



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



INPE-15400-TDI/1414

## CARACTERÍSTICAS DOS RELÂMPAGOS NUVEM-SOLO NEGATIVOS QUE APRESENTAM MÚLTIPLOS CANAIS

Marco Antonio da Silva Ferro

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba e Osmar Pinto Júnior, aprovada em 24 de outubro de 2008

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/11.10.13.47>>

INPE  
São José dos Campos  
2008

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: [pubtc@sid.inpe.br](mailto:pubtc@sid.inpe.br)

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO:**

### **Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

### **Membros:**

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

## **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

## **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

## **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



INPE-15400-TDI/1414

## CARACTERÍSTICAS DOS RELÂMPAGOS NUVEM-SOLO NEGATIVOS QUE APRESENTAM MÚLTIPLOS CANAIS

Marco Antonio da Silva Ferro

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba e Osmar Pinto Júnior, aprovada em 24 de outubro de 2008

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/11.10.13.47>>

INPE  
São José dos Campos  
2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

F417c Ferro, Marco Antonio da Silva.  
Características dos relâmpagos nuvem-solo negativos que apresentam múltiplos canais / Marco Antonio da Silva Ferro. – São José dos Campos : INPE, 2009.  
242p. ; (INPE-15400-TDI/1414)

Tese (Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

Orientadores : Marcelo Magalhães Fares Saba e Osmar Pinto Júnior.

1. Relâmpagos. 2. Raios. 3. Canal do relâmpago. 4. Novo canal. 5Líder bi-direcional. Índices. I.Título.

CDU 551.594.221

---

Copyright © 2009 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, microfilmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de Doutor(a) em  
Geofísica Espacial

Dr. Alexandre Alvares Pimenta

  
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Marcelo Magalhães F. Saba

  
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

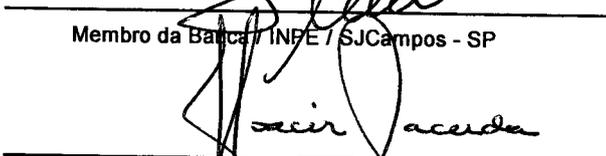
Dr. Osmar Pinto Junior

  
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

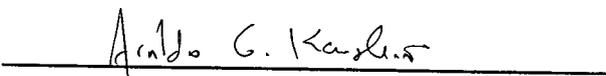
Dr. Plínio Carlos Alvalá

  
Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Moacir Lacerda

  
Convidado(a) / UFMS / Campo Grande - MS

Dr. Arnaldo G. Kanashiro

  
Convidado(a) / IEE/USP / São Paulo - SP

Aluno (a): Marco Antonio da Silva Ferro

São José dos Campos, 24 de outubro de 2008



*“Ninguém é tão ignorante que não tenha algo a ensinar e ninguém é tão sábio que não tenha algo a aprender”.*

*Blaise Pascal (1623 – 1662), filósofo e matemático francês*



*À minha esposa Débora e a meus filhos Bruno e Lara.*



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que orienta o caminho, a conduta, a vida.

A meus pais, os primeiros orientadores no árduo trabalho de forjar o homem.

Aos meus orientadores, Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba e Dr. Osmar Pinto Jr., pela compreensão e paciência na orientação deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pela predisposição em analisar este trabalho e pelas sugestões recebidas.

Ao Dr. Vladslav Mazur pelos esclarecimentos que propiciaram um entendimento claro e preciso da teoria na qual se baseia este trabalho e pela disposição em discutir algumas das propostas aqui apresentadas.

Aos amigos do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) pelo apoio e pelas valiosas contribuições e sugestões dadas.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e ao Centro Técnico Aeroespacial e pelo apoio na realização desta pesquisa.

E, em especial, à minha família, pelas muitas horas de convívio roubadas, pela compreensão, paciência e amor com que me apoiou.



## RESUMO

Um relâmpago nuvem-solo negativo possui em média 3 a 4 descargas. Estas descargas nem sempre seguem o mesmo caminho ao propagarem-se em direção ao solo, podendo gerar mais de um ponto de impacto. Para entender o processo de formação de novos canais (caminhos), foram utilizados neste estudo registros em vídeo com resolução temporal igual ou menor que 1 ms. Simultaneamente, as variações do campo elétrico irradiado pelo relâmpago foram registradas com uma antena rápida com alta taxa de aquisição. O banco de dados adquirido neste estudo contém registros de relâmpagos obtidos no Sul e Sudeste do país nos verões de 2003 a 2007 e no verão de 2007 em Tucson, Arizona, EUA. A partir desse banco de dados foi extraído um conjunto de 167 relâmpagos nuvem-solo negativos, com um total de 779 descargas, 264 (34%) das quais seguiram um novo caminho para o solo. A análise individual das descargas permitiu encontrar algumas informações relevantes acerca da formação dos novos canais. Foi observado, que apesar de existir uma tendência das descargas subseqüentes continuarem a utilizar o novo canal consolidando-o, nas primeiras descargas essa tendência é menos observada. A maior parte dos novos canais (52 %) acontece na segunda descarga de retorno. A formação do novo canal parece não ter influencia sobre o mecanismo que governa o intervalo entre descargas. Observou-se que em uma pequena porcentagem dos relâmpagos com múltiplas descargas (7%), as descargas imediatamente seguintes ao novo canal retornaram ao canal "original" ou anterior ao novo canal. Uma explicação para esse fenômeno foi apresentada com base no conceito do líder bi-direcional e de carga líquida zero. O resultado da análise realizada neste trabalho mostrou que a tendência das descargas que formam novos canais a terem um pico de corrente maior é menos intensa que a redução deste quando ela é seguida por corrente contínua longa. De forma inédita, a análise do registro de um relâmpago nuvem-solo negativo natural permitiu corroborar a interpretação dada, com base no conceito do líder bi-direcional, a alguns dos processos que ocorrem durante o desenvolvimento do relâmpago. De modo geral a maior parte dos novos canais ocorre após uma única utilização do canal onde o intervalo de tempo antecedente não é determinante na criação dos mesmos. No entanto, a formação de novos canais após várias utilizações de um mesmo caminho ao solo se dá prioritariamente após um longo intervalo de tempo.



## **CHARACTERISTICS OF NEGATIVE CLOUD-TO-GROUND LIGHTNING SHOWING MULTIPLE CHANNELS**

### **ABSTRACT**

A negative cloud-to-ground flash in average contains 3 to 4 strokes. These strokes do not usually follow the same path towards ground. New paths and ground contact points may occur. In order to understand the formation processes of new channels, high-speed videos were used with temporal resolution less or equal to 1 ms. Electric field changes were also recorded for several events. Recordings of lightning flashes were obtained in the South and Southeast regions of Brazil during summer (2003 to 2007) and around Tucson, Arizona (USA) during 2007. In a subset of 779 strokes (from 167 flashes), 264 (34%) strokes followed a new channel. Some relevant information regarding the formation of new channels was obtained from the analysis of each stroke. Although most of the strokes tend to follow the previous channel this tendency is not observed in the first stroke orders. 52% of the new channels occurred in the second order stroke. The formation of new channels seems not to influence the mechanism that rules the interstroke interval. In a small percentage of multiple stroke flashes (7%) strokes following a new channel returned to the original channel. An explanation based on the bi-directional and zero net charge leader concept was proposed. It was observed that the reduction of the peak current when a stroke is followed by a long continuing current is stronger than the peak current increase observed when strokes follow a new channel. For the first time some processes of the lightning discharge were interpreted with the bidirectional leader concept using the images of a natural negative cloud-to-ground flash. In general most of the new channels occur after a single usage of the channel and for these cases the interstroke time interval is not an important parameter. On the other hand, when the channel is used more than once, a new channel occurs mostly after a long interstroke interval.



## SUMÁRIO

Pág.

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	
<b>LISTA DE TABELAS</b>	
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b>	
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>29</b>
<b>2 O RELÂMPAGO NUVEM-SOLO NEGATIVO–UMA BREVE DESCRIÇÃO</b>	<b>33</b>
<b>3 PROCESSOS DE UM RELÂMPAGO NUVEM-SOLO NEGATIVO</b>	<b>41</b>
3.1 Introdução	41
3.2 Quebra da rigidez inicial	41
3.3 Líder escalonado	41
3.4 Descarga de retorno	55
3.5 Líder contínuo e contínuo-escalonado	58
3.6 Processos J e K	59
3.7 Corrente contínua	63
3.8 Componente M	68
<b>4 A TEORIA DO “LÍDER BI-DIRECIONAL”</b>	<b>71</b>
4.1 Introdução	41
4.2 A iniciação do relâmpago	41
4.2.1 Discrepância na magnitude do campo elétrico no interior das nuvens de tempestade	73
4.2.2 Hipóteses de mecanismos de intensificação do campo na nuvem	41
4.2.3 O mecanismo de desenvolvimento do streamer e do líder escalonado	41
4.3 O desenvolvimento dos líderes	85
4.3.1 Schonland e a classificação dos líderes escalonados	85
4.3.2 Kasemir e o conceito da bi-direcionalidade e carga líquida zero	86
4.3.3 Mazur e a ausência de “ruído” na extremidade positiva da árvore com dupla terminação	88
4.4 A descarga de retorno e sua multiplicidade	91
4.4.1 Schonland e os streamers partindo dos “pacotes” de carga	92
4.4.2 Bruce e Golde e os streamers partindo em direção aos “pacotes” de carga	93
4.4.3 Malan e Schonland e o desenvolvimento contínuo dos streamers	94
4.4.4 Mazur e o efeito da extensão do canal e da corrente contínua	96
4.5 A interrupção do canal	101
4.5.1 Stan Heckman e o efeito da extensão do canal e da corrente contínua	101
4.5.2 Mazur e o efeito do “estrangulamento” do campo elétrico	105
4.6 Comportamento da ionização do canal durante o intervalo entre descargas	107
<b>5 EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS DADOS</b>	<b>111</b>
5.1 Introdução	111
5.2 Equipamentos	113
5.2.1 Câmeras de alta velocidade	113
5.2.2 Antena rápida de campo elétrico	116

5.2.3	Rede brasileira de detecção de descargas atmosféricas - BrasilDat .....	119
5.3	Metodologia de análise dos dados .....	123
5.3.1	Dados coletados .....	123
5.3.2	Metodologia de análise .....	124
<b>6</b>	<b>DESCARGAS QUE SEGUEM UM NOVO CANAL PARA O SOLO.....</b>	<b>129</b>
6.1	Revisão dos estudos envolvendo novos canais .....	129
6.2	Características específicas dos processos envolvidos na criação de um novo canal .....	133
6.2.1	Relação entre novos canais e a ordem das descargas .....	133
6.2.1.1	Estudos anteriores .....	133
6.2.1.2	Este estudo .....	135
6.2.2	Relação entre novos canais e o efeito do número de descargas no mesmo canal .....	137
6.2.2.1	Estudos anteriores .....	137
6.2.2.2	Este estudo .....	139
6.2.3	Relação entre um novo canal e o intervalo que o antecede .....	141
6.2.3.1	Estudos anteriores .....	141
6.2.3.2	Este estudo .....	143
6.2.4	Padrão de iniciação da corrente contínua longa iniciada por uma descarga que segue um novo canal .....	149
6.2.4.1	Estudos anteriores .....	149
6.2.4.2	Este estudo .....	150
6.2.5	Comparação do pico de corrente da descarga que segue um novo canal, com a que segue um mesmo canal e com a primeira descarga de retorno .....	151
6.2.5.1	Estudos anteriores .....	151
6.2.5.2	Este estudo .....	152
6.2.6	Relação entre a duração da CC e o pico de corrente da descarga que segue um novo canal que dá início a ela .....	154
6.2.6.1	Estudos anteriores .....	154
6.2.6.2	Este estudo .....	154
<b>7</b>	<b>COMPROVAÇÃO DA TEORIA DO LÍDER BI-DIRECIONAL .....</b>	<b>157</b>
7.1	Desenvolvimento do líder bi-direcional – A árvore de dupla terminação .....	159
7.1.1	Hipótese proposta .....	159
7.1.2	Comprovação através do relâmpago analisado .....	162
7.1.2.1	Desenvolvimento da árvore de dupla terminação .....	163
7.1.2.2	A região de iniciação do relâmpago .....	164
7.2	Descarga de retorno .....	168
7.2.1	Hipótese proposta .....	168
7.2.2	Comprovação através do relâmpago analisado .....	169
7.3	Canal “original” .....	170
7.3.1	Hipótese proposta .....	170
7.3.2	Comprovação através do relâmpago analisado .....	171
7.4	Interrupção do canal “original” .....	173
7.4.1	Hipótese proposta .....	173
7.4.2	Comprovação através do relâmpago analisado .....	177

7.4.2.1 Desenvolvimento do líder positivo no interior da região de carga espacial negativa da nuvem.....	177
7.4.2.2 A interrupção da corrente no canal .....	180
7.5 Deposição de carga negativa na extremidade inferior do canal “original”.....	185
7.6 Criação do líder contínuo-escalonado.....	189
7.6.1 Hipótese proposta .....	189
7.6.2 Comprovação através do relâmpago analisado .....	192
7.7 Propagação do líder contínuo-escalonado.....	194
7.7.1 Hipótese proposta .....	194
7.7.2 Comprovação através do relâmpago analisado .....	196
7.7.2.1 O desvio para o segundo canal do relâmpago.....	197
7.7.2.2 O desvio para o terceiro canal do relâmpago.....	200
7.7.2.3 A influência dos <i>attempted leaders</i> na criação de um novo canal.....	202
7.8 Descarga de retorno no novo canal .....	204
7.9 Novo canal .....	205
7.10 Interrupção do novo canal.....	206
7.11 Deposição de carga negativa na extremidade inferior do novo canal....	207
7.12 Líder contínuo desviado para o canal “original”.....	208
7.13 Descarga retorna ao canal “original” .....	210
<b>8 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES .....</b>	<b>213</b>
8.1 Discussão e resultados .....	214
8.1.1 Por que não temos só novos canais?.....	214
8.1.2 O que causa a interrupção precoce do canal da descarga anterior? .....	215
8.1.3 O que favorece a criação de novos canais? .....	216
8.1.4 Uma vez criado, o novo canal se consolida? .....	218
8.1.5 Corrente contínua versus novo canal – qual processo tem maior influência sobre as características do relâmpago?.....	219
8.1.6 Exceções.....	221
8.2 A hipótese do retorno ao canal “original”.....	222
8.3 Análise do registro em vídeo do desenvolvimento da “árvore” de dupla terminação para um relâmpago nuvem-solo negativo natural.....	224
8.4 Contribuições .....	229
8.4.1 Comprovação da teoria do líder bi-direcional.....	229
8.4.2 Hipótese explicando o retorno para o canal “original” .....	229
8.4.3 Análise da influência sobre o pico de corrente das descargas que, simultaneamente, seguem um novo canal e dão origem à uma corrente contínua .....	229
8.4.4 Identificação do processo predominante na criação de um novo canal ..	229
8.5 Questões restantes .....	230
8.5.1 Quais são as condições ou fatores que levam ou favorecem a interrupção precoce do canal do relâmpago? .....	230
8.5.2 Por que os novos canais ocorrem temporalmente agrupados em determinadas tempestades? .....	231
8.5.3 Quais os processos físicos envolvidos na inicialização do <i>recoil leader</i> ?.....	231
8.5.4 Os processos físicos de criação de um novo canal em relâmpagos nuvem-solo positivos diferem dos negativos? .....	232

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>233</b>
---	------------

## LISTA DE FIGURAS

2.1 – Processos de uma descarga de retorno.....	34
2.2 – Propagação de um líder escalonado.....	34
2.3 – Estrutura do relâmpago.....	34
2.4 – A primeira e segunda descargas de retorno.....	34
3.1 – Desenvolvimento de uma avalanche de elétrons.....	43
3.2 – Estrutura BIL do campo elétrico - <i>Clarence and Malan (1957)</i> .....	43
3.3 – Registro do campo elétrico das variações preliminares.....	45
3.4 – Registro do campo elétrico da quebra de rigidez.....	46
3.5 – Pulsos da variação preliminar.....	47
3.6 – Pulsos da quebra de rigidez.....	48
3.7 – Registro do campo elétrico da primeira e subsequente descarga de retorno e subsequente.....	50
3.8 – Campo elétrico lento da descarga de retorno.....	51
3.9 – Campo elétrico da descarga de retorno.....	53
3.10 – Formas de onda típicas dos campos elétrico e magnético de uma descarga de retorno a várias distâncias.....	54
3.11 – Frente de onda de descargas de retorno.....	57
3.12 – Registro do campo elétrico de uma descarga subsequente que seguiu um novo canal.....	59
3.13 – Campo lento mostrando variações K e componentes M.....	60
3.14 – Pulso regular tipo “burst”.....	61
3.15 – Modelo conceitual de relâmpago proposto por <i>Proctor (1988)</i> .....	62
3.16 – Registros da luminosidade e de campo da corrente contínua.....	65
3.17 – Campo lento de um relâmpago com quatro descargas.....	66
3.18 – Campo lento mostrando componentes M.....	67
3.19 – A componente M.....	69
4.1 – Relâmpago iniciado pelo método de altitude.....	72
4.2 – Intensificação do campo nas extremidades de um condutor.....	75
4.3 – Descarga corona negativa.....	78
4.4 – Descarga corona positiva.....	79
4.5 – Propagação do <i>streamer</i> positivo.....	80
4.6 – Propagação do <i>streamer</i> negativo.....	81
4.7 – Desenvolvimento de um líder positivo.....	83
4.8 – Desenvolvimento de um líder negativo.....	84
4.9 – Descargas superficiais positivas e negativas em laboratório.....	86
4.10 – Relâmpago induzido por um avião.....	87
4.11 – Elongação esquemática da propagação do líder bi-direcional.....	89
4.12 – Propagação de líderes em laboratório.....	90
4.13 – <i>Schonland</i> e os <i>streamers</i> partindo dos “pacotes” de carga.....	93
4.14 – <i>Malan and Schonland</i> e o desenvolvimento contínuo dos <i>streamers</i> ....	95
4.15 – Mapa de radiação de um relâmpago intranuvem.....	97
4.16 – Registro de <i>recoil leader</i> em um relâmpago positivo.....	98
4.17 – Esquema da árvore bi-direcional de um relâmpago intranuvem.....	99
4.18 – Esquema da árvore bi-direcional de um relâmpago nuvem-solo.....	100

4.19 – Resistência diferencial negativa para um arco elétrico no ar .....	102
4.20 – Circuito equivalente de um canal de relâmpago.....	102
4.21 – Constante de tempo termodinâmica de um arco elétrico .....	103
4.22 – Diagrama de estabilidade para um canal de relâmpago .....	104
4.23 – Diagrama de estabilidade para nuvens de tempestade obtidas na literatura.....	105
4.24 – O conceito de “estrangulamento” do campo de <i>Mazur</i> .....	106
5.1 – Descargas atingindo o solo em pontos distintos .....	111
5.2 – A criação de um novo canal e o retorno para o canal “original” .....	112
5.3 – <i>Red Lake 8000S Motion Scope</i> .....	115
5.4 – <i>Photron Fastcam-512PCI</i> .....	115
5.5 – Registro da propagação de um líder a 4000 quadros por segundo .....	116
5.6 – Antena rápida para registro do campo elétrico .....	117
5.7 – Esquema de montagem do sistema de medição do campo elétrico ....	117
5.8 – Exemplo de registro do campo elétrico com a antena rápida .....	118
5.9 – Escala ampliada do registro do campo com a antena rápida .....	119
5.10 – Rede Nacional de Detecção e Localização de Relâmpagos - BrasilDat .....	120
5.11 – Exemplo das informações fornecidas pela BrasilDat .....	122
5.12 – Localização dos sites de São José dos Campos e Cachoeira Paulista .....	124
5.13 – Localização do site de <i>Tucson, Arizona</i> .....	125
5.14 – Trecho da planilha-base do estudo .....	127
6.1 – Distribuição das descargas que seguem um novo canal em função da ordem da descarga .....	136
6.2 – Distribuição dos intervalos entre descargas de retorno .....	144
6.3 – Sequencia de imagens mostrando a mudança para um novo canal e o retorno para o canal “original” .....	147
6.4 – Relação entre intervalos que antecedem o novo canal e o retorno para o canal “original” .....	148
6.5 – Esquema ilustrativo do padrão de iniciação de corrente contínua proposto por <i>Rakov and Uman (2003)</i> .....	149
6.6 – Valor médio do pico de corrente em função do tipo de descarga .....	150
6.7 – Pico de corrente versus duração da CC .....	155
7.1 – Canais utilizados pelo relâmpago de Tucson .....	159
7.2 – Representação esquemática da distribuição dos centros de carga ....	160
7.3 – Líder bi-direcional se propagando .....	162
7.4 – “Reconstrução” da árvore de dupla terminação .....	164
7.5 – Região de iniciação do relâmpago de Tucson .....	166
7.6 – Estrutura tripolar “clássica” de distribuição de cargas na nuvem .....	167
7.7 – Descarga de retorno no canal “original” .....	169
7.8 – Formação do primeiro canal do relâmpago .....	170
7.9 – Canal “original” .....	171
7.10 – Processo de energização do líder positivo pela descarga de retorno .	172
7.11 – Processo de “estrangulamento” do campo .....	175
7.12 – Interrupção do canal “original” .....	176

7.13 – Rápida recuperação do campo indicando a interrupção da corrente ..	177
7.14 – Desenvolvimento do líder positivo em função da utilização dos canais .....	178
7.15 – Camadas de ramificação do líder positivo .....	181
7.16 – Posição das câmeras em relação ao ponto de impacto .....	182
7.17 – Imagens comparativas da última descarga do relâmpago .....	183
7.18 – Seqüência de imagens mostrando a propagação de recoil leaders ....	184
7.19 – Aplanamento da forma de onda do campo elétrico indicando a interrupção do canal .....	187
7.20 – Deposição de carga negativa na extremidade inferior do canal “original” .....	188
7.21 – Desvio do líder contínuo da canal “original” .....	192
7.22 – Propagação de recoil leaders .....	193
7.23 – Sequencia de imagens mostrando um “ <i>attempted leader</i> ” .....	195
7.24 – Propagação do líder contínuo-escalonado .....	196
7.25 – Formação da primeira descarga de retorno .....	197
7.26 – Desvio do líder contínuo para o segundo canal do relâmpago.....	198
7.27 – Descarga de retorno no segundo canal.....	199
7.28 – Desenvolvimento do líder positivo/ .....	199
7.29 – Desvio do líder contínuo para o terceiro canal do relâmpago .....	200
7.30 – Descarga de retorno no terceiro canal .....	201
7.31 – Intervalos de tempo entre os “ <i>attempted leaders</i> ” anteriores ao segundo canal .....	202
7.32 – Intervalos de tempo entre os “ <i>attempted leaders</i> ” anteriores ao terceiro canal .....	203
7.33 – Descarga de retorno no novo canal .....	204
7.34 – O novo canal .....	206
7.35 – Interrupção do novo canal .....	207
7.36 – Deposição de carga negativa na extremidade inferior do novo canal .	208
7.37 – Desvio do líder contínuo do novo canal.....	210
7.38 – Descarga de retorno no canal “original” .....	211
8.1 – Fluxograma mostrando a distribuição das descargas subseqüentes ....	217
8.2 – Processo de retorno ao canal “original” .....	223



## LISTA DE TABELAS

4.1 – Resumo da máxima medida de campo elétrico em nuvens de tempestade .....	73
4.2 – Resumo da assimetria na polaridade em experimentos em escala de laboratório .....	91
4.3 – Condutividade elétrica de equilíbrio do ar seco a 1 atmosfera .....	109
6.1 – Exemplo de agrupamento temporal de relâmpagos com novos canais	137
6.2 – Resumo estatístico dos intervalos entre descargas .....	144
6.3 – Intervalo de tempo entre descargas alternando entre canais.....	148
6.4 – Intervalos de tempo precedendo descargas seguidas por uma CC longa .....	151
6.5 – Descargas sem nenhuma corrente contínua.....	153
6.6 – Descargas seguidas por corrente contínua curta ou muito curta (CCCMC) .....	153
6.7 – Descargas seguidas por corrente contínua longa (CCL).....	153



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
VHS	Video Home System
GPS	Global Positioning System
ELAT	Grupo de Eletricidade Atmosférica
BrasilDat	Rede Brasileira de Detecção e Localização de Relâmpagos
USA	United States of America
NASA	National Atmospheric and Space Administration
CG	Cloud-to-Ground
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
RINDAT	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
SIPAM	Sistema de Proteção da Amazônia
SIDDEM	Sistema de Informações Integradas baseado no sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas
LPATS	Lightning Positioning And Tracking System
ALDF	Advanced Lightning Direction Finder
TOA	Time-Of-Arrival
IMPACT	IMProved Accuracy from Combined Technology
MDF	Magnetic Direction Finder
DTOA	Diference of Time-Of-Arrival
AZ	Arizona
MG	Média Geométrica
CC	Corrente Contínua
CCL	Corrente Contínua Longa
CCCMC	Corrente Contínua Curta ou Muito Curta



## LISTA DE SÍMBOLOS

+, -	Íons positivos e elétrons, respectivamente
P	Pressão, bar
$\tau$	Constante de tempo termodinâmica
N	Densidade numérica de carga
$\Delta x$	Deslocamento, m
E	Campo elétrico, V/m
T	Intervalo ou período de tempo
t	Instante de tempo
R	Resistência elétrica, $\Omega$
L	Comprimento, m
C	Capacitância, F
I	Corrente elétrica, A
$\Phi$	Potencial, V
Q	Carga elétrica, C
Z	Altura, m
d/dt	Derivada em relação ao tempo
$I_p$	Pico de corrente



## 1 INTRODUÇÃO

No início do século vinte, quando da realização dos primeiros estudos a respeito dos relâmpagos nuvem-solo, os autores já apontavam a existência de relâmpagos com dois ou mais pontos de impacto no solo (SCHONLAND, 1935, 1938, 1956).

