 9, p. 1029-1037, 1983.
- Pinto, O. Jr.; Pinto, I.R.C.A. **Relâmpagos**. São Paulo: Brasiliense, 1996.

- Pinto, O. Jr.; Pinto, I.R.C.A.; Gomes, M.A.S.S.; Padilha, A.L.; Vitorello, I.; Diniz, J.H.; Carvalho, A.M.; Filho, A. C. Cloud-to-ground lightning in the southeastern Brazil in 1993, 1, Geographical distribution. **J. Geophys. Res.**, v.104, n. D24, p. 31369-31380, 1999a.
- Pinto, I.R.C.A., O. Pinto Jr., R.M.L. Rocha, J.H. Diniz, A.M. Carvalho; Filho, A. C. Cloud-to-ground lightning flashes in the southeastern Brazil in 1993, 2, Time variations and flash characteristics. **J. Geophys. Res.**, v.104, n. D24, p. 31381-31388, 1999b.
- Rakov, V.A. Lightning electric and magnetic fields. **Proc. Of the 13th Int. Zurich Symp. On EMC.** , pp. 561-566, February 1999.
- Salanave, L.E. **Lightning and its spectrum.** Tucson: University of Arizona, 1980. 136p.
- Schonland, B. F. J. The lightning discharge. In: Flügge, S. ed. **Handb. Phys.**, v. 22, p. p. 576-628, 1956.
- Thomson, E. M.; Galib, M. A.; Uman, M. A.; Beasley, W. H.; Master, M. J. Some features of stroke occurrence in Florida lightning flashes. **J. Geophys. Res.**, v. 89, n. D3, p. 4910-4916, 1984.
- Thottappilli, R.; Rakov, V. A. and Uman, M. A. K and M changes in close lightning ground flashes in Florida. **J. Geophys. Res.**, v. 95, n. D11, p. 18,631, 1990.
- Tiller, J. A.; Uman, M. A.; Lin, Y. T.; Brantley, R. D.; Krider, E. P. Electric field statistics for close lightning return strokes near Gainesville, Florida. **J. Geophys. Res.**, v. 81, n. 24, p. 4430-4434, 1976.

- Uman, M.A.; Mclain, D.K. Magnetic field of lightning return stroke, **J. Geophys. Res.**, v. 74, n. 28, p. 6899-6910, 1969.
- Uman, M.A.; Mclain, D.K. Radiation field and current of the lightning stepped leader, **J. Geophys. Res.**, v. 75, n. 6, p. 1058-1066, 1970a.
- Uman, M.A.; Mclain, D.K. Lightning return stroke current from magnetic and radiation field measurements, **J. Geophys. Res.**, v.75, n. 27, p. 5143-5147, 1970b.
- Uman, M.A.; Seacord, D. F.; Price, G. H.; Pierce, E. T. Lightning induced by thermonuclear detonation, **J. Geophys. Res.**, v. 77, n. 9, p. 1591-1596, 1972.
- Uman, M.A.; Mclain, D.K.; Krider, E.P. The electromagnetic radiation from a finite antenna, **Am. J. Phys.**, v. 43, n. 1, p. 33-38, 1975a.
- Uman, M.A.; Brantley, R.D.; Lin, Y.T.; Tiller, J.A. Correlated electric and magnetic fields from lightning return strokes, **J. Geophys. Res.**, v. 80, n. 3, p. 373-376, 1975b.
- Uman, M.A. **The lightning discharge**. Florida: Academic, 1987. 377p.
- Villanueva, Y., Rakov, V.A., Uman, M.A.; Brook, M. Microsecond-scale electric field pulses in the cloud lightning discharges, **J. Geophys. Res.**, v. 99, n. D7, p. 14,353-14,360, 1994.
- Willett, J.C. Bailey, J.C.; Krider, E.P. A class of unusual lightning electric field waveforms with very strong high frequency radiation, **J. Geophys. Res.**, v. 94, n. D13, p. 16,255-16,267, 1989.