Mais tarde, Winn et al. (1973), utilizando registros em vídeo para estudar relâmpagos, passaram a denominar qualquer relâmpago nuvem-solo que produz dois ou mais canais distintos e separados que tocam o solo como “relâmpago de múltiplos canais”.

Kitagawa et al. (1962) encontraram que cerca de 49% de todas as descargas de retorno dos relâmpagos nuvem-solo ocorridos no Novo México apresentavam pontos de impacto no solo espacialmente separados, enquanto que Rakov et al. (1994) encontraram que cerca de 50% de todas as descargas tinham pontos de impacto diferentes na Flórida, Valine e Krider (2002) encontraram na sua amostra de 386 relâmpagos 558 pontos distintos de impacto no solo (1,45 pontos de impacto por relâmpago) e Saba et al. (2006a) encontraram que 70 em 138 relâmpagos (51%) tinham múltiplas terminações no solo no sudeste do Brasil. Esses estudos mostram que um considerável número de descargas nuvem-solo segue um caminho totalmente ou parcialmente novo, terminando em diferentes pontos de impacto no solo.

Esses estudos mostram que, devido à ocorrência de novos canais, a probabilidade de uma estrutura ou alguém ser atingido por uma descarga é cerca de 50% maior que o número de relâmpagos ocorridos ou, em outras palavras, é cerca de 50% maior que o esperado quando se admite que todas as descargas seguem o mesmo canal no relâmpago. Esse é um dado importante considerando que as

estimativas dos danos materiais causados por descargas atmosféricas alcançam milhões de dólares somente no Brasil e que os relâmpagos são responsáveis por cerca de 100 a 200 mortes por ano tanto no nosso país como nos Estados Unidos (PINTO Jr., 2005). Depois que estudos sobre novos canais começaram a ser realizados, o *National Severe Storms Laboratory*, ligado à NASA, passou a recomendar que a distância segura a partir do ponto de impacto de um relâmpago é, no mínimo, de 10 a 13 km em oposição aos 3 a 5 km recomendados pelos estudos anteriores (VALINE e KRIDER, 2002).

Os estudos mencionados acima e diversos outros como, por exemplo, Krehbiel (1981); Rakov e Uman (1990a), Thottappillil et al. (1992), Willett et al. (1995), Mazur et al. (1995), Valine e Krider (2002) e Saba et al. (2006b), apresentam estatísticas sobre algumas características das descargas que, de um modo geral, compõem um relâmpago com múltiplos canais, tais como: o número de pontos de impacto, o efeito da ordem da descarga na criação de um novo canal, o efeito do número de descargas consecutivas no mesmo canal sobre a probabilidade de criação de um novo caminho para o solo, a separação espacial dos pontos de impacto de um relâmpago e outras. Nesses estudos os autores se basearam em registros em vídeo dos relâmpagos no padrão VHS, registros do campo elétrico atmosférico ou ambos simultaneamente. Nesses casos, imprecisões podem ser introduzidas devido à baixa resolução temporal do gravador padrão de vídeo em VHS ou à baixa taxa de amostragem do sistema de aquisição de campo elétrico utilizado. As exceções foram Mazur et al. (1995) e Saba et al. (2006a) que utilizaram câmeras de alta velocidade. Saba et al, (2006b), utilizando uma câmera de alta velocidade e uma antena rápida de campo elétrico, mostrou, em seu estudo, estatísticas sobre corrente contínua incluindo valores no intervalo entre 2 ms e 10 ms,

denominados por Ballarotti et al. (2005) como correntes contínuas “muito curtas”.

O presente trabalho tem como objetivo estudar as descargas de retorno subseqüentes que seguem um novo caminho para o solo em relâmpagos nuvem-solo negativos, usando, de maneira inédita nesse tipo de estudo, registros em vídeo efetuados com uma câmara de alta velocidade, registros das variações do campo elétrico atmosférico obtidos a partir de uma antena com alta taxa de amostragem e registros efetuados pela rede brasileira de detecção de descargas atmosféricas – BrasilDat.

No Capítulo 2 serão descritos, de maneira sucinta, os processos envolvidos no desenvolvimento de um relâmpago nuvem-solo negativo. No Capítulo 3, as características específicas de cada um desses processos serão revisadas segundo a abordagem da teoria “clássica”. O termo teoria “clássica” é utilizado nesse trabalho para caracterizar a maneira de interpretar fisicamente os processos que ocorrem num relâmpago desenvolvida a partir das idéias propostas pelos primeiros pesquisadores, como Schonland e Malan, no início do século vinte. Os mesmos processos serão novamente revisados no Capítulo 4 sob o enfoque da teoria do “líder bi-direcional”, introduzida por Heinz Kasemir em 1950, a qual implica em mudanças significativas no entendimento de como ocorrem alguns desses processos. No Capítulo 5 serão descritos os equipamentos utilizados durante as campanhas realizadas para obtenção dos registros dos eventos de relâmpagos, a partir dos quais foi extraída a base de dados na qual se apóia esse trabalho, sendo descrita, também nesse Capítulo, a metodologia empregada na análise desses dados. Será feita uma revisão, no Capítulo 6, dos estudos anteriores que apresentaram análises estatísticas referentes a uma ou mais características dos processos envolvidos na criação de

um novo caminho para o solo por uma descarga nuvem-solo negativa, comparando-as com as análises feitas neste trabalho. No Capítulo 7 é apresentada uma hipótese que busca explicar os processos físicos envolvidos quando, em um relâmpago nuvem-solo negativo, uma determinada descarga subsequente abandona o caminho percorrido pela(s) descarga(s) anterior(es) e cria um novo caminho em direção ao solo. A hipótese busca, também, explicar os casos em que, depois de uma descarga ter percorrido um novo canal, a seguinte retorna ao canal anterior ou “original”. É apresentado um estudo de caso, no Capítulo 8, de um relâmpago nuvem-solo negativo natural que suporta a hipótese proposta no capítulo anterior. Finalmente, o Capítulo 9 encerra com as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 O RELÂMPAGO NUVEM-SOLO NEGATIVO – UMA BREVE DESCRIÇÃO

Os relâmpagos nuvem-solo negativos são aqueles que, iniciados na nuvem, propagam-se na direção descendente e transportam carga negativa para o solo, respondendo por cerca de 90% das descargas que atingem a sua superfície (PINTO JR. e PINTO, 2000; RAKOV e UMAN, 2003). O relâmpago nuvem-solo negativo é um fenômeno bastante complexo sendo composto por vários processos, alguns dos quais envolvendo descargas internas à nuvem e outros envolvendo canais que emergem da nuvem. Os processos que ocorrem fora do volume da nuvem são, obviamente, visíveis, e podem ser registrados por equipamentos ópticos (câmeras fotográficas e filmadoras) permitindo, dessa maneira, a realização de estudos envolvendo a geometria do canal, a multiplicidade (número de descargas que ocorrem num mesmo relâmpago), a criação de novos canais, a determinação do número de pontos de impacto no solo e outras características relacionadas a esses canais. Os diversos processos que compõem um relâmpago também podem ser estudados tendo como base os registros das variações do campo elétrico ambiente efetuados no solo durante a ocorrência do mesmo. Inúmeros estudos sobre o fenômeno podem ser realizados, uma vez que a variação do campo ao longo de todo o evento tem um comportamento típico para cada etapa do relâmpago. Em outras palavras, os campos eletromagnéticos irradiados pelos diferentes processos de um relâmpago ou por diferentes tipos de relâmpagos possuem “assinaturas” distintas, mas dotadas de características comuns.

O desenho esquemático da Figura 2.1 mostra os sucessivos estágios do avanço na direção descendente e as ramificações do líder escalonado numa descarga nuvem-solo.

As variações do campo elétrico observadas imediatamente antes do início do líder entre a nuvem e o solo, são conhecidas como quebra da rigidez dielétrica preliminar ou inicial (*preliminary breakdown*). Esse processo inicial ocorre

internamente à nuvem e inicia ou propicia o processo seguinte, conhecido como líder escalonado (*stepped leader*)

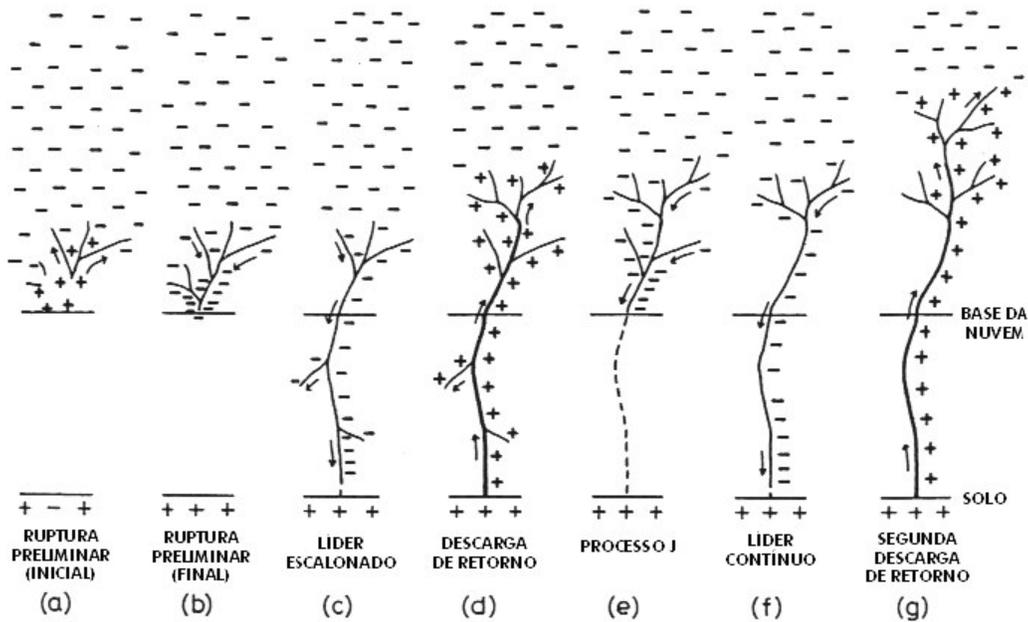


Figura 2.1 - Processos de uma descarga de retorno desde a ruptura preliminar (a) e (b) até a segunda descarga de retorno (g). O canal no interior da nuvem, a partir de (c), pode ser tanto horizontal quanto vertical. A figura encontra-se fora de escala.

Fonte: Adaptada de Ogawa (1995)

A tortuosidade característica do canal do relâmpago é devida ao progresso do líder escalonado procurando pelo caminho mais favorável. Depois de aproximadamente 20 ms, a propagação (com velocidade média de cerca de  $10^5$  m/s) traz a extremidade do líder escalonado para próximo do solo.

Quando a extremidade do líder escalonado alcança uma curta distância do solo (entre algumas dezenas e pouco mais que uma centena de metros), o campo elétrico no solo logo abaixo terá se tornado suficientemente alto para que outra descarga, denominada descarga conectante, inicie-se, em geral a partir de algum objeto pontiagudo (edifícios altos, árvores, captadores de sistemas de

proteção contra descargas atmosféricas). Ao encontrar a extremidade do líder escalonado a descarga conectante gera uma nova descarga que se propaga na direção ascendente através do canal ionizado (condutivo) já produzido. Esta é, agora, uma descarga muito mais forte, transportando uma corrente de pico da ordem de 30 kA, propagando-se a velocidades da ordem de  $10^7 - 10^8$  m/s e fortemente luminosa. Ela alcança a nuvem em cerca de 50-100  $\mu$ s. Esse processo do relâmpago é denominado descarga de retorno (*return stroke*), descarga principal ou primeira descarga do relâmpago.

Na Figura 2.2 uma seqüência de imagens mostra a propagação do líder escalonado em direção ao solo. No penúltimo quadro é mostrado o instante em que um dos ramos do líder escalonado toca o solo e a descarga de retorno inicia sua propagação ascendente em direção ao centro de carga na nuvem. O último quadro é inundado pela intensa luminosidade resultante da descarga de retorno.

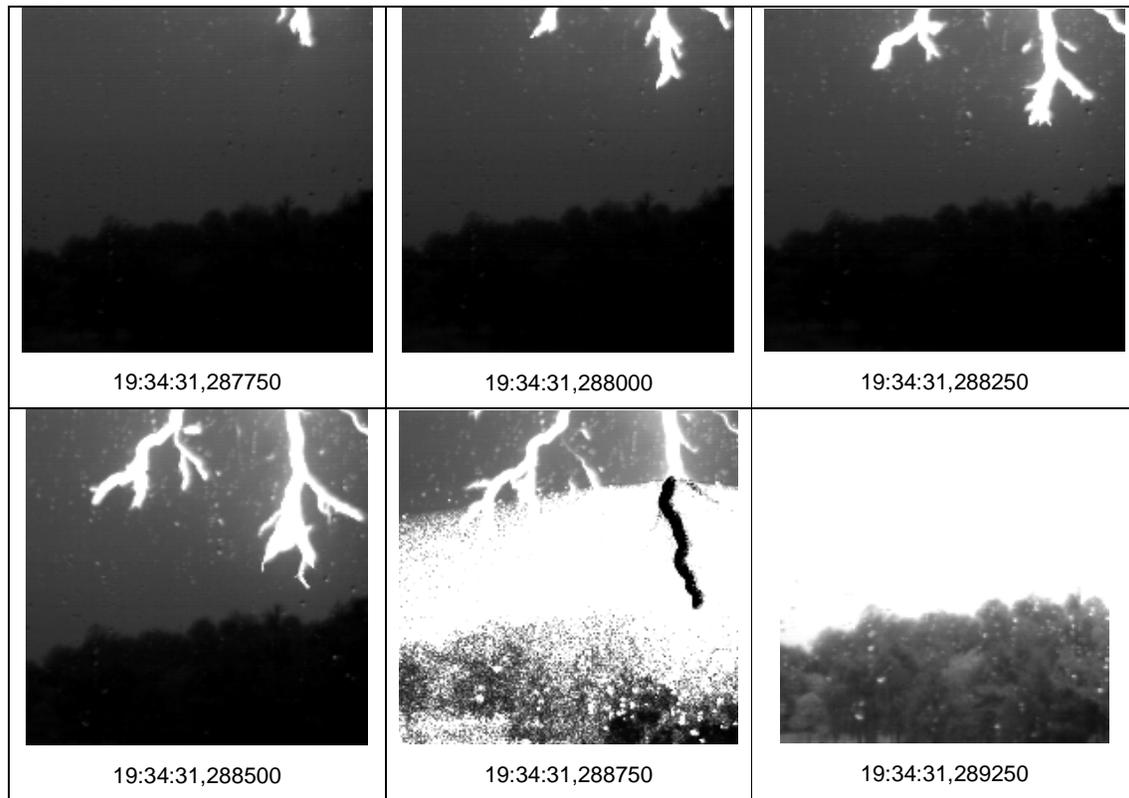


Figura 2.2 – Seqüência de imagens mostrando, nos primeiros quatro quadros, a propagação de um líder escalonado em direção ao solo. No quinto quadro a descarga de retorno iniciando a sua propagação ascendente em direção à nuvem, com a imagem mostrando uma faixa com luminosidade muito intensa gerada por ela e, no último quadro, o céu completamente inundado pela luminosidade da descarga de retorno. Relâmpago nuvem-solo negativo registrado em 15/12/2006 a 19 km de distância em São José dos Campos - SP.

O relâmpago pode terminar com a descarga principal, sendo então chamado de relâmpago de descarga simples ou única. Porém, o caso mais freqüente é o de um relâmpago com múltiplas descargas. Nesse caso, algumas dezenas de milissegundos depois da descarga principal uma nova descarga é produzida da nuvem para o solo, conforme mostra a Figura 2.3.



chamado por não apresentar ramificações como o líder escalonado, é seguido por uma segunda descarga de retorno da mesma maneira como ocorreu com o líder escalonado. Essa seqüência completa – intervalo de umas poucas dezenas de milissegundos, líder contínuo, descarga de retorno – repete-se por um número variável de vezes, usualmente umas poucas vezes mas podendo chegar a 20 vezes, depois das quais o canal ionizado decai e o relâmpago termina.

Os dois primeiros quadros Figura 2.4 correspondem aos últimos dois da Figura 2.2. O terceiro quadro mostra o canal da primeira descarga de retorno depois que a intensidade do brilho causado pelo pico de corrente da descarga diminuiu. Os quadros seguintes mostram a propagação de um líder contínuo, após um intervalo de dezenas de milissegundos cujas imagens foram omitidas, seguindo o mesmo caminho para o solo da descarga anterior. Os dois últimos quadros da Figura 2.4 mostram a segunda descarga de retorno do relâmpago iluminando o canal criado pela descarga anterior.

Algumas vezes a descarga de retorno é seguida por uma corrente contínua (~ 100 A a 1000 A) por um período de umas poucas dezenas a centenas de milissegundos. Isso ocorre depois de uma ou várias descargas, em cerca de metade dos relâmpagos (PINTO JR. e PINTO, 2000).

Algumas vezes, durante a ocorrência de corrente contínua (portanto entre as descargas de retorno), ocorre um aumento da luminosidade do canal por cerca de 1 ms, como conseqüência de um momentâneo aumento de corrente, o que caracteriza um processo denominado de componente ou processo M.

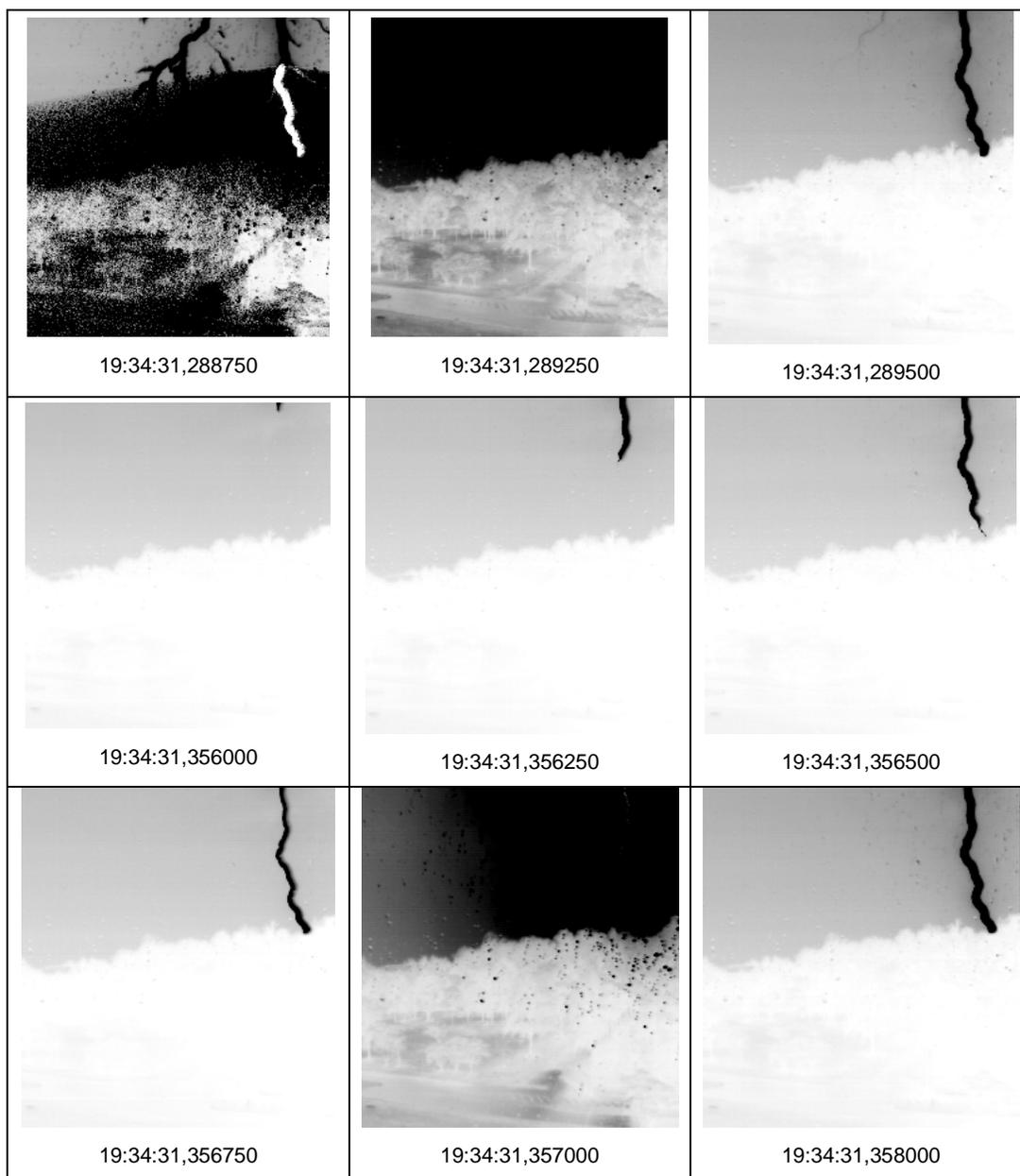


Figura 2.4 – Seqüência de imagens mostrando a primeira descarga de retorno (a mesma da Figura 2.2), a propagação do líder contínuo em direção ao solo e a segunda descarga de retorno. Relâmpago nuvem-solo negativo registrado em 15/12/2006 a 19 km de distância em São José dos Campos - SP.



### **3 PROCESSOS DE UM RELÂMPAGO NUVEM-SOLO NEGATIVO**

#### **3.1 Introdução**

Será feita, a seguir, uma revisão mais detalhada das características dos vários processos envolvidos no desenvolvimento de um relâmpago nuvem-solo negativo descritos no capítulo anterior. Neste capítulo a revisão seguirá uma determinada maneira de interpretar fisicamente os processos que compõem o relâmpago, desenvolvida a partir das idéias propostas pelos primeiros pesquisadores como Schonland, Malan e outros no início do século vinte, e que é encontrada na literatura até os dias de hoje. Essa maneira de interpretar fisicamente os processos do relâmpago será referida no restante desse trabalho como a teoria “clássica”.

Durante o transcorrer de aproximadamente um século de pesquisa ao redor do mundo, diversos pesquisadores, dando seqüência às idéias propostas por seus antecessores, foram dando corpo a uma teoria (aqui denominada de clássica) capaz de identificar cada uma das etapas do desenvolvimento de um relâmpago e descrever, com bastantes detalhes, a maioria delas. Um exemplo disso, como já foi mencionado no Capítulo 2, é a identificação de uma “assinatura” típica do campo elétrico irradiado pelo relâmpago para cada uma dessas etapas.

Porém, a teoria clássica ou não explica claramente ou não há concordância entre as possíveis explicações existentes sobre como determinados processos que compõem o relâmpago ocorrem ou como estão relacionados entre si. São exemplos de que não há plena concordância sobre as explicações de determinados processos: a iniciação do relâmpago; a fonte de carga que alimenta as descargas subseqüentes; os processos conhecidos como variações J e K; a componente M e a criação de novos canais.

No próximo capítulo esses mesmos processos serão novamente abordados sob o ponto de vista de uma teoria relativamente mais recente, a teoria do líder bi-direcional.

### **3.2. Quebra da rigidez inicial**

Na literatura, conforme já mencionado, de acordo com a teoria clássica, não há plena concordância sobre o processo, ou processos, envolvido no disparo do líder escalonado. Esse processo é denominado genericamente de quebra da rigidez dielétrica preliminar ou inicial (*preliminary breakdown* ou *initial breakdown*) e está associado a valores de campo elétrico particularmente altos em certas regiões da nuvem. Uma vez iniciada, a descarga propaga-se por um processo chamado de avalanche de elétrons. A descarga é iniciada por um processo de ionização que produz íons positivos e elétrons. Ambos os tipos de partículas irão se mover por ação do campo elétrico. No entanto, elétrons têm mobilidade muito maior que os íons, de modo que os últimos podem ser considerados como essencialmente imobilizados. As partículas carregadas, viajando ao longo do campo, adquirem uma energia cinética igual a sua carga vezes a variação temporal do potencial. Assim, os elétrons movendo-se na direção descendente no líder, aceleram-se e tornam-se capazes de ionizar, por colisão, um certo número de outros átomos ou moléculas. Com cada um dos novos elétrons produzidos o processo é repetido, resultando que o número de elétrons aumenta exponencialmente; a esse efeito dá-se o nome de avalanche eletrônica. O número aumentado de íons positivos criados como resultado da avalanche cria uma carga positiva que se opõe ao campo propelente pré-existente e previne a avalanche de crescer indefinidamente (IRIBARNE e CHO, 1980).

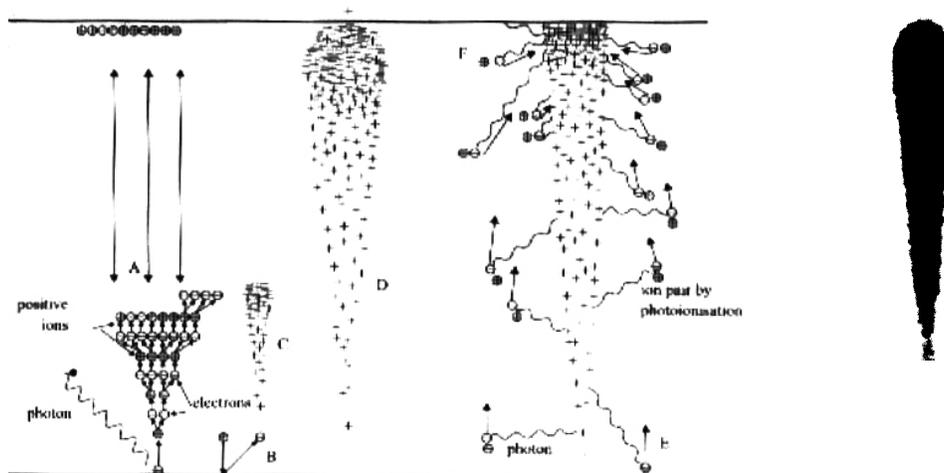


Figura 3.1 – Diagrama esquemático mostrando o desenvolvimento de uma avalanche de elétrons. A figura á esquerda mostra a avalanche sendo iniciada por um fóton externo em (A) ou devido à colisão de um íon positivo com o catodo em (B). (C) e (D) mostram a propagação da avalanche. À direita é mostrada uma imagem feita em laboratório de uma avalanche de elétrons.

Fonte: Adaptada de Cooray (2003)

A Figura 3.2, a seguir, ilustra as variações do campo elétrico associadas com a quebra da rigidez preliminar sugeridas por Clarence e Malan (1957) a partir de seus registros de relâmpagos ocorridos na África do Sul.

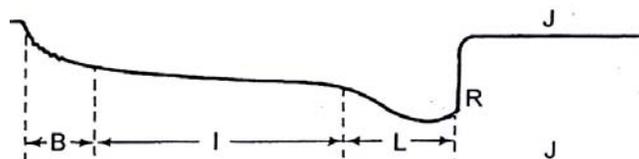


Figura 3.2 - Exemplos de formas de onda de campo elétrico do tipo usado por Clarence e Malan [1957] para introduzir a assim chamada estrutura BIL do campo elétrico anterior à primeira descarga de retorno (ver texto à pág. 44).

Fonte: Adaptada de Beasley et al. (1982)

Os autores sugeriram, com base na forma de onda típica mostrada na Figura 3.2, que a quebra da rigidez inicial (identificada por B, na Figura 3.2) é uma descarga vertical, com uma duração típica entre 2 a 10 ms, entre o centro principal de carga negativa e o pequeno centro de carga positiva localizado mais abaixo, próximo à base da nuvem. A quebra da rigidez inicial seria seguida pelo líder escalonado (identificado por L, na Figura 3.2) logo depois do “estágio intermediário” (identificado por I, na Figura 3.2) o qual tem uma duração superior a 400 ms. Ainda de acordo com Clarence e Malan (1957), o estágio intermediário seria devido ao carregamento negativo do canal, originado pela quebra da rigidez inicial, até que o campo, na extremidade inferior do mesmo fosse alto o suficiente para lançar o líder escalonado que, com a sua chegada ao solo, daria início à descarga de retorno (identificada por R, na Figura 3.2).

Estudos posteriores não confirmaram o cenário sugerido por Clarence e Malan (1957), mas sim sugeriram que a quebra da rigidez inicial poderia ser vista como uma seqüência de canais estendendo-se em direções aparentemente randômicas a partir da fonte de carga na nuvem.

Beasley et al. (1982) não identificaram variações do campo elétrico que caracterizassem o início do processo que antecede ao líder escalonado, chamado por eles de “variações preliminares” ou “quebra da rigidez preliminar”, mas apontaram como variações do campo características da transição entre o processo de quebra da rigidez preliminar e o processo do líder escalonado, o que eles chamaram de “pulsos característicos”. A Figura 3.3, a seguir, mostra os pulsos característicos como final do processo da quebra da rigidez e início do líder escalonado.

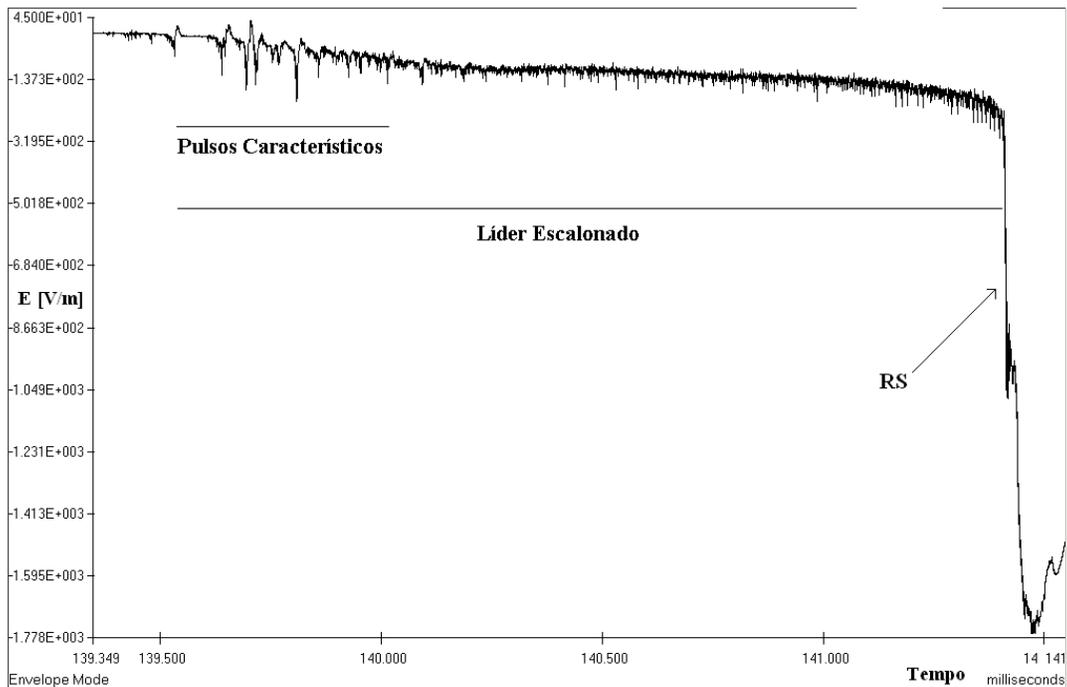


Figura 3.3 – Variação do campo elétrico do líder escalonado precedendo uma descarga de retorno de um relâmpago nuvem-solo negativo registrado em 23/3/2005, a 26 km de distância em São José dos Campos - SP. Os pulsos característicos que antecedem o líder escalonado ocorrem aproximadamente 2 ms antes da descarga de retorno.

Os pulsos característicos são tipicamente bipolares com excursão inicial na mesma direção da variação de campo da descarga de retorno seguinte. Beasley et al. (1982) observaram que os pulsos característicos têm, tipicamente, uma largura total entre 20 a 100  $\mu\text{s}$  e ocorrem em intervalos de 30 a 200  $\mu\text{s}$ .

Rakov e Uman (2003) citam que vários autores (KITAGAWA, 1957; CLARENCE e MALAN, 1957; KITAGAWA e KOBAYASHI, 1959; KITAGAWA e BROOK, 1960; KRIDER e RADDI, 1975 e BEASLEY et al., 1982) observaram que um trem de pulsos bipolares, com duração da ordem de 1 ms, pode preceder o processo do líder escalonado. O intervalo entre o trem de pulsos e a

descarga de retorno é, usualmente, de diversos milissegundos ou mais e amplitude comparável à da primeira descarga de retorno ou descarga de retorno principal. No entanto, em alguns registros de campo elétrico os pulsos da quebra de rigidez inicial podem não ser detectáveis ou ter amplitude negligenciável quando comparada à da descarga de retorno seguinte. A Figura 3.4 mostra um exemplo de pulsos de quebra da rigidez preliminar (*Preliminary Breakdown* – PB) para um relâmpago nuvem-solo negativo ocorrido no verão de 2005 em São José dos Campos, SP.

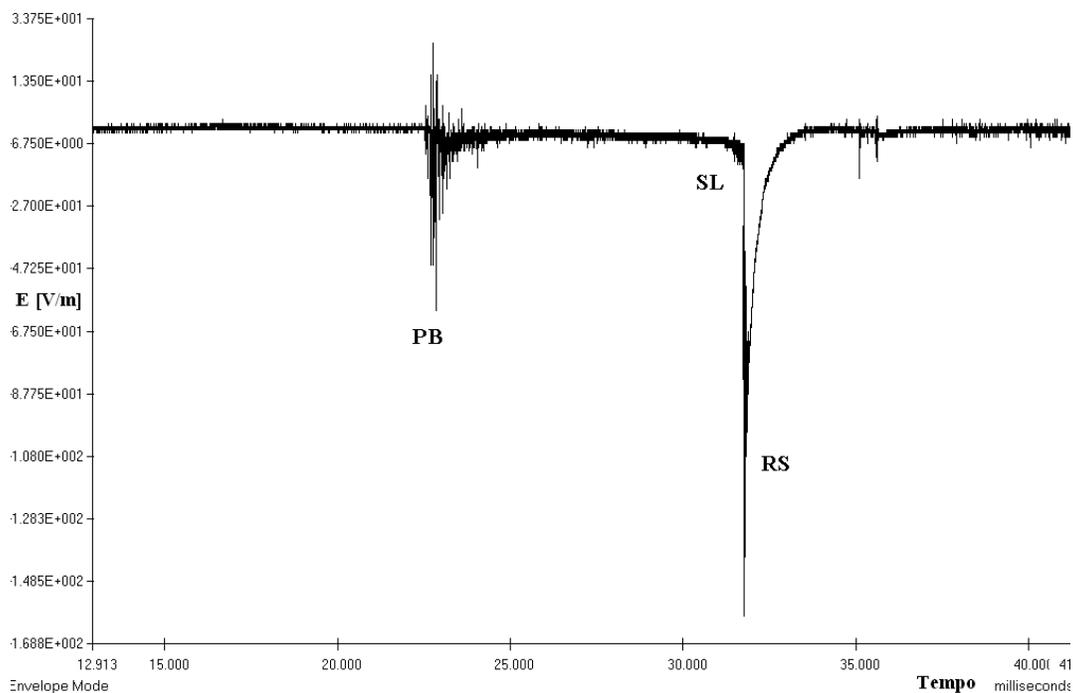


Figura 3.4 - Exemplo de variação do campo elétrico devido à quebra de rigidez preliminar (PB – *Preliminary Breakdown*) antecedendo o líder escalonado (SL – *Stepped Leader*) e a primeira descarga de retorno (RS – *Return Stroke*) de um relâmpago nuvem-solo negativo registrado no verão de 2005 a 19,5 km de distância em São José dos Campos - SP.

Rakov e Uman (2003) observaram que o número médio de pulsos por trem é dez, com um tempo de subida da onda, por pulso, de tipicamente 10  $\mu$ s.

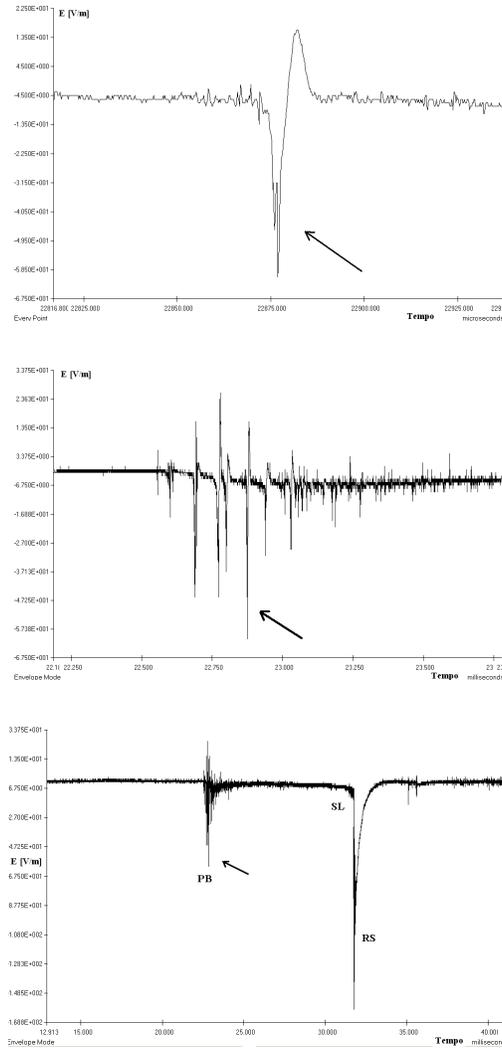


Figura 3.5 - Campo elétrico radiado por relâmpago nuvem-solo negativo a cerca de 19,5 km de distância. O mesmo evento é mostrado em escalas de tempo de 5 ms (gráfico inferior), 250  $\mu$ s (gráfico do meio) e 25  $\mu$ s (gráfico superior) por divisão.

A Figura 3.5 mostra os pulsos de quebra de rigidez do mesmo relâmpago mostrado na Figura 3.4 anterior, em três escalas de tempo diferentes,

ampliando-se a escala de tempo de baixo para cima, de modo a dar ênfase ao ponto do registro do campo elétrico onde aparecem os pulsos característicos da quebra da rigidez preliminar.

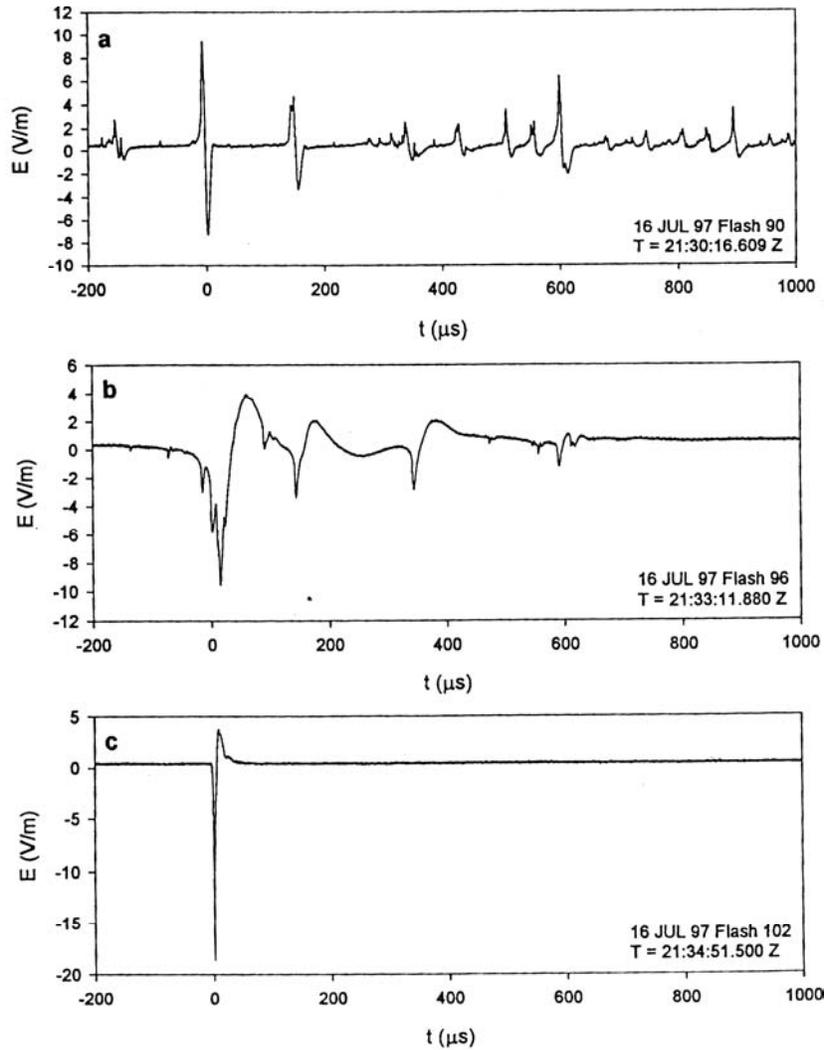


Figura 3.6 - Exemplos de formas de onda de pulsos gerados da: (a) quebra de rigidez inicial em relâmpagos nuvem-solo negativos, (b) quebra de rigidez inicial em relâmpago intra-nuvem e (c) pulso isolado presumivelmente não relacionado a nenhum processo conhecido de descarga de relâmpago. As formas de onda foram registradas, de uma tempestade distante, em *Camp Blanding*, Flórida.

Fonte: Adaptada de Rakov et al. (1999)

Rakov e Uman (2003) fazem notar, também, que os pulsos da quebra da rigidez preliminar diferem dos pulsos característicos do processo do líder escalonado, que serão abordados logo a seguir, nos seguintes aspectos: (a) na forma de onda de modo geral, sendo os primeiros bipolares enquanto os últimos são, essencialmente, unipolares; (b) a duração total dos primeiros sendo 20 a 40  $\mu\text{s}$  contra 1 a 2  $\mu\text{s}$  para os últimos e (c) o intervalo entre pulsos de 70 a 130  $\mu\text{s}$  para os primeiros contra 15 a 25  $\mu\text{s}$  para os últimos.

### **3.3. Líder escalonado**

Nos estudos iniciais, as variedades de formas de onda dos líderes escalonados foram agrupadas por Schonland (1938) em duas grandes categorias. A primeira agrupava a maioria dos líderes fotografados (entre 55% e 70%), os denominados líderes do tipo “ $\alpha$ ”. Os líderes desse tipo são caracterizados por uma velocidade uniforme na direção descendente, da ordem de  $10^5$  m/s e passos que não variam apreciavelmente em comprimento e brilho. A outra categoria agrupa os líderes denominados do tipo “ $\beta$ ” cujos passos são mais longos e mais brilhantes que os do tipo “ $\alpha$ ”. Além disso, os líderes do tipo “ $\beta$ ” parecem ter dois estágios em seu desenvolvimento. Eles começam abaixo da base da nuvem, ou esporadicamente emergem da lateral da mesma, com passos longos e brilhantes e alta velocidade, da ordem de  $10^6$  m/s, exibindo ramificações extensas próximas à base da nuvem. Quando um líder tipo “ $\beta$ ” se aproxima do solo ele assume as características de um líder do tipo “ $\alpha$ ”, isto é, ele exibe uma velocidade mais baixa de propagação e passos mais curtos e menos luminosos.

As características dos líderes escalonados apresentadas a seguir se referem aos pulsos que ocorrem dentro de mais ou menos um milissegundo antes da descarga de retorno. Nesse instante, o líder encontra-se, aproximadamente, entre 100 e 300 m acima do solo. Vale notar que, nessa altura, conforme

observado acima, não existem diferenças entre os líderes do tipo “ $\alpha$ ” e do tipo “ $\beta$ ”.

Conforme mencionado anteriormente, o trem de “pulsos característicos”, associado à transição entre a quebra da rigidez preliminar e o processo do líder escalonado, tem uma duração de uns poucos milissegundos. Na seqüência, durante um intervalo de alguns milissegundos a algumas dezenas de milissegundos, a atividade de pulsos torna-se relativamente baixa e irregular. Depois desse intervalo outro trem de pulsos, imediatamente anterior à primeira descarga de retorno e a algumas descargas de retorno subseqüentes, ocorre. Esse último trem de pulsos tem duração de algumas dezenas a algumas centenas de microssegundos e está associado no primeiro caso com o processo do líder escalonado e no último caso com o processo do líder contínuo (RAKOV, 1999). A amplitude do pulso é uma ou duas ordens de magnitude menor que a amplitude do pulso da descarga de retorno correspondente. Os pulsos do líder escalonado (*Stepped Leader - SL*) são vistos imediatamente antes do pulso da descarga de retorno na Figura 3.7a e os do líder contínuo na Figura 3.7b.

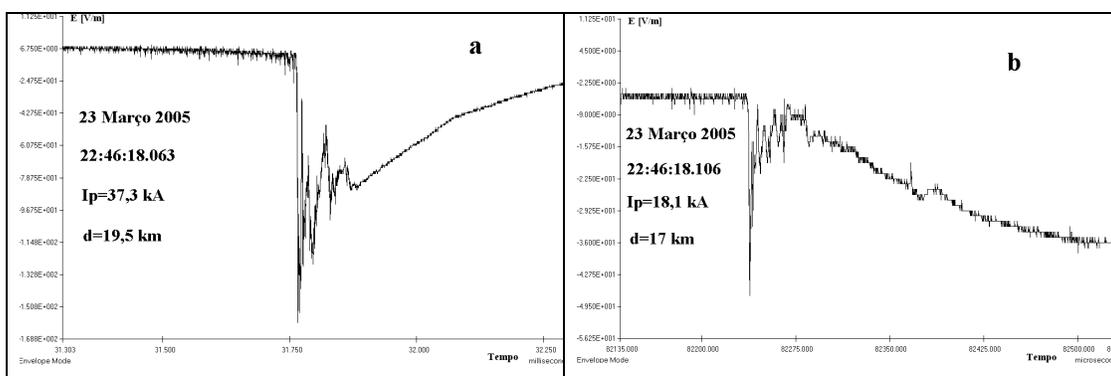


Figura 3.7 - Exemplos de formas de onda de pulsos de campo elétrico para (a) primeira descarga negativa e (b) descarga negativa subseqüente. As características das descargas detectadas pela BrasilDat são informadas no gráfico.

Um exemplo de registro, obtido por uma “antena lenta”, da variação do campo elétrico produzido por um líder escalonado junto com a variação do campo elétrico da correspondente descarga de retorno em função do tempo é apresentado na Figura 3.8 a seguir.

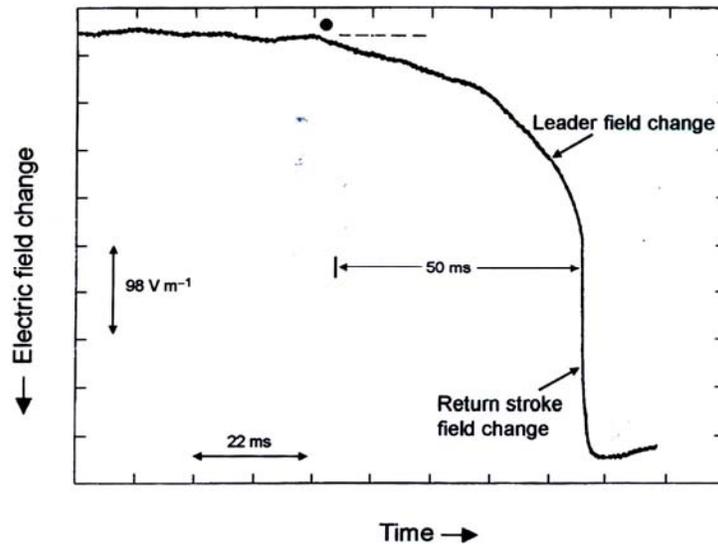


Figura 3.8 - Variação do campo elétrico para a primeira descarga de retorno de um relâmpago ocorrido em 1979 em *Tampa* na *Flórida*, a uma distância de aproximadamente 12 km. Um pequeno círculo sólido marca o ponto de início da variação de campo do líder. O intervalo de tempo indicado de 50 ms mostra a duração da variação de campo do líder.

Fonte: Adaptada de Rakov e Uman. (2003)

A Figura 3.9, a seguir, mostra a variação do campo elétrico para a primeira descarga de retorno de quatro relâmpagos negativos diferentes. Para cada relâmpago são mostradas as variações do campo elétrico em duas escalas de tempo diferentes - 8  $\mu\text{s}$  por divisão (gráfico superior) e 40  $\mu\text{s}$  por divisão (gráfico inferior), os dois gráficos sendo invertidos um em relação ao outro - , sendo que a forma de onda mostrada no gráfico superior dá ênfase, por mostrar numa escala expandida, aos pulsos finais do líder escalonado. Note

que as transições abruptas das descargas de retorno, identificadas por R, são precedidas por pequenos pulsos característicos dos passos do líder, cada um identificado por L. A escala vertical é mostrada à esquerda (ela é reduzida por uma fator de 2 para o gráfico superior de 8 us por divisão na figura (d)). Também vale a pena notar nessa figura que o pico do pulso aumenta à medida que o líder se aproxima do solo; esse comportamento foi observado desde os primeiros estudos sobre os líderes escalonados. O último pulso do líder escalonado é geralmente o maior, e seu pico, em média, é cerca de 10% do pico do pulso da descarga de retorno (RAKOV e UMAN, 2003).

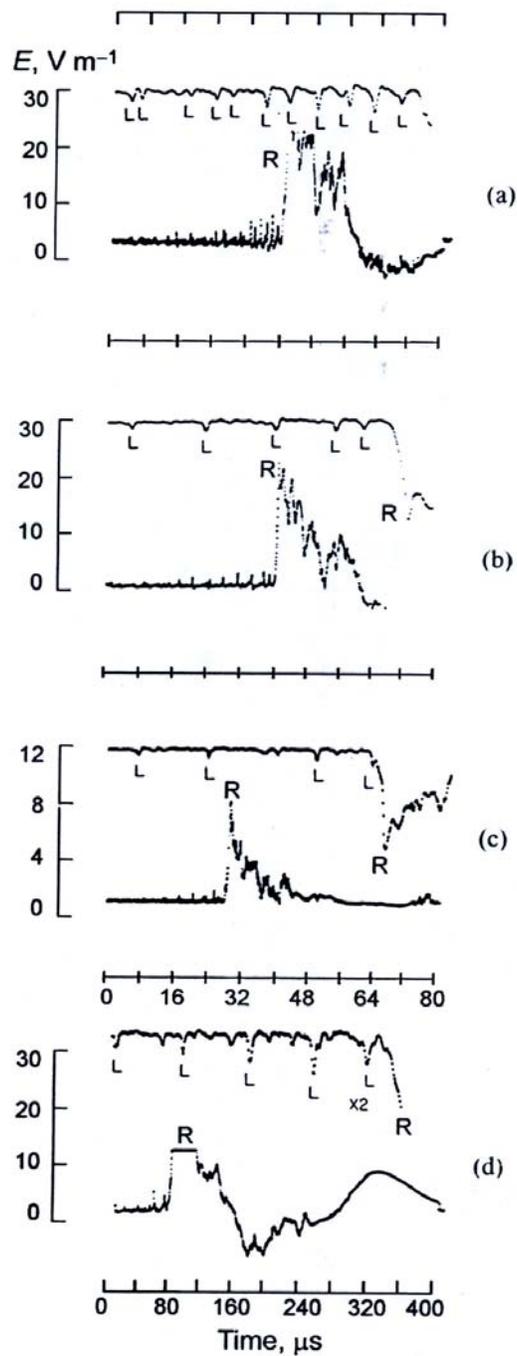


Figura 3.9 - Formas de onda do campo elétrico produzidas por quatro primeiras descargas de retorno negativas na Flórida a distâncias de algumas dezenas de quilômetros

Fonte: Adaptada de Rakov and Uman (2003)

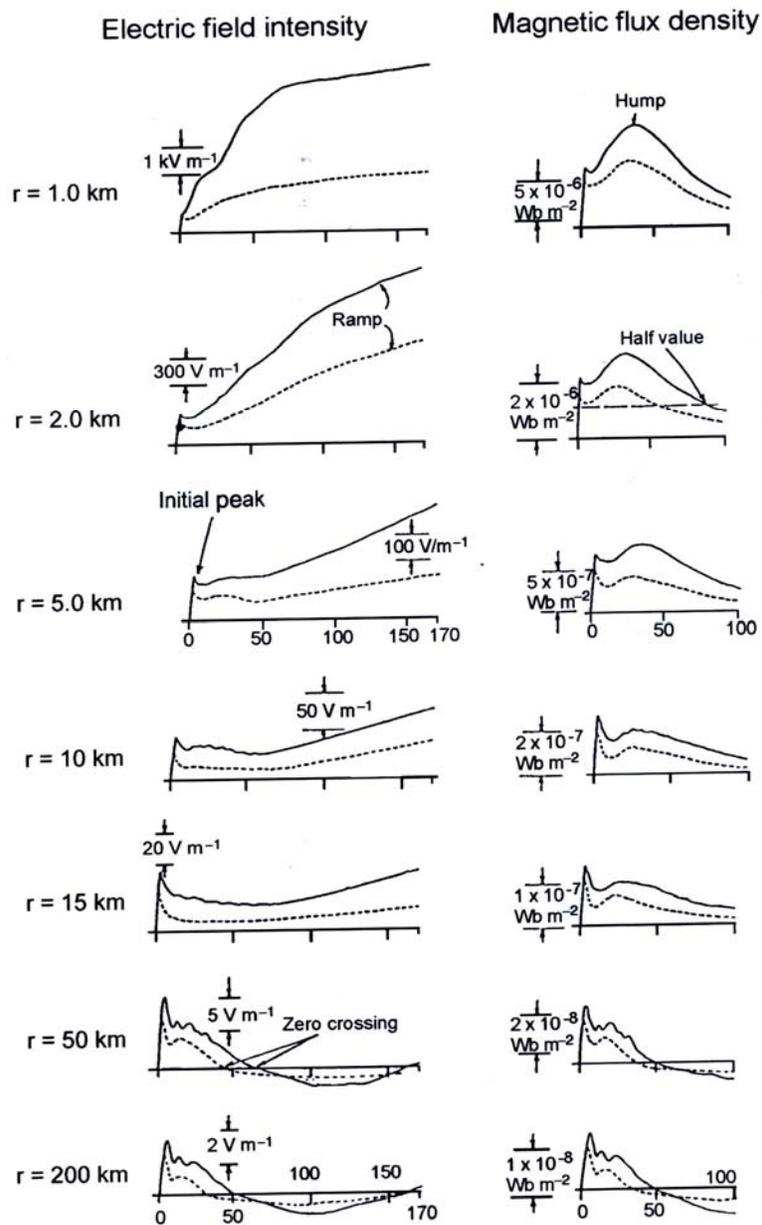


Figura 3.10 - Formas de onda típicas da intensidade do campo elétrico vertical (coluna da esquerda) e da densidade do fluxo magnético azimuthal (coluna da direita) para a primeira (linha contínua) e subsequente (linha tracejada) descarga de retorno à distância de 1, 2, 5, 10, 15, 50 e 200 km. As escalas de tempo mostradas, como referência, nos terceiros diagramas e nos diagramas do fundo estão em  $\mu\text{s}$ .

Fonte: Adaptada de Rakov e Uman (2003)

### 3.4. Descarga de retorno

A Figura 3.10 reproduz as formas de onda típicas do campo elétrico vertical e do campo magnético horizontal, medidos a distâncias variando de 1 a 200 km na Flórida, para ambas, primeira e subsequente descargas de retorno.

Os campos elétricos das descargas observadas dentro de poucos quilômetros do relâmpago, mostradas na coluna esquerda da Figura 3.10 anterior, são dominados, depois das primeiras poucas dezenas de microssegundos, pela componente eletrostática do campo elétrico total, a única componente do campo elétrico que é não-nula depois que a corrente da descarga cessa de fluir. Os campos magnéticos próximos, nos mesmos instantes, são dominados pela componente magnetostática do campo magnético total, a componente que produz a elevação (corcova) no campo magnético vista na coluna direita da Figura 3.10 anterior. Os campos elétrico e magnético têm essencialmente idênticas formas de onda para grandes distâncias e são usualmente bipolares, como ilustrado na Figura 3.10. Lin et al. (1979) sugerem que a uma distância de 50 km ou mais, ambas as formas de onda dos campos elétrico e magnético são dominadas por suas respectivas componentes de radiação.

A característica dominante nas formas de onda da Figura 3.10 anterior é o evidente pico das formas de onda dos campos elétrico e magnético além de aproximadamente 10 km. Esse pico inicial também é uma característica significativa das formas de onda de descargas entre uns poucos quilômetros e cerca de 10 km, e pode ser identificado, com algum esforço, em formas de onda de descargas que ocorrem tão próximas quanto um quilometro. O pico inicial de campo é devido à componente de radiação do campo total e, portanto, decresce inversamente com a distância na ausência de significantes efeitos de propagação. Os picos de campo produzidos por diferentes descargas de retorno a distâncias conhecidas podem ser normalizados, para

efeito de comparação, pela distância, por exemplo, de 100 km multiplicando-se o pico de campo medido por  $r/10^5$ , onde  $r$  é a distância em metros. Depois de normalizado para 100 km, foi encontrado, segundo Rakov e Uman (2003), em geral, um valor médio para o pico inicial do campo elétrico na faixa de 6-8 V/m para a primeira descarga de retorno e na faixa de 3-6 V/m para as descargas subseqüentes. Rakov e Uman (2003) informam, a partir de estudos detalhados da estrutura de relâmpagos ocorridos na Flórida, que cerca de um terço dos relâmpagos com múltiplas descargas têm pelo menos uma descarga subseqüente que possui campo elétrico maior que a primeira descarga de retorno. Segundo observação de Thottappillil et al. (1992), nenhuma descarga subseqüente com pico de campo excedendo o da primeira descarga de retorno tem um intervalo de tempo precedente menor que 35 ms.

Detalhes do crescimento até o pico do campo da descarga de retorno e a estrutura detalhada depois do pico inicial são mostrados na Figura 3.11 a seguir. Note que também são mostrados nessa figura os pulsos do líder escalonado e do líder contínuo-escalonado (ver definição no subitem 3.5) que ocorrem antes do pulso da descarga de retorno. Pode ser observado na Figura 3.11 que as formas de onda do campo da primeira descarga de retorno têm uma “frente lenta” (*slow front*), abaixo da linha pontilhada e rotulada F, que cresce em poucos microssegundos alcançando uma considerável fração do valor total pico do campo. Weidman e Krider (1978) encontraram uma duração média da frente lenta de cerca de 4  $\mu$ s com 40% a 50% do pico inicial do campo atribuído à frente lenta. Master et al. (1984) encontraram uma duração média da frente lenta de 2,9  $\mu$ s com cerca de 30% do pico inicial do campo sendo devido à ela e Cooray e Lundquist (1982) reportaram valores correspondentes de 5,0  $\mu$ s e 41% do pico inicial.

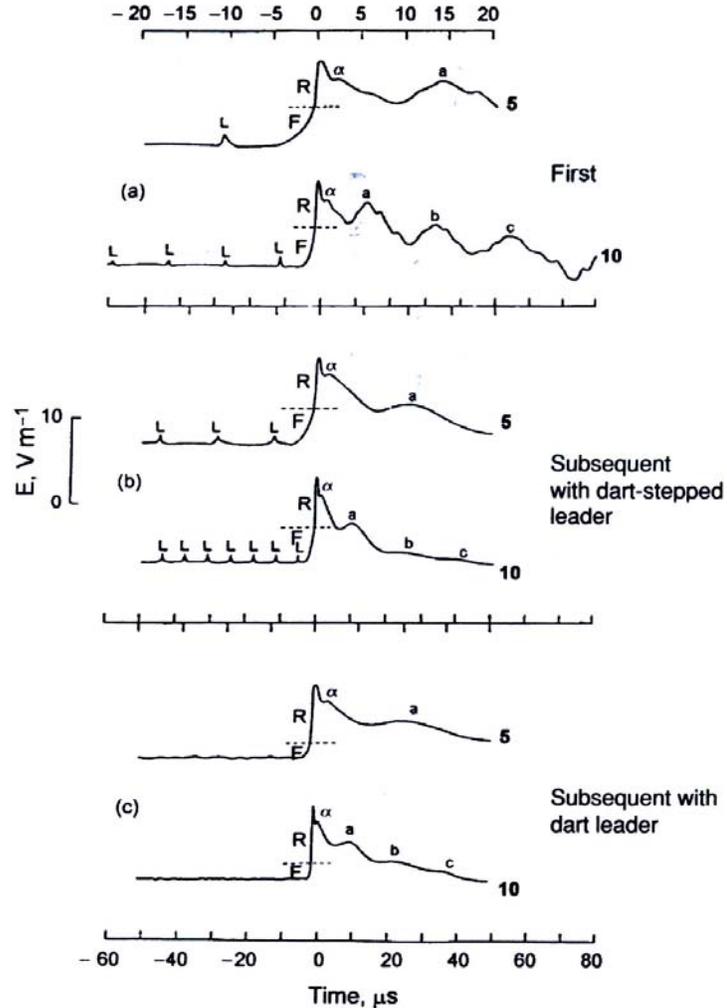


Figura 3.11 - Formas de onda do campo elétrico da (a) primeira descarga de retorno, (b) uma descarga de retorno subsequente iniciada por um líder contínuo-escalonado e (c) uma descarga de retorno subsequente iniciada por um líder contínuo, mostrando a estrutura detalhada do campo antes e depois do pico inicial. Cada forma de onda é mostrada em duas escalas de tempo, 5  $\mu s$  por divisão (rotulada 5) e 10  $\mu s$  por divisão (rotulada 10). Os campos são normalizados para uma distância de 100 km. L indica os pulsos individuais do líder, F a frente lenta e R a transição rápida. Também estão indicados por  $\alpha$  os pequenos picos secundários, ou “ombros”, e os picos subsidiários maiores a, b e c.  
 Fonte: Adaptada de Rakov e Uman (2003)

A frente lenta é seguida por uma “transição rápida” (*fast transition*) para o pico, rotulada R na Figura 3.11, com um tempo de subida, medido entre os pontos de 10% e 90% do valor máximo do pico, de cerca de 0,1  $\mu\text{s}$ , quando o caminho de propagação do campo é sobre a água salgada (RAKOV e UMAN, 2003). Como pode ser visto na Figura 3.11 os campos das descargas subseqüentes têm uma transição rápida similar àquelas das primeiras descargas de retorno, exceto que essas transições respondem pela maior parte da subida para o pico, enquanto que as frentes lentas são de mais curta duração do que para as primeiras descargas de retorno, tipicamente entre 0,5 e 1,0  $\mu\text{s}$ , respondendo por somente cerca de 20% da subida total para o pico.

### **3.5. Líder contínuo e contínuo-escalonado**

Descargas de retorno subseqüentes são usualmente inicializadas por líderes contínuos. O líder contínuo, diferentemente de um líder escalonado, parece mover-se continuamente durante toda a extensão do canal, da nuvem ao solo. Muitas descargas de retorno subseqüentes são inicializadas por líderes que exibem pronunciados passos na porção baixa do canal. Quando um líder subseqüente deflete do canal formado previamente, ele continua como um líder escalonado buscando um novo caminho em direção ao solo; mais de um terço dos líderes da segunda descarga apresentam esse comportamento (SABA et al., 2006a). Tais líderes produzem seqüências de pulsos regulares que são observadas imediatamente antes do pulso da descarga de retorno em registros distantes de campo elétrico ou magnético e são chamados líderes contínuo-escalonados.

A Figura 3.12, a seguir, mostra um exemplo de uma descarga subseqüente que seguiu um caminho diferente para o solo.

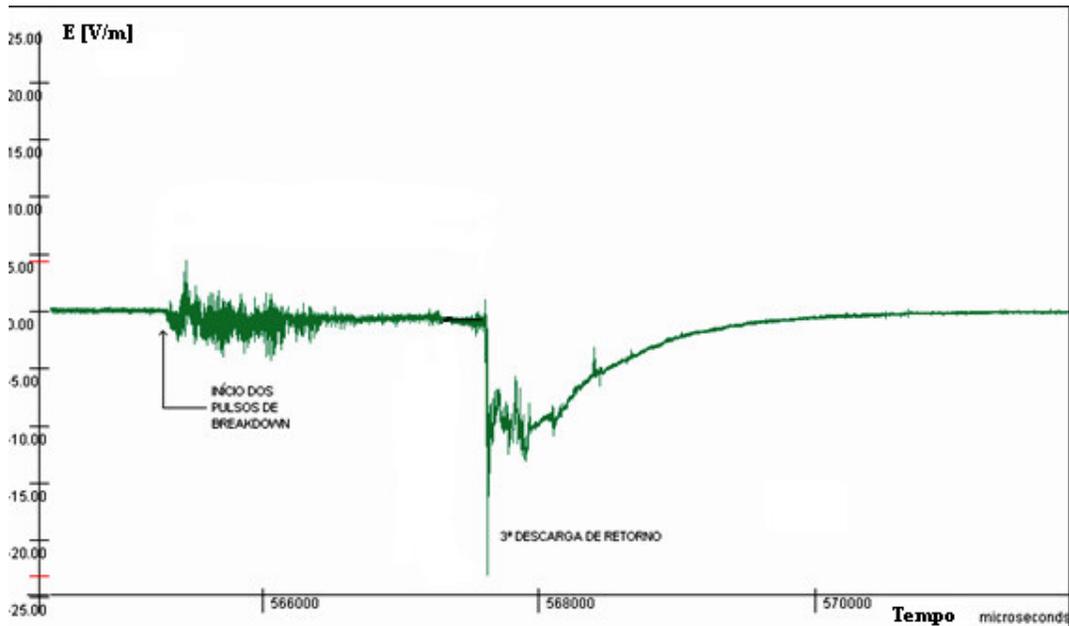


Figura 3.12 - Exemplo de variação do campo elétrico devido à quebra de rigidez antecedendo a terceira descarga de retorno que seguiu um novo caminho para o solo. Relâmpago nuvem-solo negativo registrado no verão de 2006/2007 a 20 km de distância em Uruguaiana - RS.

### 3.6. Processos J e K

O processo de “junção” ou processo J tem lugar na nuvem durante o intervalo de tempo entre descargas de retorno. É identificado por uma variação relativamente estável, constante, do campo elétrico numa escala de tempo de dezenas de milissegundos. O processo J tem polaridade igual à da variação do campo elétrico da descarga de retorno. A variação de campo relativa ao processo J é geralmente menor que a variação devido à corrente contínua (vide o item 3.7) e, diferentemente desta, não está associada com um canal luminoso entre a nuvem e o solo. Variações relativamente rápidas do campo elétrico, denominadas variações K, ocorrem entre descargas, geralmente em intervalos variando de alguns milissegundos a algumas dezenas de milissegundos e parecem ser superpostas às variações gerais de campo

elétrico associadas com os processos J. A variação do campo elétrico que se segue à última descarga (depois da corrente contínua, se houver) é provavelmente da mesma natureza que os processos J descritos acima e é conhecida como processo F (*Final process*).

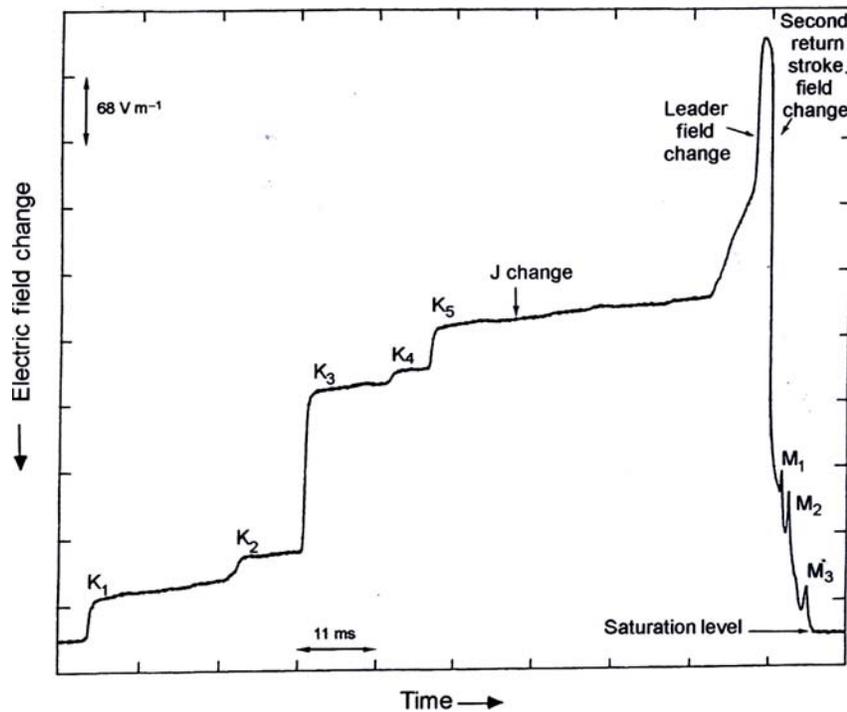


Figura 3.13 - Uma parte do registro do campo elétrico para um relâmpago que ocorreu na Flórida em 1979 a uma distância de 2,5 km. Estão indicadas cinco variações K pronunciadas ( $K_1$  a  $K_5$ ), a variação J, o líder, a descarga de retorno e três variações de campo devidas a componentes M ( $M_1$  a  $M_3$ ).  
 Fonte: Adaptada de Rakov e Uman (2003)

Segundo Rakov e Uman (2003), existe controvérsia e considerável confusão na literatura com relação à definição de um processo K. A definição considerada por esses autores como a menos ambígua é a que identifica o processo K, em relâmpagos para o solo, como as variações de campo do tipo degrau (ou tipo rampa) que ocorrem durante o intervalo entre descargas e depois da última descarga, tendo a mesma polaridade do processo J e um tempo de subida

para o intervalo entre 10% e 90% da frente de onda de 3 ms ou menos. Exemplos de tais processos K são vistos na Figura 3.13.

Rakov e Uman (2003) informam que não existem assinaturas de campo elétrico características, na escala de microssegundos, associadas com variações K. A maioria das variações K não contém pulsos pronunciados. Algumas vezes, pulsos na escala de microssegundos associados com variações K aparecem na forma de pulso “*burst*” regulares, conforme mostrado na Figura 3.14 a seguir.

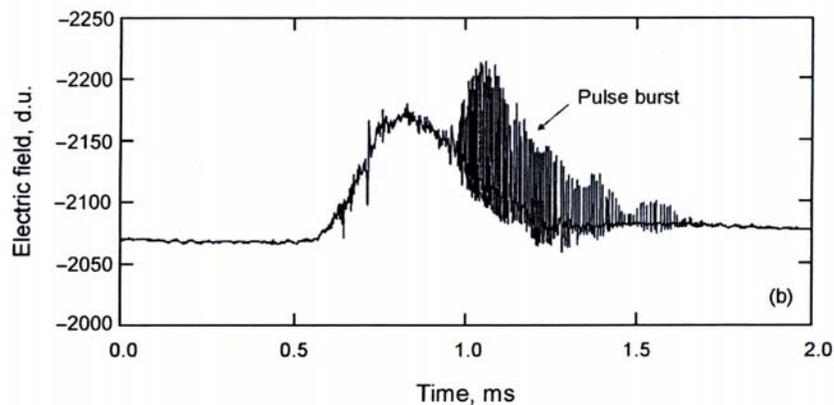


Figura 3.14 - Pulso regular tipo “*burst*”, na escala de microssegundos, associados com uma variação K em um relâmpago nuvem-solo. “d. u.” indica “*digitizer unit*”.

Fonte: Adaptada de Rakov e Uman (2003)

A Figura 3.15, a seguir, ilustra um modelo, sugerido por Proctor et al. (1988), dos processos que ocorrem nos intervalos entre as descargas no interior da nuvem. Pode ser inferido desse modelo, para um relâmpago nuvem-solo, que as variações rápidas de campo que ocorrem nos intervalos entre descargas têm origem, tipicamente, em descargas verticais, intermitentes, com duração menor que 100  $\mu$ s e com um intervalo entre descargas de uns poucos milissegundos. Elas são excessivamente ramificadas em ambas as direções, descendente e ascendente, e presumivelmente afunilam cargas negativas da

nuvem para a extremidade do canal no interior da mesma. Esse canal, aparentemente, estende-se horizontalmente para fora da região de cargas positivas introduzidas na nuvem pela descarga de retorno prévia. Essas descargas verticais intermitentes ocorrem em regiões da nuvem progressivamente mais distantes do início do canal do relâmpago pré-existente.

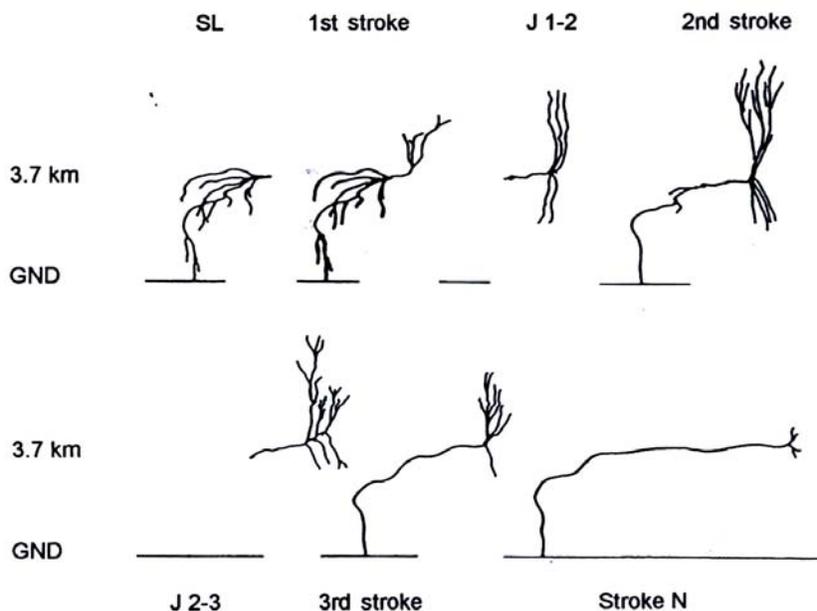


Figura 3.15 - Modelo conceitual de um relâmpago nuvem-solo baseado em imagens VHF do canal do relâmpago. SL indica o líder escalonado e J indica os processos entre descargas. O nível do solo (GND) está a 1,4 km acima do nível do mar.

Fonte: Adaptada de Proctor et al. (1988).

O processo K, aparentemente, serve para carregar o canal do relâmpago, que foi previamente desconectado eletricamente do solo, e estendê-lo, via quebra de rigidez, até as suas extremidades. Como resultado do processo K, frentes de onda viajam no canal e podem experimentar reflexões em várias discontinuidades, particularmente nos finais do canal. Se essa visão do processo K é correta, então se pode esperar uma grande variedade de assinaturas desse processo do relâmpago, como é aparentemente confirmado

pela variabilidade das formas de onda de campo elétrico na escala de milissegundos e pela falta de uma assinatura característica na escala de microssegundos.

Rakov e Uman (2003) informam que o processo K tem sido observado, em alguns casos, a partir de imagens em VHF bem como a partir de observações fotográficas, propagar para baixo em um canal de uma descarga de retorno prévia e, aparentemente, o processo pode alcançar o solo e produzir uma descarga de retorno. Além disso, Krehbiel (1989); Shao et al. (1995) e Mazur et al. (1995), encontraram que fontes de radiação VHF associadas com eventos K, durante intervalos entre descargas de relâmpagos nuvem-solo, comportam-se tal como líderes contínuos, exceto que os eventos K não se desenvolvem sempre para o solo. No Capítulo 4 será mostrado que a maior parte dos processos K, em um relâmpago para o solo, pode ser vista como “*attempted leaders*” subsequente ou como líderes subsequentes fracassados.

A descrição do processo K feita por Rakov e Uman (2003), bem como o modelo sugerido por Proctor et al. (1988) estão muito próximos da descrição feita por Mazur (2002), respectivamente, dos líderes de retorno e do desenvolvimento da árvore de dupla terminação, que serão abordados no Capítulo 4. Porém, tanto Rakov e Uman como Proctor não oferecem uma explicação a respeito de quais processos físicos estão envolvidos.

### **3.7. Corrente contínua**

A corrente contínua é usualmente definida como uma corrente de relativamente baixa intensidade (tipicamente dezenas a centenas de amperes) que segue o mesmo canal de uma descarga de retorno em direção ao solo e tem duração, tipicamente, de unidades a centenas de milissegundos. Essa corrente pode ser visualizada como um arco quase estacionário entre a fonte de carga na nuvem e o solo, ao longo do caminho criado pela seqüência ou seqüências

precedentes de líder-descarga-de-retorno. Perturbações relativamente curtas na corrente contínua, tipicamente durando alguns milissegundos, são chamadas componentes M (descritas no Capítulo 2 e detalhadas no item 3.8 a seguir). Devido às suas transferências de carga relativamente grandes, as correntes contínuas são responsáveis pela maior parte dos prejuízos associados com os efeitos térmicos, tais como buracos na fuselagem de aeronaves, cabos-guarda de linhas de transmissão fundidos e incêndios em florestas. Rakov e Uman (2003) informam que, de acordo com McEachron (1939, 1941), a maior parte da corrente contínua em sistemas elétricos com neutro aterrado pode fluir prontamente para terra através dos enrolamentos do transformador sem causar qualquer prejuízo, mas pode ter um considerável efeito na queima dos fusíveis usados para proteger transformadores de distribuição.

A maior parte das informações publicadas sobre corrente contínua em relâmpagos negativos, particularmente informações com respeito à ocorrência desse processo no relâmpago, diz respeito somente às correntes contínuas “longas”. Essas últimas foram definidas arbitrariamente por Kitagawa et al. (1952) como correntes cuja duração excede 40 ms. Esse critério foi escolhido, aparentemente, porque o intervalo entre descargas mais provável, reportado por Schonland (1956), era cerca de 40 ms. Kitagawa et al. (1962) e Brook et al. (1962), a partir de observações simultâneas de campo elétrico e fotografias no Novo México, identificaram a assinatura característica do campo elétrico da corrente contínua (rotulada variação de campo C no conjunto superior de registros da Figura 3.16) como sendo uma extensa e lenta variação do campo elétrico de mesma polaridade da descarga de retorno precedente.

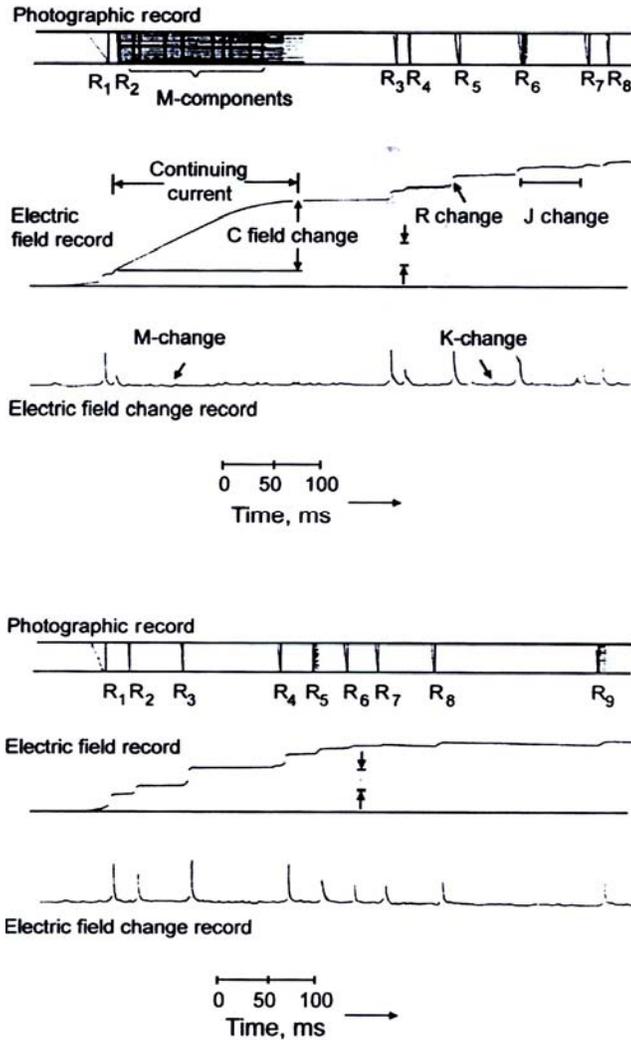


Figura 3.16 - Fotografia e medidas de campo elétrico de dois relâmpagos nuvem-solo de múltiplas descargas ocorrido no Novo México. Os três gráficos superiores são relacionados a um relâmpago com corrente contínua (20 km distante) e os três diagramas inferiores a um relâmpago sem corrente contínua (19 km distante). Dois registros de campo elétrico são mostrados para cada relâmpago. O gráfico central mostra o registro de campo obtido com uma antena lenta e o gráfico inferior o registro de campo obtido com uma antena rápida. O intervalo vertical em branco, indicado por setas em cada registro de campo elétrico, corresponde a 1 V/cm.

Fonte: Adaptada de Rakov e Uman (2003)

Essa assinatura característica tem permitido inferir a existência da corrente contínua a partir de registros de campo elétrico de uma única estação. Um exemplo da variação do campo elétrico de um relâmpago com quatro descargas é dado na Figura 3.17 a seguir.

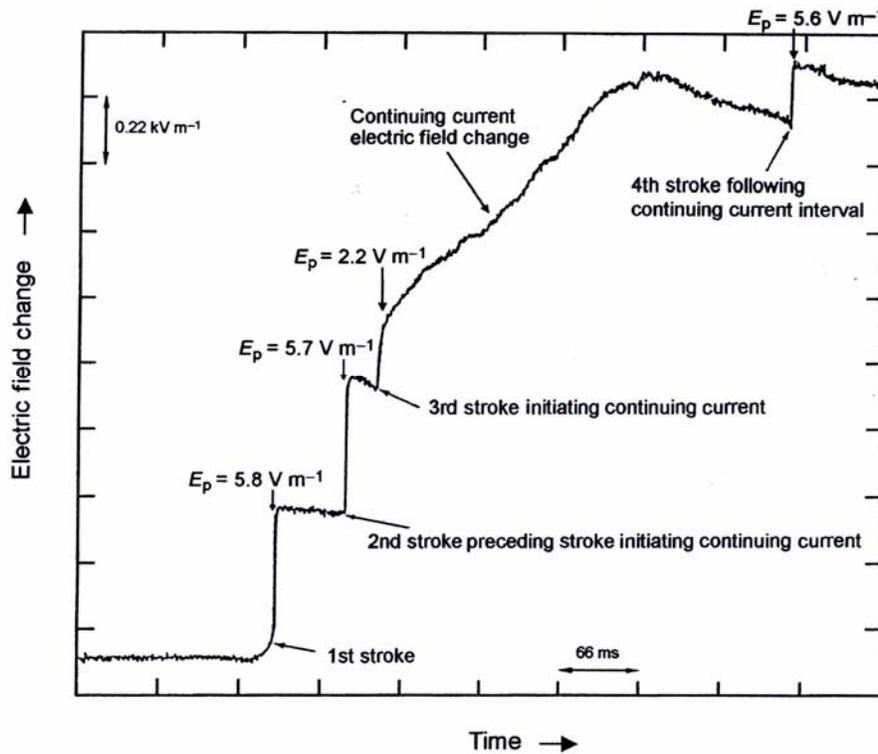


Figura 3.17 - Variação do campo elétrico de um relâmpago de quatro descargas com uma corrente contínua longa seguindo a terceira descarga. O relâmpago ocorreu na Flórida em 27 de julho de 1979 a uma distância de 6,5 km.

Fonte: Adaptada de Rakov e Uman (2003)

A esmagadora maioria das correntes contínuas longas é iniciada por descargas subseqüentes de relâmpagos de múltiplas descargas em oposição à primeira descarga em um relâmpago com uma única descarga ou com múltiplas descargas. Rakov e Uman (2003) sugerem um padrão na iniciação de correntes contínuas longas. Primeiro, descargas iniciando correntes contínuas

longas tendem a ter um pico inicial de campo elétrico menor que as descargas regulares, essa última definida como nem iniciando corrente contínua longa, nem precedendo as que iniciam, nem a imediatamente após o intervalo de uma corrente contínua. Segundo, as descargas que precedem aquelas que iniciam uma corrente contínua longa são as que provavelmente têm um pico de campo relativamente maior que as descargas regulares. Finalmente, as descargas que iniciam as correntes contínuas longas são usualmente precedidas por intervalos entre descargas relativamente curtos.

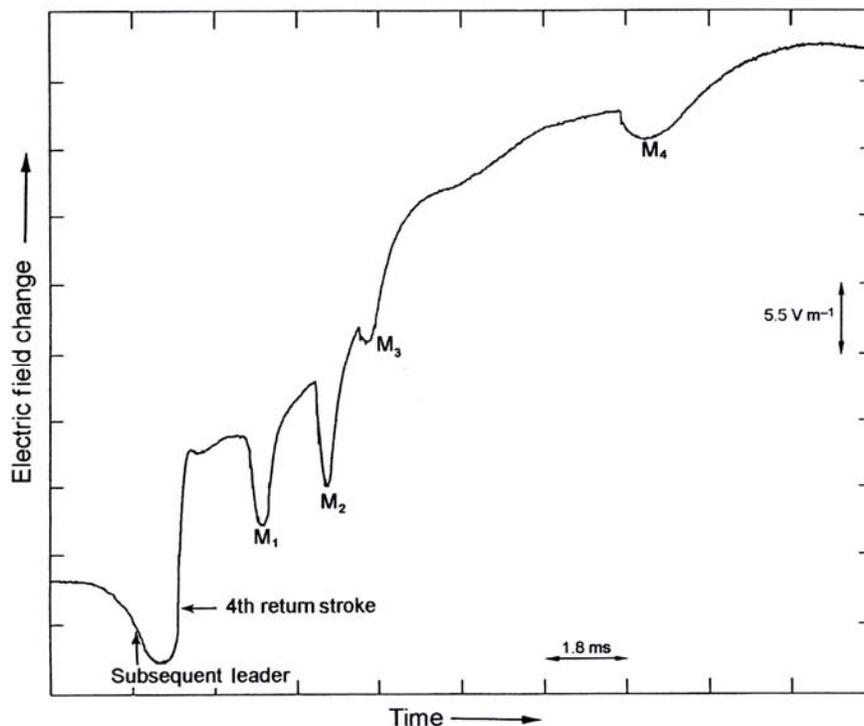


Figura 3.18 - Variações do campo elétrico com a forma de gancho devido a componentes M durante a corrente contínua inicializada pela quarta descarga de retorno de um relâmpago ocorrido na Flórida em 11 de agosto de 1984 a uma distância de cerca de 5 km.

Fonte: Adaptada de Rakov e Uman (2003)

### 3.8. Componente-M

A componente M é observada como um aumento na luminosidade do canal (da ordem de alguns milissegundos) durante um evento de corrente contínua. O aumento na luminosidade está associado com pulsos de corrente superpostos à corrente contínua presente. A corrente de um pulso M pode variar de centenas a milhares de amperes (YASHUNIN et al., 2007; CAMPOS et al., 2007 e 2008). O “M” vem de D. J. Malan, que foi o primeiro a estudar esse processo do relâmpago. Assim como as seqüências líder-descarga-de-retorno e as correntes contínuas, as componentes M transportam entre 0,1 a 0,2 C de carga elétrica negativa da nuvem para o solo (RAKOV e UMAN, 2003). O modo componente M difere do modo líder-contínuo-descarga-de-retorno uma vez que o primeiro requer a presença de um canal carreando corrente para o solo enquanto que o último aparentemente ocorre ao longo do resto do canal previamente formado quando essencialmente não existe corrente fluindo para o solo.

Na Figura 3.19 uma seqüência de imagens mostra o canal de uma descarga de retorno subsequente iluminado durante vários quadros devido a uma corrente contínua. No terceiro e quarto quadros pode-se perceber a intensificação da luminosidade do canal como consequência de um pulso M.

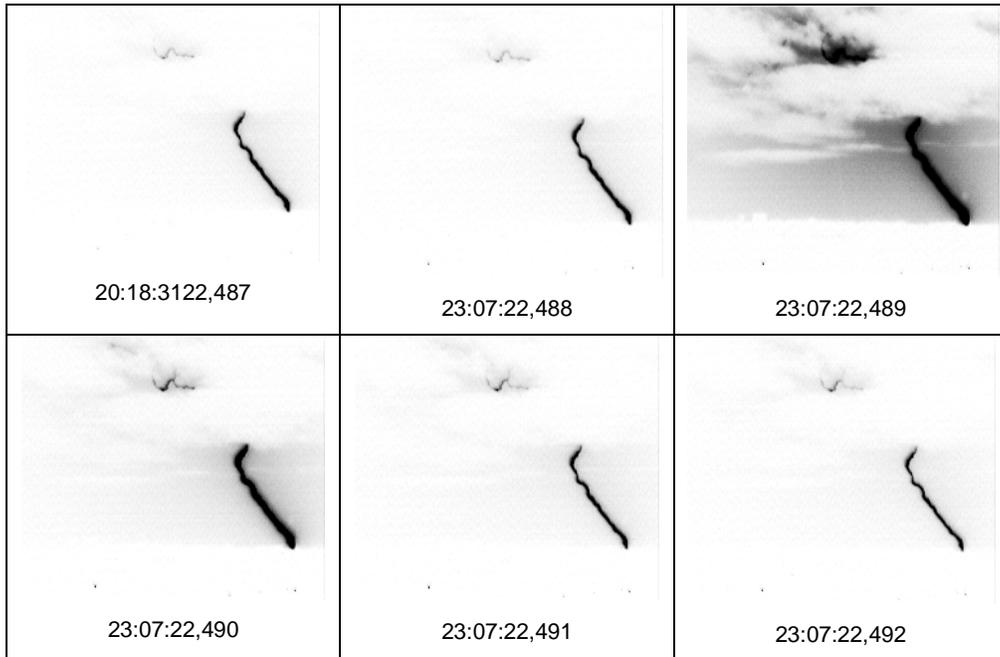


Figura 3.19 – Seqüência de imagens mostrando um aumento na luminosidade do canal durante uma corrente contínua, correspondendo a um componente M. Relâmpago nuvem-solo negativo registrado em 23/03/2005 a 13 km de distância em São José dos Campos - SP.



## 4 A TEORIA DO “LÍDER BI-DIRECIONAL”

### 4.1 Introdução

Os conceitos de bi-direcionalidade e carga líquida zero para o líder tornaram-se a maior chave na interpretação de uma variedade de processos físicos que tomam lugar durante o desenvolvimento do relâmpago.

O reconhecimento desses conceitos pela comunidade de pesquisadores de relâmpagos, segundo Mazur (2002), tem sido um processo lento ao longo das últimas décadas.

Os conceitos foram introduzidos por Heinz Kasemir (1950) e foram verificados muito mais tarde com medidas de relâmpagos iniciados por aeronaves Mazur (1989). A essência desses conceitos é que a iniciação do relâmpago em nuvens eletrificadas ocorre como uma descarga sem eletrodo, bi-direcional e de carga líquida zero. Tal processo de iniciação toma lugar em relâmpagos intranuvem, nuvem-solo, iniciados por aeronaves e nos iniciados por foguetes utilizando-se o método denominado “de altitude” (“*tipsy*”), cujo cabo condutor estendido pelo foguete permanece isolado do solo.

A Figura 4.1, a seguir, mostra um exemplo de um relâmpago iniciado artificialmente, utilizando-se o método de altitude. O experimento foi realizado no verão de 1999/2000 pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica, no campo de experimentos do INPE em Cachoeira Paulista.



Figura 4.1 - Exemplo de relâmpago iniciado artificialmente por foguete utilizando-se o método “de altitude”.

Com a aceitação desses conceitos para o líder, algumas mudanças significativas ocorreram no entendimento “clássico” dos processos físicos dos relâmpagos.

A seguir, é feita uma revisão conceitual dos processos envolvidos no desenvolvimento do relâmpago com base no conceito do líder bi-direcional e de carga líquida zero.

#### **4.2 – A iniciação do relâmpago**

Serão abordados neste item: as condições do campo elétrico no interior da nuvem de tempestade; as condições nas quais ocorrem a descarga corona e o desenvolvimento de um sistema de canais filamentosos ramificados – “*streamers*”. Todos importantes para o entendimento do processo de iniciação e desenvolvimento do líder bi-direcional.

#### 4.2.1 Discrepância na magnitude do campo elétrico no interior das nuvens de tempestade.

A rigidez dielétrica do ar virgem é inversamente proporcional à densidade. Ao nível do mar (1000 mb) a rigidez dielétrica do ar é cerca de  $30 \times 10^5$  V/m. Quando esse valor é corrigido para a altitude onde a iniciação do relâmpago é mais comum (440 – 500 mb), cerca de 3 a 5 km, ele se reduz para algo em torno de  $11 \times 10^5$  V/m (WILLIAMS, 2006).

Porém, os campos elétricos máximos registrados em nuvens de tempestade são substancialmente menores que esse valor (RAKOV e UMAN, 2003). A Tabela 4.1 resume diversas dessas observações. Segundo apontam esses estudos, magnitudes típicas do campo elétrico no interior de nuvens de tempestade são cerca de 2 a 3 vezes menores que  $11 \times 10^5$  V/m.

Tabela 4.1: Resumo da máxima medida de campo elétrico em nuvens de tempestade.

Reference	Sounding Type	Maximum Electric Field, $Vm^{-1}$
Gunn (1948)	Aircraft	$3,4 \times 10^5$
Imyanitov et al. (1971)	Aircraft	$2,8 \times 10^5$
Winn et al. (1974)	Rockets	$4 \times 10^5$
Winn et al. (1981)	Balloons	$1,4 \times 10^5$
Weber et al. (1982)	Balloons	$1,1 \times 10^5$
Byrne et al. (1983)	Balloons	$1,3 \times 10^5$
Fitzgerald (1984)	Aircraft	$1,2 \times 10^5$
Marshal and Rust (1991)	Balloons	$1,5 \times 10^5$
Kasemir (as reported by MacGorman and Rust1998)	Aircraft	$3 \times 10^5$

Fonte: Adaptada de Williams (2006).

Portanto, existe, em princípio, uma discrepância, apontada por Rakov e Uman (2003) e verificada por Williams (2006), entre o valor do campo elétrico ambiente medido e a intensidade de campo necessária para a quebra da rigidez dielétrica do ar no interior da nuvem de tempestade. Além disso,

pergunta-se qual processo deve ser capaz de provocar o aumento do campo elétrico num determinado ponto (o ponto de iniciação do relâmpago) de modo que alcance intensidade suficiente para provocar a quebra da rigidez dielétrica do ar.

#### **4.2.2 Hipóteses de mecanismos de intensificação do campo no interior da nuvem.**

Na literatura (RAKOV e UMAN, 2003; WILLIAMS, 2006) tem sido aceita a idéia (porém não comprovada) de que um processo de intensificação do campo elétrico ocorre devido à assim denominada “instabilidade hidrodinâmica”, que provoca a deformação de uma grande gota de chuva, alongando-a por indução do campo elétrico pré-existente ou, ainda, devido à forma altamente alongada resultante da colisão e coalescência de um par de gotas.

Hidrometeoro é definido, na meteorologia, como um meteoro constituído por um conjunto de partículas de água, na fase líquida ou sólida, em queda livre ou em suspensão na atmosfera, ou levantadas da superfície terrestre pelo vento, ou depositadas sobre objetos, no solo ou na atmosfera livre. Os hidrometeoros que, por ação da gravidade, movem-se na direção descendente no interior da nuvem são chamados partículas de precipitação. Todos os outros hidrometeoros são chamados partículas da nuvem.

Experimentos em laboratório com hidrometeoros imersos em campos elétricos uniformes têm mostrado evidências que a quebra da rigidez dielétrica poderia ser iniciada por campos aumentados localmente pelos mesmos (CRAIB e LATHAM, 1974; SALOMON et al., 2002; SENTMAN et al., 2005). Teoricamente, uma esfera condutiva imersa em um campo uniforme aumentará o campo local por um fator de três (STRATTON, 1941). Longas agulhas de gelo como, por exemplo, o longo e fino condutor da Figura 4.2 a seguir, podem aumentar o campo por grandes fatores, mas em escalas menores. Os fatores

de aumento são da ordem que é necessária para resolver o quebra-cabeça das magnitudes do campo necessário para a quebra da rigidez dielétrica (WILLIAMS, 2006).

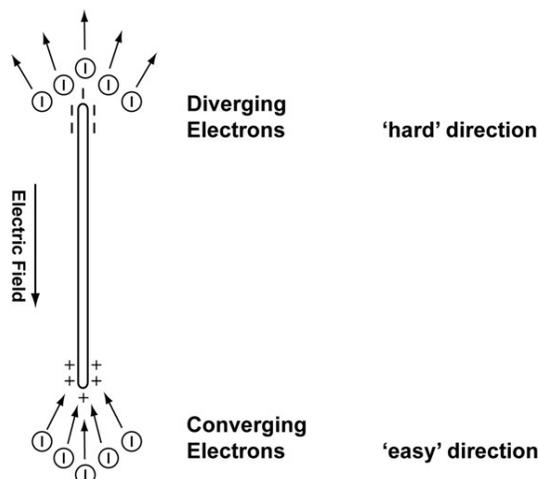


Figura 4.2 - Intensificação do campo elétrico nas extremidades de um condutor longo e fino imerso em um campo elétrico. Elétrons móveis estão convergindo em uma extremidade e divergindo na outra.

Fonte: Adaptada de Williams (2006).

Outro mecanismo de intensificação do campo no interior da nuvem de tempestade sugerido na literatura (GUREVICH et al., 1992, 1997, 1999; RAKOV, 2004) tem como iniciadores do processo os raios cósmicos. Gurevich sugeriu que a “fuga” de elétrons no interior da nuvem de tempestade pode ter um importante papel na iniciação do relâmpago. Para que um elétron evite ser recapturado ele deve ganhar mais energia do campo elétrico no período entre colisões do que ele perde numa colisão. O campo elétrico necessário para que a fuga de elétrons ocorra, denominado campo elétrico de “*breakeven*”, decresce exponencialmente com a altitude devido ao decréscimo exponencial da densidade de moléculas no ar. Em altitudes de 4 a 6 km, o campo elétrico de *breakeven* é  $1,0 \times 10^5$  a  $1,5 \times 10^5$  V/m (GUREVICH et al., 2003), o qual é

cerca de uma ordem de magnitude menor que o campo de quebra de rigidez convencional nessas altitudes.

Para que o processo de fuga de elétrons tenha início é necessária a presença de elétrons iniciais com energia excedendo 0,1 a 1 MeV. Tais elétrons energéticos são produzidos em nuvens de tempestade via colisões de partículas de raios cósmicos de muito alta energia ( $10^9$  a  $10^{10}$  MeV ou maior) com núcleos atmosféricos (RAKOV, 2004). Cada partícula de raio cósmico produz de  $10^6$  a  $10^7$  elétrons energéticos (GUREVICH e ZYBIN, 2001) que ocupam um volume cuja dimensão longitudinal é da ordem de quilômetros e cujas dimensões transversais são da ordem de centenas de metros (RAKOV, 2004). A densidade de fluxo dos elétrons com energia igual ou superior a 1 MeV é da ordem de  $10^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (GUREVICH e ZYBIN, 2001). Se os elétrons energéticos se chocarem em uma região da nuvem na qual o campo elétrico é maior que o campo local de *breakeven*, eles se tornarão elétrons em fuga e suas interações com moléculas de nitrogênio e oxigênio podem produzir novos elétrons energéticos, os quais também se tornam fugitivos. Como resultado, uma avalanche com crescimento exponencial de elétrons em fuga é formada (RAKOV, 2004). Além do mais, numerosos elétrons lentos com energia entre 1 keV e 1 MeV, que não são acelerados suficientemente para tornarem-se elétrons em fuga, são criados nas colisões. Se a densidade de elétrons lentos alcançar um valor crítico em uma pequena região, a condutividade elétrica nessa região torna-se alta o suficiente (da ordem de  $10^{-4} \text{ S m}^{-1}$ ; SALOMON et al., 2001) para formar um caminho alongado de plasma. Esse condutor alongado (cerca de 10 m; SALOMON et al., 2001), formado e polarizado dentro de microssegundos (GUREVICH e ZYBIN, 2001), pode aumentar o campo elétrico nas suas extremidades para valores requeridos para a quebra de rigidez convencional via avalanches de elétrons de baixa energia (menos que 30 eV), conforme esquema mostrado na Figura 4.2 anterior.

### 4.2.3 O mecanismo de desenvolvimento do *streamer* e do líder escalonado.

Mas, uma vez intensificado o campo elétrico próximo às extremidades das gotas de chuva ou das agulhas de gelo, como se desenvolve o processo da quebra de rigidez dielétrica do ar virgem?

A intensificação do campo elétrico nas vizinhanças de um condutor (como no caso das extremidades das gotas de chuva ou das agulhas de gelo) pode ultrapassar o valor crítico de campo necessário para a formação de avalanches de elétrons no ar, conforme descrito no Capítulo 3. Essa atividade elétrica, freqüentemente luminosa, confinada a uma pequena região nas vizinhanças do condutor é conhecida como “corona” ou “descarga corona”. Porém, as descargas coronas que ocorrem na extremidade positiva apresentam diferenças no seu processo de desenvolvimento em relação às que ocorrem na extremidade negativa.

Na descarga corona negativa, a avalanche de elétrons desenvolve-se na direção do decréscimo do campo elétrico, conforme pode ser visto na Figura 4.2 anterior e 4.3 seguinte. Devido à sua grande mobilidade, os elétrons irão mover-se rapidamente para a região de campo elétrico menos intenso, deixando para trás cargas espaciais positivas próximas à extremidade negativa do condutor. A avalanche cessará a uma distância  $r_0$  da extremidade negativa, onde o campo elétrico tem intensidade abaixo da necessária para a ionização das moléculas. Nessa região os elétrons são rapidamente capturados por átomos de oxigênio eletronegativos criando uma carga espacial negativa (COORAY, 2003). Assim, duas regiões de carga espacial são criadas logo à frente da extremidade negativa, uma positiva, mais próxima, e outra negativa, a uma distância aproximada  $r_0$ . Essas duas concentrações de carga espacial irão modificar a configuração do campo elétrico nas vizinhanças da extremidade negativa, aumentando-o próximo a ela e enfraquecendo-o ainda mais a uma

distância aproximada  $r_0$ . Como resultado, esse processo dificulta o desenvolvimento das avalanches seguintes que irão iniciar numa região de campo elétrico mais intenso, porém irão se propagar por uma distância mais curta que suas predecessoras.

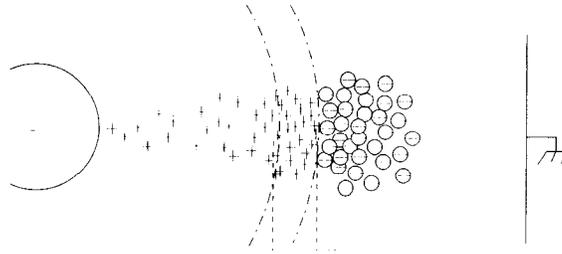


Figura 4.3 - Descarga corona negativa. Distribuição de carga nas proximidades da extremidade negativa do condutor.

Fonte: Adaptada de Cooray (2003).

Na descarga corona positiva, a avalanche de elétrons desenvolve-se na direção da extremidade positiva do condutor, região onde há um aumento cada vez maior na intensidade do campo elétrico à medida que se aproxima da extremidade do condutor, conforme pode ser visto na Figura 4.2 anterior e 4.4 seguinte. Uma vez que a intensidade do campo elétrico nessa região esteja acima do valor crítico necessário para a ionização do ar ao seu redor, os elétrons da avalanche serão acelerados na direção da extremidade positiva, diminuindo a probabilidade de serem capturados por gases eletronegativos. O aumento da energia cinética dos elétrons da avalanche é parcialmente dissipado na ionização por colisão de átomos e moléculas muito próximas à superfície do condutor. A avalanche e a atividade de ionização por colisão próxima à superfície deixam para trás uma carga espacial positiva muito próxima da extremidade positiva. Essa concentração de cargas espaciais próximas à extremidade não causa nenhuma modificação na configuração do campo elétrico que altere o comportamento das avalanches de elétrons seguintes.

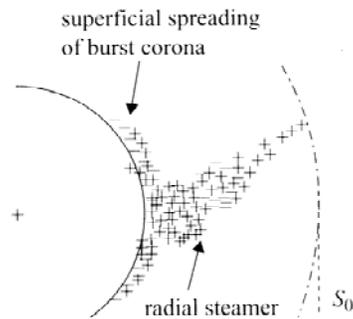


Figura 4.4 - Descarga corona positiva. Distribuição de carga nas proximidades da extremidade positiva do condutor.

Fonte: Adaptada de Cooray (2003).

O passo seguinte para a iniciação do líder bi-direcional é a existência de condições para o desenvolvimento de um sistema de canais filamentosos ramificados – “*streamers*”.

Se a densidade numérica de carga espacial positiva, dentro de um volume com cerca de 50  $\mu\text{m}$  de raio ao redor da extremidade, excede  $10^8$  íons, estão criadas as condições para que o *streamer* positivo se propague (COORAY, 2003). Uma vez disparado o processo de descargas coronas na extremidade positiva, não há nada que se oponha ao acúmulo de cargas positivas de modo que o valor crítico da densidade numérica seja atingido e o *streamer* positivo inicie a sua propagação.

A Figura 4.5, a seguir, mostra uma representação esquemática da propagação de um *streamer* positivo.

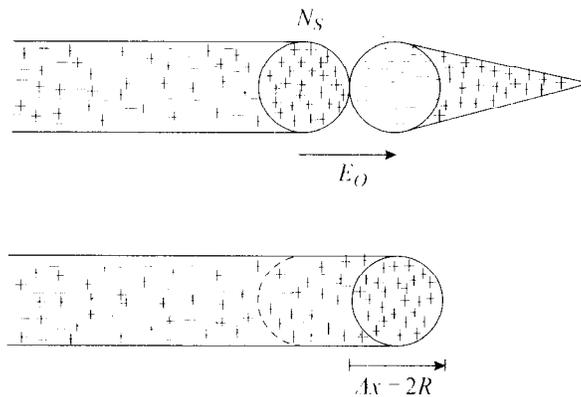


Figura 4.5 - Representação esquemática da propagação do *streamer* positivo.

Fonte: Adaptada de Cooray (2003).

O forte campo elétrico resultante da alta concentração de carga positiva na extremidade do *streamer* positivo atrai as avalanches eletrônicas na direção dela. Os elétrons da avalanche são neutralizados pela carga espacial positiva existente na extremidade do *streamer*, deixando para trás igual quantidade de carga espacial positiva logo à frente da extremidade. A repetição desse processo leva a uma efetiva propagação da extremidade do *streamer* positivo.

Uma vez que a multiplicação dos elétrons na região próxima à extremidade do *streamer* positivo é suportada pelo campo da carga elétrica existente na própria extremidade, o *streamer* positivo pode se propagar em campos elétricos ambientes de intensidade muito mais baixa que o valor crítico necessário para a ionização de elétrons (COORAY, 2003).

A Figura 4.6, a seguir, mostra uma representação esquemática da propagação de um *streamer* negativo.

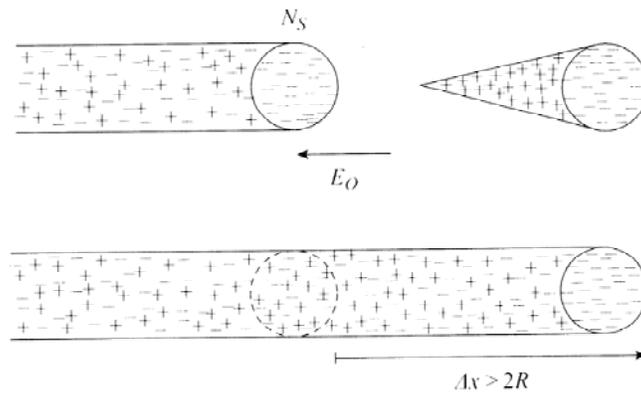


Figura 4.6 - Representação esquemática da propagação do *streamer* negativo.

Fonte: Adaptada de Cooray (2003).

Pode-se notar que a propagação do *streamer* negativo é dificultada, principalmente, por dois fatores: (i) conforme mencionado anteriormente, no caso do *streamer* positivo os elétrons se propagam em direção à extremidade do *streamer* e, portanto, no sentido do aumento da intensidade do campo, enquanto que no caso do *streamer* negativo, os elétrons movem-se para uma região de intensidade de campo cada vez mais baixa, o que aumenta a probabilidade de que sejam capturados por átomos eletronegativos os quais criarão uma região de carga espacial negativa imóvel que impedirá a propagação do *streamer* e (ii) enquanto na propagação do *streamer* positivo os elétrons da avalanche são absorvidos pela carga positiva presente no canal do *streamer*, na propagação do *streamer* negativo este tem que suprir os elétrons necessários para a neutralização da carga espacial positiva deixada para trás pela avalanche eletrônica (o primeiro é um processo muito mais fácil que o último) (COORAY, 2003).

Ambas as características fazem com que a propagação do *streamer* positivo seja mais fácil do que a do negativo. Isso se reflete no campo elétrico ambiente mínimo para a propagação dos *streamers*. A intensidade crítica do campo elétrico para propagação de *streamers* positivos ao nível do mar ( $P = 1000 \text{ mb}$ )

é  $5 \times 10^5$  V/m enquanto que para *streamers* negativos a intensidade crítica do campo é  $10 \times 10^5$  V/m, duas vezes maior (WILLIAMS, 2006).

Os *streamers* têm sua origem em uma formação de plasma comum a todos denominada “*streamer stem*” (caule ou haste de onde partem todos os canais filamentosos ramificados). Cada *streamer* é um filamento frio de corona, com comprimento de alguns poucos metros, e com uma baixa corrente associada a ele que não pode aquecer o ar suficientemente para torná-lo condutor. No entanto, a combinação das correntes de todos os *streamers* fluindo através do *stem* faz com que a temperatura naquele ponto aumente, aquecendo o plasma e dando origem aos líderes, que são descargas auto-propagantes de plasma quente com comprimento da ordem de centenas de metros a quilômetros (MAZUR, 2002; WILLIAMS, 2006).

Em 2000, Bazelyan e Raizer escreveram:

*“Todos os detalhes do desenvolvimento do líder seguem diretamente das propriedades de uma zona de streamers. No relâmpago, ela é inteiramente inacessível para observação devido às dimensões relativamente pequenas e à baixa luminosidade. Hoje em dia não existe outra maneira a não ser estudar descargas longas em condições de laboratório e extrapolar os resultados obtidos ...”.*

Esse panorama vem sendo modificado depois que câmeras de alta velocidade passaram a ser utilizadas na pesquisa de relâmpagos nuvem-solo naturais. Certas características dos líderes, como por exemplo a velocidade de propagação, puderam ser estimadas para eventos naturais (SABA et al., 2006a; 2008). Porém, o processo de desenvolvimento do líder, tanto positivo como negativo, continuam a ser inferidos a partir de observações de descargas longas em laboratório.

A Figura 4.7, a seguir, mostra um esquema do desenvolvimento de uma descarga positiva longa em laboratório.

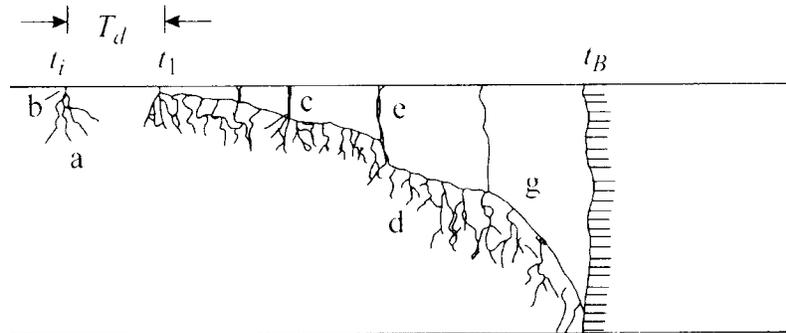


Figura 4.7 Desenvolvimento de um líder positivo.

Fonte: Adaptada de Cooray (2003).

No instante  $t_i$  canais filamentosares – *streamers* (a) - passam a se propagar a partir de um curto canal brilhante – *stem* (b) - localizado no eletrodo de alta voltagem. Um intervalo é identificado na figura por  $T_d$  – *dark period* - caracterizado pela falta de luminosidade devido à ausência de atividade de ionização. Depois do intervalo escuro, no instante  $t_l$ , o líder positivo começa a se desenvolver, a partir do *stem*, precedido por *streamers* que se iniciam na sua extremidade (d). Usualmente o líder se propaga mais ou menos continuamente, no entanto, se a taxa de aumento da voltagem aplicada ao eletrodo é muito baixa, então alongamentos súbitos e brilhantes ocorrem (c, e, g). No instante  $t_B$  o líder alcança o eletrodo de polaridade negativa (cátodo) e a descarga de retorno começa.

A Figura 4.8, a seguir, mostra o desenvolvimento de uma descarga negativa longa em laboratório.

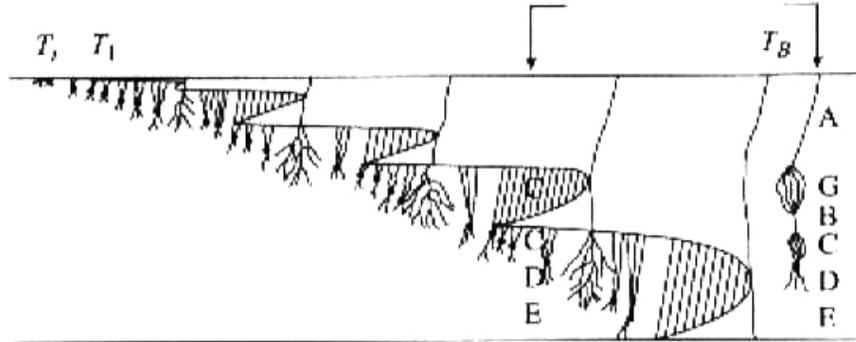


Figura 4.8 - Desenvolvimento de um líder negativo.

Fonte: Adaptada de Cooray (2003).

A propagação dos primeiros *streamers* e o intervalo escuro são similares aos do líder positivo. Porém, depois do intervalo escuro, a única característica que não existe no líder positivo se manifesta – o sistema piloto (*pilot system*). O sistema piloto consiste de um ponto brilhante denominado *space stem* (caule ou haste espacial), indicado por pontos negros na figura, a partir do qual *streamers* de ambas as polaridades se desenvolvem em direções opostas. Portanto, em frente à extremidade do canal do líder negativo (A), situa-se a *streamer zone* onde está localizado o *space stem* (D), a partir do qual partem *streamers* positivos (C) em direção à extremidade do líder negativo e *streamers* negativos (E) em direção ao eletrodo positivo (anodo). O *space stem* move-se à frente da extremidade do líder e, aparentemente, o ar pelo qual passa permanece como isolante. Quando o *space stem* está suficientemente aquecido começa a se desenvolver em ambas as direções formando um canal de plasma denominado líder espacial – *space leader* (B). A propagação do *space leader* na direção da extremidade do líder positivo é mais rápida que a propagação na direção do *gap*. Ao encontrar a extremidade do líder negativo, o potencial do eletrodo de alta tensão é transferido para a extremidade mais baixa do *space leader* causando, como consequência, um aumento no brilho do canal a partir do ponto de encontro. Isso gera uma intensa propagação de *streamers* na nova extremidade do líder negativo, o que pode levar à criação

de um novo *space stem* e o processo se repete para um novo passo do líder negativo.

### **4.3 O desenvolvimento dos líderes**

Os primeiros estudos, na escala da nuvem de tempestade, buscavam explicar o desenvolvimento e as características dos líderes escalonados durante o seu trajeto para o solo, uma vez que essa etapa do processo podia ser mais facilmente analisada comparando-se os registros de campo elétrico e de câmeras fotográficas.

#### **4.3.1 Schonland e a classificação dos líderes escalonados.**

Conforme descrito no Capítulo 3, Schonland et. al. (1938) classificaram os líderes escalonados em dois tipos,  $\alpha$  e  $\beta$ . Segundo esses autores, os líderes o tipo  $\beta$  parecem ter dois estágios no seu desenvolvimento externo à nuvem. Eles começam abaixo da base da nuvem ou, ocasionalmente, emergem de uma lateral da nuvem, com passos relativamente longos e brilhantes e velocidade média alta, da ordem de  $10^6$  m/s, e exibem uma extensa ramificação próximo à base da nuvem. À medida que o líder tipo  $\beta$  aproxima-se do solo ele assume as características do líder tipo  $\alpha$ , isto é, exibe uma velocidade de propagação mais baixa e passos menos luminosos e mais curtos. Schonland et al. (1938) lançaram a hipótese que líderes iniciais tipo  $\beta$ , altamente ramificados, são causados pelo efeito de volumes concentrados de cargas espaciais positivas na base ou sob a base da nuvem e Malan and Schonland (1951a) sugeriram que o efeito dessa carga positiva mais baixa, mais a carga positiva que é efetivamente acrescida pela primeira descarga de retorno, podem causar a formação de um líder completamente novo dentro da nuvem.

#### 4.3.2 Kasemir e o conceito da bi-direcionalidade e carga líquida zero.

Segundo o conceito proposto por Mazur (1989), a grande maioria de todos os relâmpagos que são iniciados em nuvens de tempestade são “árvores” com dupla terminação que interligam regiões do espaço carregadas com polaridades opostas. Uma “árvore” invade a região de carga positiva e a outra a região de carga negativa.

As primeiras observações dessas descargas com dupla terminação foram feitas em laboratório, registrando-se uma notável assimetria entre elas (WILLIAMS, 2006).

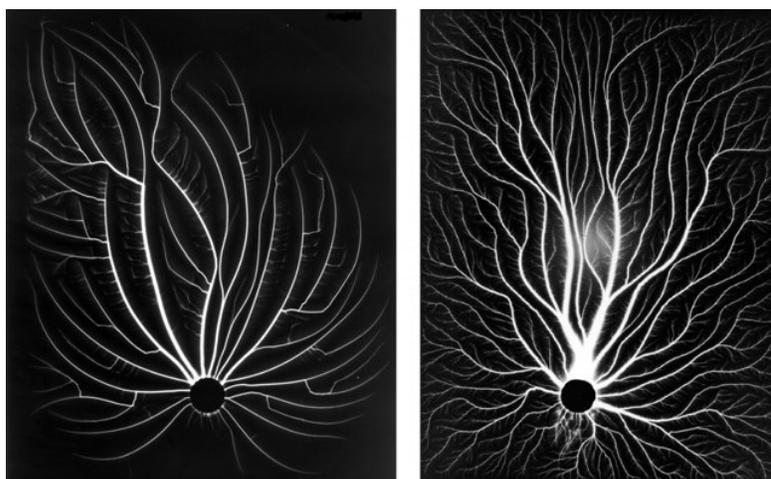


Figura 4.9 - Descargas superficiais com superfícies carregadas positivamente à esquerda e negativamente à direita, mostrando contraste marcante na estrutura.

Fonte: Adaptada de Williams (2006).

Observou-se, também, nesses experimentos de laboratório, que somente a extremidade negativa desenvolvia-se como uma estrutura dendrítica (que apresenta ramificações semelhantes à de uma árvore), conforme pode ser observado na Figura 4.9 à direita.

No contexto da tempestade, Mazur (1989) documentou o desenvolvimento de uma árvore com dupla terminação tendo uma aeronave como iniciadora do relâmpago e tem patrocinado esse conceito nos últimos anos. Suas observações a partir de aeronaves foram interpretadas segundo o conceito do líder bi-direcional de Kasemir (1950), o protótipo da árvore com dupla terminação.

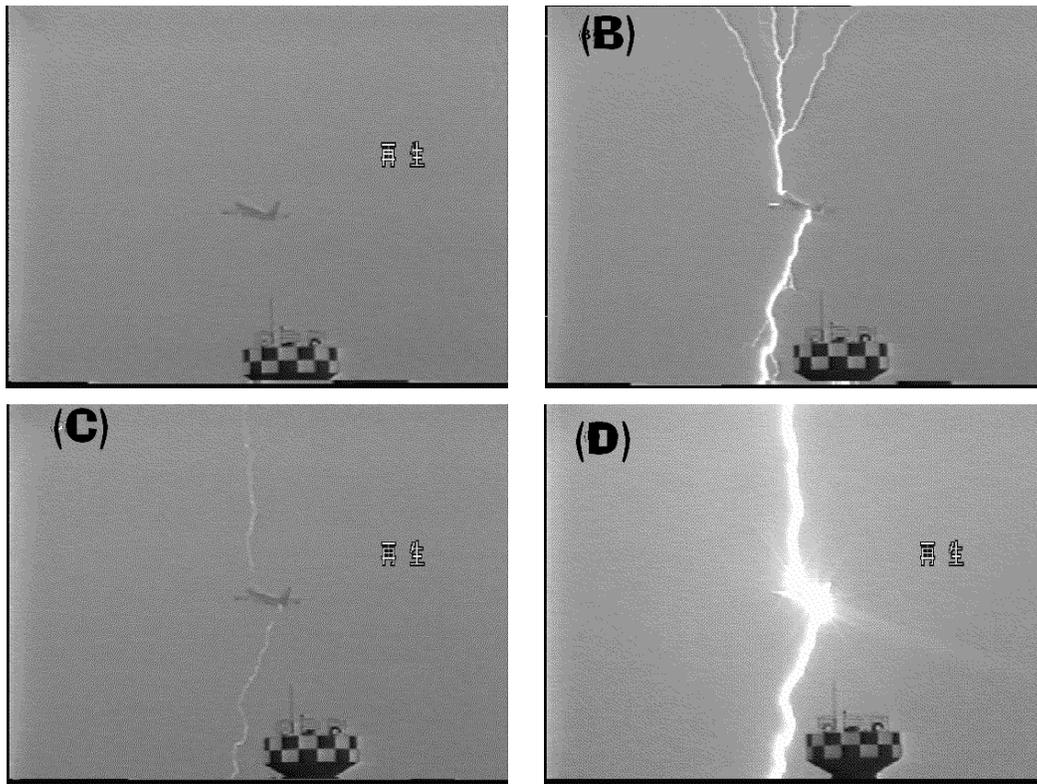


Figura 4.10 - Relâmpago induzido pela presença de um avião. O filme foi feito no Japão, próximo a uma pista de pouso. Em (B) aparece a primeira descarga de retorno, que ilumina o canal produzido pelo líder bidirecional. Em (C) percebe-se que a corrente caiu a valores pequenos ou desprezíveis, o que é evidenciado pela queda abrupta da luminosidade. Em (D) observa-se uma descarga de retorno subsequente, mais luminosa do que a primeira.

Fonte: Adaptada de Kawasaki (1996).

Freqüentemente parte dos canais luminosos do relâmpago é obscurecida da observação visual pela nuvem. A Figura 4.10 mostra uma circunstância excepcional de iniciação de relâmpago por uma aeronave abaixo da nuvem.

#### **4.3.3 Mazur e a ausência de “ruído” na extremidade positiva da árvore com dupla terminação.**

Mazur (1989) relata que, curiosamente, a extremidade positiva é relativamente silenciosa, freqüentemente completamente silenciosa, enquanto a extremidade negativa é extremamente ‘ruidosa’. Uma possível explicação para essa assimetria, segundo Willians (2006), reside em uma bem reconhecida assimetria na eletrônica gasosa e uma consideração de outro comportamento único documentado em escala de laboratório, documentado por Bazelyan e Raizer (2000), que será abordado alguns parágrafos mais adiante.

O contraste na mobilidade entre elétrons e íons positivos é a assimetria mais amplamente reconhecida na eletrônica gasosa. De acordo com a equação de Langevin, citado por Willians (2006), a mobilidade de partículas carregadas nos gases é inversamente proporcional à massa da partícula carregada. Uma vez que a massa dos íons positivos no ar ionizado é  $10^4$  vezes maior que a dos elétrons, a maior mobilidade dos elétrons os faz os transportadores de carga dominantes (WILLIAMS, 2006). Esse resultado tem importantes conseqüências na escala da nuvem de tempestade, como será mostrado.

Willians (2006) argumenta que a extremidade positiva da árvore tem sua extensão facilitada em relação à extremidade negativa. O argumento se baseia na diferença entre os processos de desenvolvimento dos líderes positivos e negativos, conforme explicado no item 4.2.3.

A Figura 4.11 ilustra, de forma esquemática, uma descarga iniciando em um ponto (uma partícula de precipitação ou o corpo de uma aeronave) e seu desenvolvimento como uma árvore com dupla terminação.

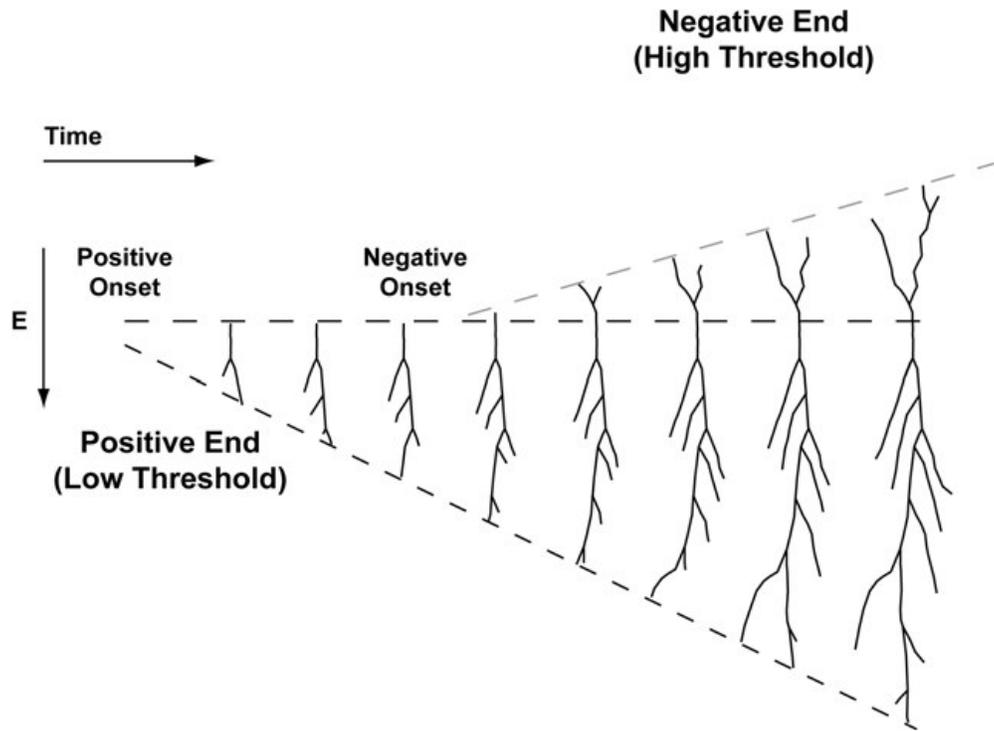


Figura 4.11 - Elongação esquemática de um sistema *streamer*/líder bi-direcional, com iniciação da polaridade positiva seguida por extensão da extremidade negativa da 'árvore' com dupla terminação.

Fonte: Adaptada de Williams (2006).

O líder positivo estende-se primeiro até que o campo elétrico no ponto de iniciação alcance a intensidade suficientemente para iniciar o líder negativo na direção oposta.

Descobertas-chave foram feitas em descargas de laboratório em *gaps* de 1 a 10 m. Resultados em laboratórios demonstraram uma clara assimetria no comportamento de líderes positivos e negativos (BAZELYAN e RAIZER, 2000). Em essência, líderes positivos progrediram suavemente através do ar existente

no *gap*, enquanto que líderes negativos foram intermitentes e erráticos. Esse contraste está bem ilustrado em fotografias para os líderes das duas polaridades na Figura 4.12.

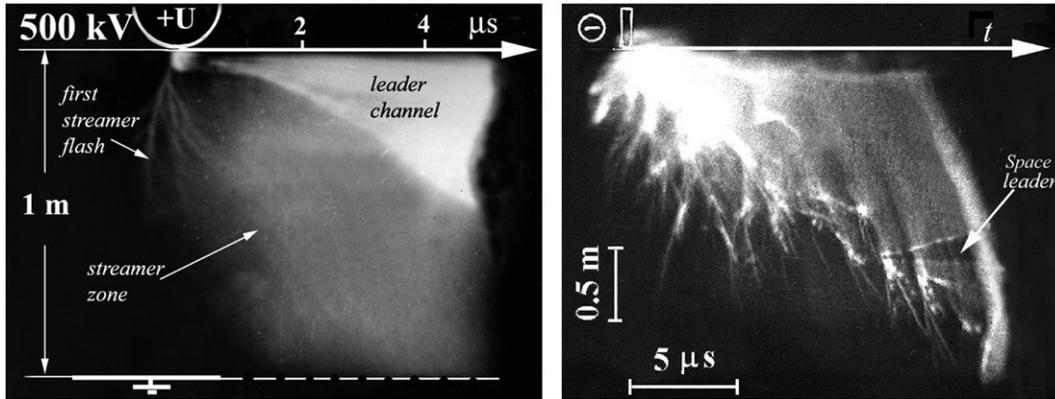


Figura 4.12 - Imagens fotográficas contrastando a extensão dos líderes com polaridade positiva (esquerda) e negativa (direita) descendo em direção ao plano de terra. O líder positivo progride suavemente ao passo que o líder negativo é intermitente e errático.

Fonte: Adaptada de Williams (2006).

Uma vez que a aceleração da carga elétrica é requerida para irradiar energia eletromagnética, temos uma base física para o entendimento da assimetria pronunciada entre as extremidades positiva e negativa da descarga. Conforme explicado no item 4.2.3, o líder positivo se propaga em virtude da extensão quase contínua de uma “vassoura” de *streamers* positivos em sua extremidade, ao passo que a propagação do líder negativo é substancialmente mais complicada. O desenvolvimento de um canal espacial desconectado, bi-direcional e intermitente ocorre nas vizinhanças da extremidade do líder negativo, com extensão do *streamer* positivo em direção à extremidade do líder negativo e extensão do *streamer* negativo em direção ao *gap*. O canal espacial bi-direcional é, em seguida, completamente ionizado pelo que tem sido chamado de variação K ou mini-descarga-de-retorno. A corrente através de todo o canal do líder, então, alcança transientemente valores de centenas de

amperes. Esse padrão intermitente de corrente tem contraste marcante com a corrente constante, regular, fluindo em líderes positivos em um *gap* de geometria similar. O contraste quantitativo em medidas, para líderes positivos e negativos em *gaps* de 1 a 10 metros, é resumido na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Resumo da assimetria na polaridade em experimentos em escala de laboratório.

Leader polarity	Gap length	Critical field	Recorded velocity range	Peak current
Positive	5–10 m	100–200 kV m <sup>-1</sup>	1.2–4.2 × 10 <sup>4</sup> m s <sup>-1</sup>	~1 A
Negative	5–7 m	200–300 kV m <sup>-1</sup>	10 <sup>5</sup> m s <sup>-1</sup>	~100 A

Fonte: Adaptada de Williams (2006).

Em tal caso, o desenvolvimento bi-direcional intermitente serve como um elemento irradiante que é completamente ausente para líderes positivos e, além disso, provê uma explicação qualitativa para a ordem-de-magnitude da assimetria em radiação VHF nas duas extremidades da árvore do relâmpago inicialmente documentada por Mazur (1989).

#### 4.4 A descarga de retorno e sua multiplicidade

Sabe-se que os relâmpagos nuvem-solo ocorrem em ambas as polaridades, negativa e positiva. Relâmpagos negativos são cerca de uma ordem de magnitude mais numerosos que os positivos, presumivelmente devido à proximidade do solo do centro de carga negativa principal em nuvens de tempestade. Relâmpagos positivos são constituídos, quase invariavelmente, por somente uma única descarga de retorno, seguidos por uma corrente contínua (ORVILLE et al., 1987; RAKOV e UMAN, 2003). Em contraste, o relâmpago nuvem-solo negativo é mais propenso a exibir múltiplas descargas discretas.

Mas, o que leva à ocorrência de múltiplas descargas discretas em um relâmpago ou à ocorrência de apenas uma descarga seguida de corrente contínua?

#### **4.4.1 Schonland e os *streamers* partindo dos “pacotes” de carga.**

Schonland (1938), de modo a explicar as múltiplas descargas dos relâmpagos, propôs a existência de múltiplos “pacotes” ou “amontoados” de carga no interior da nuvem, conforme mostra a Figura 4.13.

Segundo a proposta de Schonland (1938), a primeira descarga de retorno descarrega um amontoadado de carga e, então, torna-se inativa (*a*, *b*, e *c* na Figura 4.13). Schonland imaginou que a descarga aumenta o campo na região do segundo pacote de cargas e uma nova quebra de rigidez começa a acontecer (*d* na Figura 4.13). Quando o longo condutor ao potencial da nuvem, denominado *streamer* por Schonland, alcança o antigo canal do relâmpago ele alimenta outra descarga (*e* e *f* na Figura 4.13). O processo repete-se até que sejam esgotados os pacotes de carga. Schonland chamou os *streamers* que se encontram no potencial da nuvem de “*junction streamers*”, porque eles unem o pacote de carga ao canal existente. A mesma explicação reapareceu no livro de Uman (1987).

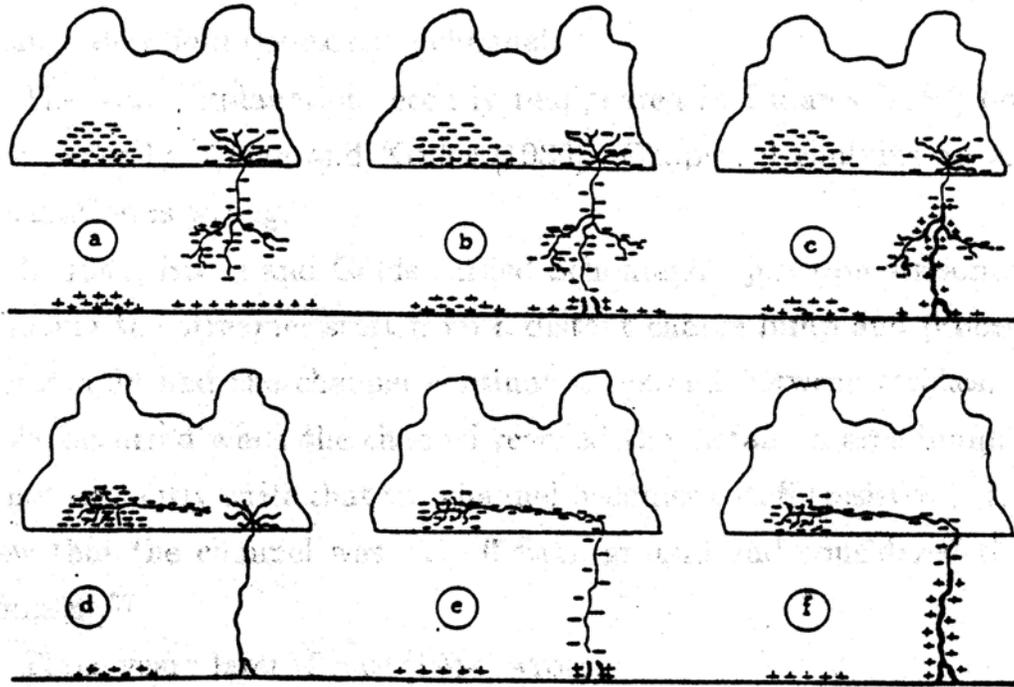


Figura 4.13 - Schonland (1938) assumiu que existem múltiplos amontoados de carga na nuvem e que a primeira descarga de retorno descarrega um amontoado (a, b, c) e, então, torna-se inativa. A descarga aumenta o campo na região do amontoado de cargas provocando uma nova quebra de rigidez (d). *Streamers* partem em direção ao canal do relâmpago existente e, quando o alcança, alimenta uma nova descarga (e, f).

Fonte: Adaptada de Schonland (1938).

#### 4.4.2 Bruce e Golde e os *streamers* partindo em direção aos “pacotes” de carga.

Em 1941, Bruce e Golde inverteram o sentido de propagação dos *junction streamers* de Schonland. Ao invés do *streamer* iniciar em um pacote de carga distante e caminhar em direção ao canal, eles simplesmente fizeram a extremidade superior do canal do relâmpago continuar a estender-se entre as

descargas de retorno. Uma descarga de retorno subsequente ocorre quando o canal alcança um novo pacote de carga.

Três anos mais tarde, Bruce (1944) substituiu os pacotes de carga de Schonland por uma distribuição quase homogênea de carga com algumas não-uniformidades. O canal continua se estendendo entre descargas, como em Bruce e Golde (1941). A explicação para descargas múltiplas é a mesma de Schonland (1938) - líderes partindo de não-uniformidades de carga encontram o canal. Se não existirem não-uniformidades, Bruce espera uma única descarga de corrente contínua.

Portanto, embora Bruce e Golde (1941) e Bruce (1944) utilizassem a idéia que o canal do relâmpago estendia-se continuamente entre descargas, eles também imaginaram pacotes de carga (BRUCE e GOLDE) ou canais desconectados encontrando o canal para o solo (BRUCE).

#### **4.4.3 Malan e Schonland e o desenvolvimento contínuo dos *streamers*.**

Malan e Schonland (1947) são os primeiros a sugerir que o que acontece entre descargas é uma extensão contínua, não ocorrendo “junções” conectando o antigo canal a cargas pontuais ou outros líderes. Mas eles ainda chamaram esse processo de “*junction process*”. Entre descargas de retorno o canal é interrompido próximo ao solo, mas continua a estender-se no interior da nuvem. Essa extensão pode aumentar o campo no canal o suficientemente para lançar uma frente de onda ionizante que alcança o solo e dá início a uma descarga de retorno subsequente. A Figura 4.14 mostra a idéia proposta por Malan e Schonland.

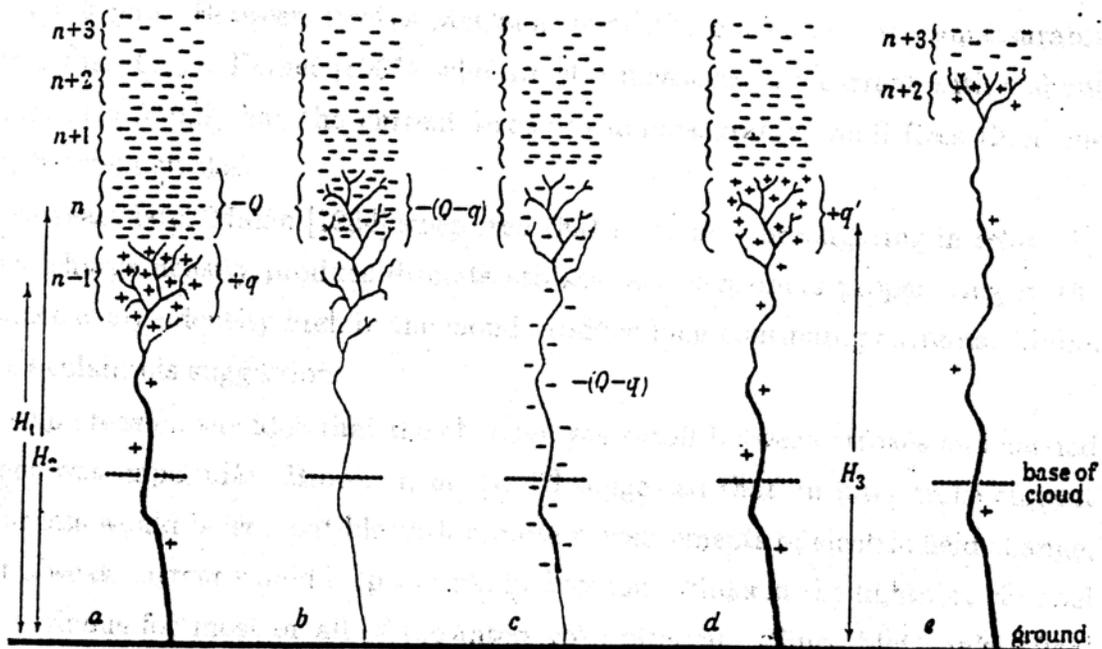


Figura 4.14 - Malan e Schonland assumem que, logo após a descarga de retorno (a), o canal para o solo torna-se resistivo, enquanto que o topo do canal do relâmpago estende-se continuamente no interior de uma coluna uniforme de carga (b). Eventualmente o potencial através do canal alcança intensidade suficiente para lançar uma frente de onda ionizante (c) a qual alcança o solo e dá início a uma nova descarga de retorno (d). O processo se repete até que a coluna seja drenada.

Fonte: Adaptada de Malan e Schonland (1951).

Três anos mais tarde Malan (1954) sugeriu que descargas parciais propagando-se em densidades relativamente baixas de carga espacial produzem descargas discretas, e descargas parciais propagando-se em altas densidades de carga espacial na nuvem produzem correntes contínuas longas. Malan não explica sua sugestão.

Heckman (1992) faz algumas observações com relação à proposta de Malan e Schonland: i) o canal de fato se estende dentro da nuvem, mas mais horizontalmente que verticalmente e ii) o relâmpago é menos efetivo em

neutralizar a carga da nuvem que o mostrado na Figura 4.14 (KREHBIEL, 1981; HECKMAN, 1992). Porém, a explicação qualitativa de Malan e Schonland para múltiplas descargas de retorno é, segundo Heckman (1992), essencialmente correta.

#### **4.4.4 Mazur e o efeito da extensão do canal e da corrente contínua.**

A estrutura bipolar de uma árvore com dupla terminação também pode ser observada com o uso da técnica de mapeamento das fontes de radiação dos relâmpagos utilizando a técnica da diferença do tempo de chegada (DTOA – *Difference of Time-Of-Arrival*). Mazur (2002) mostra, na Figura 4.15 a seguir, um mapa de radiação, obtido a partir do uso dessa técnica, de um típico relâmpago intranuvem, o qual exibe uma estrutura de dois níveis com uma ponte vertical produzida por líderes negativos que começaram a 7-8 km de altitude, ascenderam e, então, estratificaram entre 9-11 km (o nível superior), e os líderes de retorno (*recoil leaders*) que estratificaram na região de 6-7 km (o nível inferior).

*Recoil leaders* são líderes negativos que se auto-propagam, movendo-se ao longo do canal previamente desenvolvido pelos líderes positivos. As condições sob as quais a iniciação do *recoil leader* ocorre continuam a não ser plenamente entendidas (MAZUR, 2002). A assimetria no processo de propagação entre a extremidade positiva e negativa do líder bi-direcional, mostrada no item 4.3.3, resultando num desenvolvimento “silencioso” do líder positivo e “ruidoso” do líder negativo (do ponto de vista da emissão de radiação em VHF) pode ser a explicação do porque os sistemas de mapeamento em VHF só conseguem identificar os líderes negativos. Assim, em todos os mapas de radiação mostrados a seguir, os canais desenvolvidos durante a propagação dos líderes positivos puderam ser inferidos graças ao mapeamento da radiação emitida pelos *recoil leaders* percorrendo-os a partir das extremidades dos líderes positivos em direção ao ponto de iniciação do líder bi-

direcional. Vários processos do relâmpago estão associados ao *recoil leader*. Ao se propagar em direção ao ponto de interrupção do canal de uma descarga de retorno prévia o *recoil leader* é denominado líder contínuo (*dart leader*) caso ocorra a reconexão do canal ao solo e uma nova descarga de retorno ocorra. Quando o *recoil leader* falha em alcançar o solo é denominado “*attempted leader*”. Nos casos em que o *recoil leader* é desviado do canal da descarga de retorno anterior e passa a procurar um novo caminho para o solo é denominado líder contínuo-escalonado (*dart-stepped leader*).

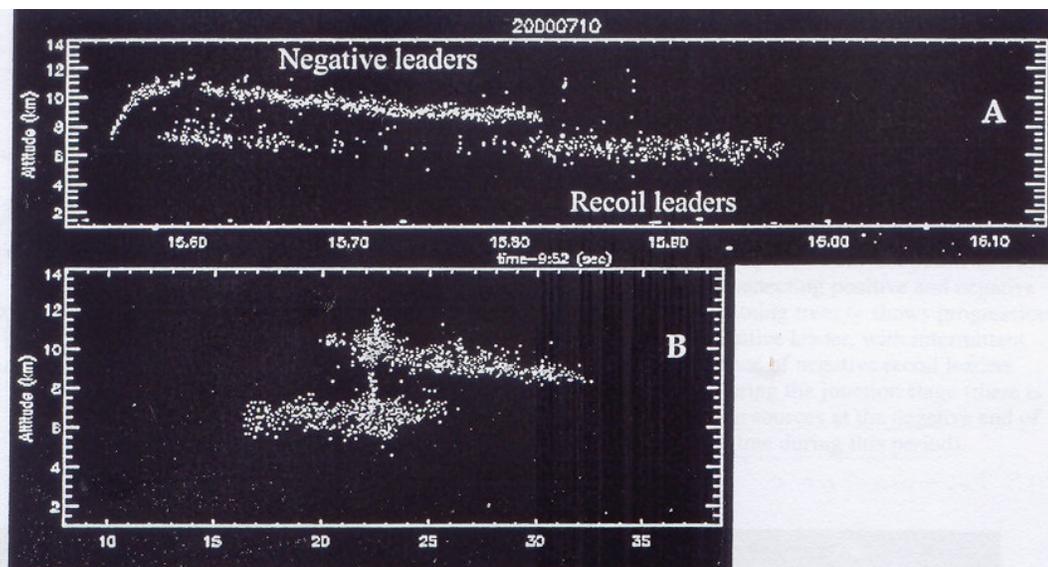


Figura 4.15 - Mapa da radiação de um relâmpago intranuvem. Os painéis A e B retratam, respectivamente, a altitude (km) x tempo (s) e a altitude (km) x distância (km) da progressão das fontes de radiação.

Fonte: Adaptada de Mazur (2002).

Recentemente, Saba et al. (2008), utilizando uma câmera de alta velocidade, registrou em vídeo a propagação de *recoil leaders* em um relâmpago nuvem-solo positivo. As imagens da Figura 4.16, a seguir, mostram o movimento retrógrado do *recoil leader* percorrendo o canal do líder positivo cuja luminosidade já se mostrava bastante fraca.

O mapa da radiação do relâmpago na Figura 4.15 é indicativo da clássica estrutura tripolar de carga em uma nuvem de tempestade, com uma região de carga espacial positiva superior numa altitude de 9-11 km, uma região de carga espacial negativa inferior numa altitude de 6-7 km e uma região mais baixa de carga positiva na base da nuvem.

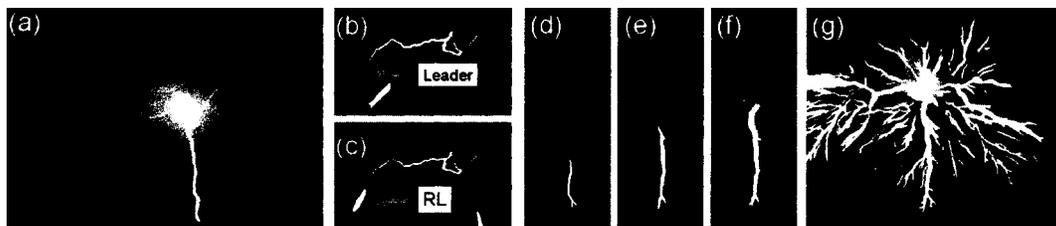


Figura 4.16 - Relâmpago nuvem-solo positivo ocorrido em 22 de julho de 2007, em *South Dakota, USA*. Em (c) o *recoil leader* está re-iluminando o trecho fracamente iluminado do líder positivo mostrado em (b). O movimento retrógrado do *recoil leader* é mostrado em (d), (e) e (f). Em (g) estão mostradas todas as imagens, integradas no tempo, da descida do líder positivo.

Fonte: Adaptada de Saba et al. (2008).

O esboço conceitual na Figura 4.17 provê a interpretação do mapa da radiação do relâmpago da Figura 4.15. A fonte de onde as figuras foram retiradas (MAZUR, 2002) aponta a inversão de polaridade de uma figura em relação à outra.

O estágio inicial do relâmpago intranuvem corresponde ao desenvolvimento bi-direcional do líder bipolar, com o líder negativo em uma extremidade da árvore bipolar do relâmpago e o líder positivo na outra, prosseguindo em direções opostas (períodos de  $t_1$  a  $t_4$  na Figura 4.17). O estágio de junção do relâmpago (período  $t_5$  na Figura 4.17) corresponde também ao desenvolvimento bi-direcional, o qual toma lugar, no entanto, somente na parte positiva da árvore bipolar do relâmpago (a partir do ponto de origem do relâmpago para fora),

desta vez com líderes positivos e líderes de retorno negativos progredindo em direções opostas. Durante ambos os estágios do relâmpago, os sistemas de mapeamento detectam somente a radiação dos líderes negativos iniciais e dos líderes de retorno negativos, mas não a fraca radiação dos líderes positivos.

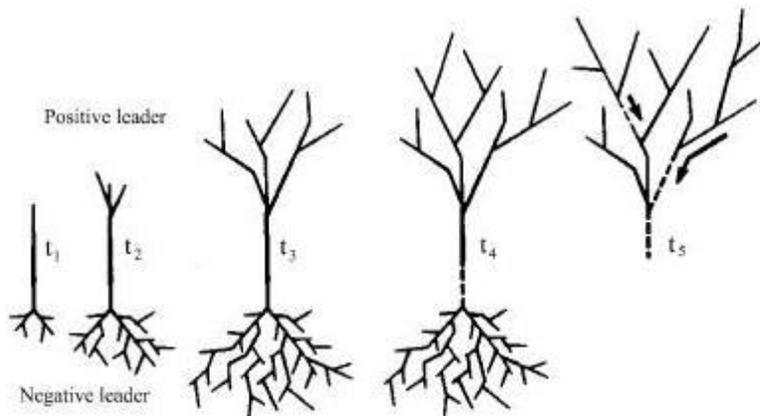


Figura 4.17 - Desenvolvimento de uma árvore bi-direcional de um típico relâmpago intranuvem composta de líderes positivos na parte superior e líderes negativos na parte inferior. Estão retratadas as estruturas correspondentes às fontes de radiação em um dado período de tempo.  $t_1$  mostra a iniciação de um líder bipolar e bi-direcional;  $t_2$ - $t_4$  mostra a ramificação e progressão do líder bi-direcional durante o estágio inicial do relâmpago;  $t_4$  mostra a interrupção da corrente no canal-tronco conectando as partes negativa e positiva da árvore do relâmpago;  $t_5$  mostra a progressão do líder positivo com a ocorrência de líderes de retorno negativos intermitentes (setas) durante o estágio de junção (não existem fontes de radiação na extremidade negativa da árvore durante esse período).

Fonte: Adaptada de Mazur (2002).

Um típico relâmpago nuvem-solo negativo com múltiplas descargas exibe desenvolvimento cíclico, cada ciclo consistindo da propagação na direção descendente de um líder negativo escalonado ou de um líder negativo contínuo para o solo, seguido pelo desenvolvimento dentro da nuvem do líder positivo.

Admitindo-se que líderes toquem o solo, o número de tais ciclos é igual ao número de descargas de retorno. A descarga de retorno energiza o desenvolvimento do líder positivo unidirecional, o qual continua mesmo depois de ocorrer a interrupção da corrente no canal para o solo (período  $t_5$  na Figura 4.18). Esse estágio é similar ao estágio de junção do relâmpago intranuvem, com o desenvolvimento bi-direcional de líderes positivos e líderes de retorno negativos. Nos relâmpagos nuvem-solo, a radiação do líder de retorno segue e também coincide com o desenvolvimento do líder positivo dentro da nuvem depois da primeira e subseqüentes descargas de retorno. Líderes contínuos são aqueles líderes de retorno que alcançaram o solo.

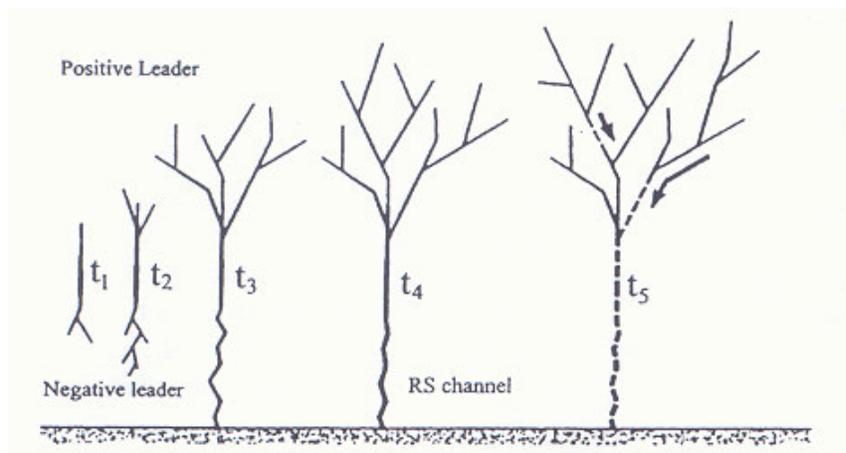


Figura 4.18 - Desenvolvimento de uma 'árvore' de relâmpago bi-direcional e bipolar em um relâmpago CG negativo composta de líderes positivos acima e líderes negativos abaixo.  $t_1$  mostra a iniciação de um líder bipolar e bi-direcional;  $t_2$  mostra a progressão do líder bi-direcional;  $t_3$  mostra o contato com o solo do líder negativo;  $t_4$  mostra a descarga de retorno;  $t_5$  mostra a interrupção da corrente e a progressão do líder positivo com a ocorrência de líderes de retorno negativos intermitentes (setas) viajando em direção à origem do relâmpago.

Fonte: Adaptada de Mazur (2002).

## 4.5 A interrupção do canal.

### 4.5.1 Stan Heckman e o efeito da extensão do canal e da corrente contínua.

Stan Heckman (1992) criou um critério simples para distinguir relâmpagos compostos de descargas discretas daqueles caracterizados por uma corrente contínua em uma descarga única.

Heckman (1992) analisou a estabilidade da corrente em um longo canal de relâmpago interligando a nuvem de tempestade carregada eletricamente e o plano condutor formado pela superfície da Terra. Segundo Heckman (1992), a extensão do canal dentro do campo elétrico criado pela carga espacial da nuvem de tempestade provê uma fonte de corrente quase estável. O canal do relâmpago é caracterizado por uma capacitância e uma resistência não linear. A capacitância para um longo e fino condutor de comprimento  $L$  e raio  $r$  é dada por:

$$C = 2\pi\epsilon_0 L / [\ln(L/r)] \quad \text{farads} \quad (4.1)$$

A resistência do canal, por unidade de comprimento,  $R = E/I$  é assumida seguir a resistência diferencial negativa observada em laboratório para arcos no ar (KING, 1961), como mostrado pelo gráfico de corrente x voltagem da Figura 4.19.

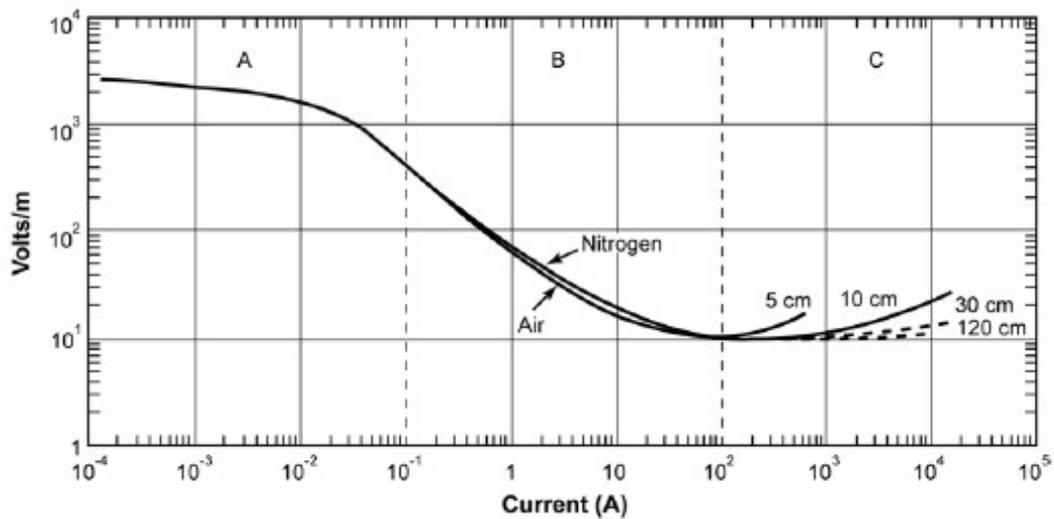


Figura 4.19 - Relação entre corrente e voltagem para um arco elétrico no ar, mostrando a resistência diferencial negativa: quanto maior a corrente menor a resistência.

Fonte: Adaptada de Heckman (1992).

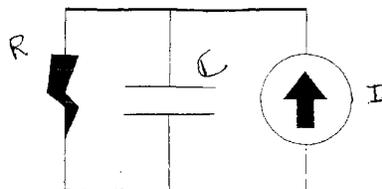


Figura 4.20 - Circuito equivalente de um canal de relâmpago para o solo. A extensão continuada do relâmpago dentro da nuvem carregada constitui a fonte de corrente  $I$ , a capacitância do canal, por unidade de comprimento, vezes o comprimento do canal é o capacitor  $C$  e a resistência não linear, por unidade de comprimento, vezes o comprimento do canal é a resistência total do arco  $R$ .

Fonte: Adaptada de Heckman (1992).

O circuito equivalente para a alimentação de corrente no canal do relâmpago para o solo é mostrado na Figura 4.20, com a fonte de corrente em paralelo

com a capacitância do canal por unidade de comprimento e a resistência não-linear por unidade de comprimento  $R$ .

Assume-se que o canal perde energia através dos processos de condução, convecção turbulenta e irradiação, todos agregados juntos em uma determinada constante de tempo termodinâmica  $\tau$  tomada de observações empíricas de laboratório por Frind (1960) e mostrada quantitativamente na Figura 4.21.

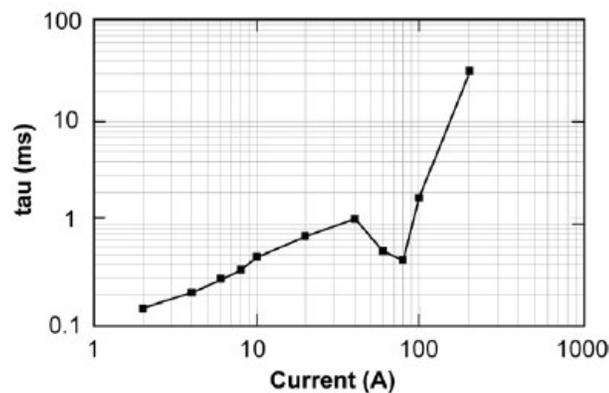


Figura 4.21 - Constante de tempo termodinâmica  $\tau$  de um arco elétrico em série com uma fonte de voltagem.

Fonte: Adaptada de Frind (1960).

De acordo com Heckman (1992), a análise linear do circuito da Figura 4.20 resulta em um simples critério, comparando-se a constante de tempo elétrica 'RC' e a constante de tempo termodinâmica ' $\tau$ ', separando o comportamento estável ( $RC < \tau$ ; corrente contínua prolongada) do instável ( $RC > \tau$ ; diminuição da corrente até sua interrupção, seguida pelo aumento do campo elétrico e uma nova descarga de retorno).

Segundo Heckman (1992), a condição instável pode ser entendida como uma resposta não-linear a um declínio da corrente – a resistência do canal aumenta e a corrente no arco continua a diminuir até promover a completa interrupção

do canal. O critério quantitativo de instabilidade é ilustrado em duas medidas-chave do relâmpago, o comprimento do canal  $L$  e a corrente do canal  $I$ , na Figura 4.22.

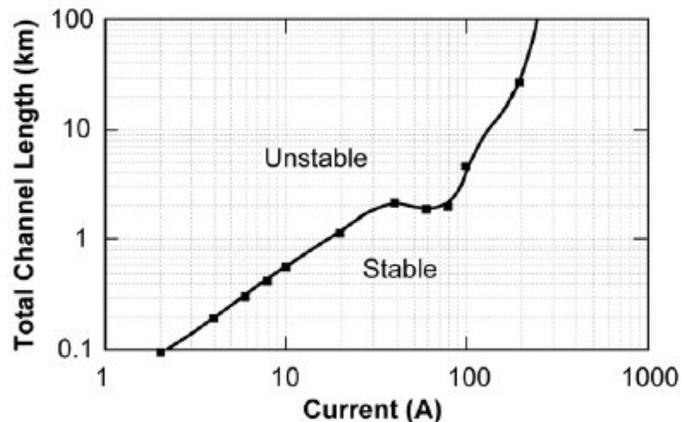


Figura 4.22 - Diagrama de estabilidade para um canal de relâmpago representado pelo circuito equivalente da Figura 4.20. Comportamento instável com interrupção da corrente na parte superior esquerda da linha de estabilidade; comportamento estável com corrente contínua na parte inferior direita da linha de instabilidade.

Fonte: Adaptada de Heckman (1992).

Descargas múltiplas são favorecidas por ambos, pequenas correntes entre descargas e por canais longos. Correntes contínuas prolongadas são favorecidas por grandes correntes entre descargas e por canais curtos.

Testes dessas previsões teóricas usando medidas de relâmpagos obtidas da literatura são mostrados na Figura 4.23. Os quadrados cheios representam comportamento estável com corrente contínua e os vazios representam comportamento instável com descargas discretas. Segundo Heckman (1992), a linha de estabilidade divide esses dois conjuntos experimentais com uma boa aproximação, com poucos pontos fora da curva.

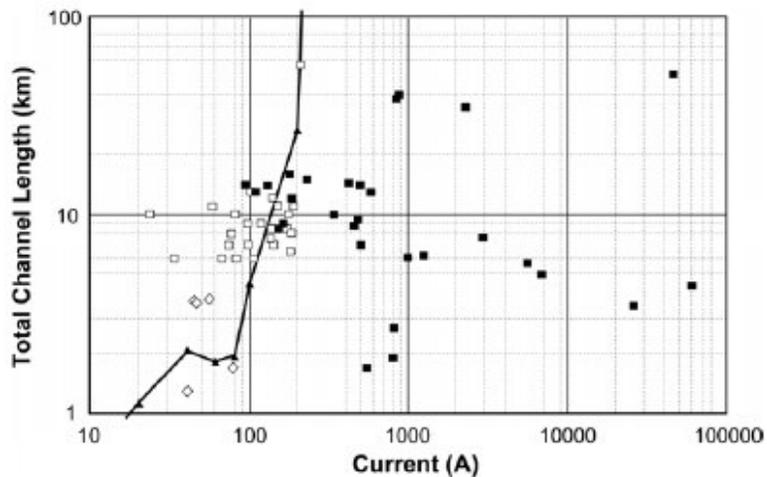


Figura 4.23 - Diagrama de estabilidade da Figura 4.22, mas agora em comparação com observações de nuvens de tempestade obtidas da literatura. Quadrados vazios representam cenários com descargas discretas e sem corrente contínua. Quadrados cheios representam cenários com corrente contínua.

Fonte: Adaptada de Heckman (1992).

A análise de Heckman (1992) provê uma base quantitativa para o quadro qualitativo antecipado por Malan e Schonland (1951) de que relâmpagos têm múltiplas descargas devido ao canal tornar-se resistivo e no final das contas tornar-se interrompido, enquanto a extremidade superior do canal continua a se estender no campo elétrico local. O quadro inicial de Schonland (1938) que o relâmpago é composto de descargas discretas devido às cargas na nuvem estarem em pacotes discretos não é corroborada pela análise precedente.

#### 4.5.2 Mazur e o efeito do “estrangulamento” do campo elétrico

Mazur (2002) propôs um mecanismo para explicar a diminuição da corrente fluindo no canal principal a partir do solo, em função do desenvolvimento do líder ramificado no interior da nuvem de tempestade.

Esse mecanismo é baseado no efeito do “estrangulamento” do campo. As múltiplas ramificações do desenvolvimento do líder poderiam esconder (como um guarda-chuvas) o campo elétrico das camadas mais baixas da ramificação, desse modo estrangulando ou impedindo o desenvolvimento dos ramos mais baixos. Isso afeta a distribuição do potencial da nuvem próximo ao canal principal, bem como o valor da corrente e da distribuição de carga e reduz a corrente no canal principal, conforme mostra a Figura 4.24 a seguir.

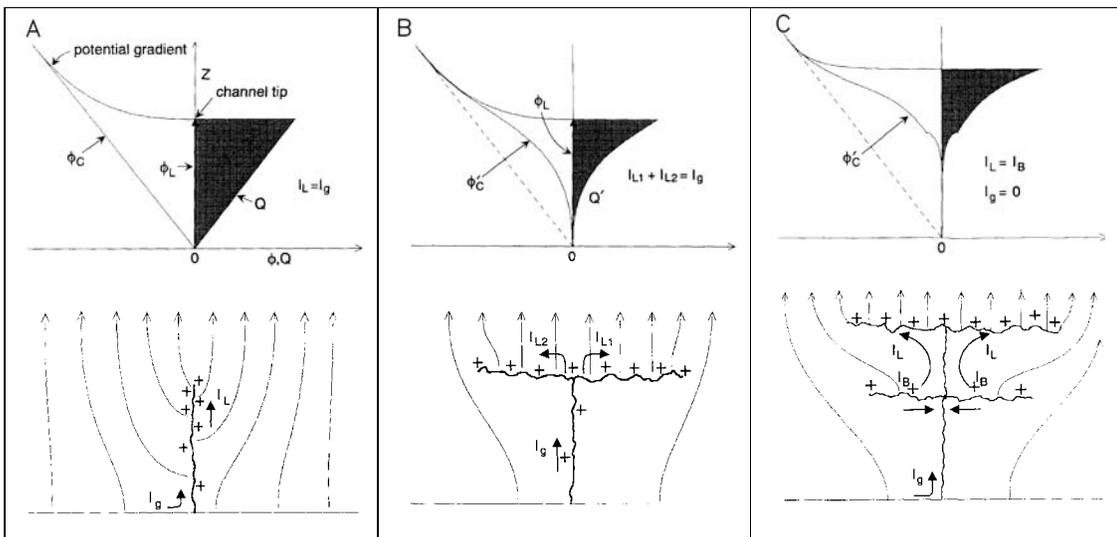


Figura 4.24 - O conceito de proteção da corrente ou “estrangulamento” do campo no canal principal pelas múltiplas camadas de ramificação superior.

Fonte: Adaptada de Mazur (1995).

Os painéis A, B e C representam (na parte superior de cada painel) os estágios da distribuição do potencial na nuvem,  $\phi_C$ , a carga induzida no canal principal (vertical),  $Q$ , e, na parte mais baixa de cada painel, as linhas de campo elétrico, a corrente no canal principal  $I_g$ , e a primeira e segunda camadas de ramificação,  $I_L$  e  $I_B$ , respectivamente. O painel C ilustra como a corrente no canal principal  $I_g$  está decrescendo para o estágio de interrupção como um resultado da distribuição da corrente gerada pelo desenvolvimento mais alto

dos ramos entre os estrangulados (mas ainda condutivos) ramos mais baixos e o canal para o solo.

O processo descrito pode levar, eventualmente, à interrupção da corrente quando seu valor cai abaixo de 100 A, de acordo com a hipótese de Heckman (1992), ou abaixo de 30 A, segundo Mazur (comunicação pessoal, 2007).

#### **4.6 – Comportamento da ionização do canal durante o intervalo entre descargas**

Brook et al. (1962), de acordo com o comentado por Uman e Voshall (1968), sugeriram que deveria ser necessário que uma pequena e estável corrente fluísse no canal do relâmpago durante o intervalo entre descargas, de maneira a manter um nível de ionização suficiente para permitir que um líder contínuo viesse a utilizar o caminho percorrido pela descarga de retorno imediatamente anterior.

Loeb (1966), ainda de acordo com o comentado por Uman e Voshall (1968), sugeriu que ondas ionizantes deveriam viajar pelo canal do relâmpago durante o período entre descargas, mantendo o grau de ionização a um nível mínimo necessário para suportar o líder contínuo.

Uman e Voshall (1968), no entanto, mostram que nenhum dos mecanismos acima sugeridos é necessário. Mostram, ainda, que o decaimento da temperatura no canal do relâmpago é suficientemente lento para que uma temperatura e uma condutividade elétrica apreciáveis persistam dezenas de milissegundos depois do “efetivo término da corrente” no canal do relâmpago. Os autores definem o “efetivo término da corrente” como o instante no qual a corrente no canal cai a um valor suficientemente baixo de tal modo que a energia injetada por ela é pequena comparada com a energia dissipada pelo canal. Uman e Voshall (1968) analisaram o decaimento da temperatura e as

possíveis variações do raio e da densidade de partículas no canal do relâmpago, de modo a determinar se o nível de ionização existente (e, conseqüentemente, a condutividade elétrica) favorece a iniciação e propagação de um líder contínuo depois de decorrido o intervalo de tempo típico de 40 ms entre o efetivo término da corrente de uma determinada descarga de retorno e o líder contínuo subsequente.

Eles assumiram que a temperatura do canal do relâmpago varia de valores iniciais na faixa de 8000°K a 14000 °K, encontrados no estágio final da descarga de retorno (efetivo término da corrente no canal), para um valor final, imediatamente anterior à ocorrência de um novo líder contínuo, de cerca de 3000°K.

Uman e Voshall (1968) mostram em seu trabalho que o intervalo de tempo para o canal de uma descarga decair de uma dada temperatura inicial para uma dada temperatura final é aproximadamente proporcional ao quadrado do raio do canal. Eles encontraram que, para a temperatura do canal decair da faixa inicial de 8000°K a 14000 °K para uma temperatura final de 3000°K, o tempo envolvido para um canal de raio 1,0 cm é de 15 a 20 ms, e para um canal de raio 2,0 cm de 60 a 80 ms. Canais com raio acima de 4,0 cm gastam um tempo superior a 150 ms para diminuir da faixa de temperatura inicial de 8000°K a 14000°K para uma temperatura final de 3000°K.

Eles assumem que próximo a 3000°K o canal do relâmpago está pronto para um líder contínuo, uma vez que o intervalo médio típico entre uma determinada descarga e o líder contínuo subsequente, ainda segundo Uman e Voshall (1968), é 40 ms com a maioria dos valores estando dentro da faixa de 10 a 100 ms, com uma condutividade, ao final desse período, que favorece a passagem do líder contínuo.

A condutividade do ar à pressão de 1 atmosfera como uma função da temperatura é mostrada na Tabela 4.3. Esses dados foram calculados por Yos (1963), conforme relatado por Uman e Voshall (1968), assumindo que o ar não contém vapor de água.

Tabela 4.3 - Condutividade elétrica de equilíbrio do ar seco a 1 atmosfera, conforme calculada por Yos (1963).

Temperatura	Condutividade Elétrica
°K	mhos/cm
2000	$9,98 \times 10^{-9}$
3000	$2,14 \times 10^{-4}$
4000	$2,43 \times 10^{-2}$
5000	$2,94 \times 10^{-1}$
6000	1,13
7000	3,90
8000	10,4
9000	19,0
10000	27,3

Fonte: Adaptada de Uman e Voshall (1968).

A condutividade elétrica a 4000°K é cerca de  $10^{-2}$  mhos/cm. O canal a 4000°K é, portanto, um condutor ruim. A 2000°K a condutividade elétrica é cerca de  $10^{-8}$  mhos/cm. O canal a 2000°K é, essencialmente, um não condutor.

Na sua análise do decaimento do canal os autores assumem que as perdas de calor por radiação e por convecção são negligenciáveis. O principal mecanismo de perda de calor e o conseqüente decaimento do canal do relâmpago é, segundo os autores, a condução térmica.

No capítulo seguinte será mostrado que estudos posteriores indicam um intervalo médio entre descargas de 60 ms (RAKOV et al., 1997; SABA et al., 2006). Porém, a manutenção da ionização no canal durante um intervalo de cerca de 40 ms, permitindo que o próximo líder dele faça uso, conforme proposto por Uman e Voshall (1968), é um dos fatores que torna possível o mecanismo, proposto no Capítulo 7, de retorno para o canal “original” depois da ocorrência de uma descarga seguindo um novo canal para o solo.

## 5 EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS DADOS

### 5.1 Introdução

O foco desse trabalho concentra-se no estudo das características das descargas de retorno, em relâmpagos nuvem-solo negativos, que seguem um caminho para o solo diferente, ao menos em parte do trajeto, do caminho seguido pela descarga anterior. É proposta, de forma inédita, uma explicação para o processo físico que leva à criação de um novo canal em um relâmpago nuvem-solo negativo, bem como para o processo que leva ao retorno da utilização de um canal pré-existente depois de uma descarga de retorno tê-lo abandonado, criando um novo canal.

A Figura 5.1, a seguir, mostra um exemplo de duas descargas consecutivas de um relâmpago nuvem-solo negativo, separadas por um intervalo de tempo de aproximadamente 2ms, atingindo pontos diferentes no solo.

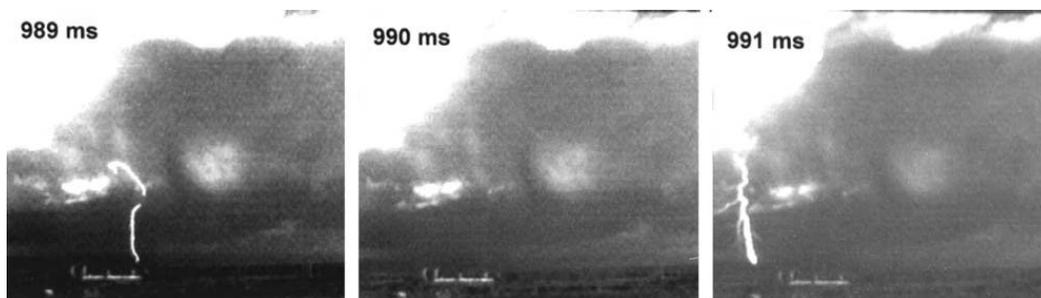


Figura 5.1 – Seqüência de imagens obtidas com uma câmara de alta velocidade mostrando duas descargas atingindo pontos distintos de impacto no solo.

Fonte: Adaptada de Saba et al. (2006a).

O exemplo mostrado na Figura 5.2, a seguir, mostra a criação de um novo canal e o retorno da descarga subsequente para o canal anterior ao que seguiu um novo caminho para o solo (o canal “original”).

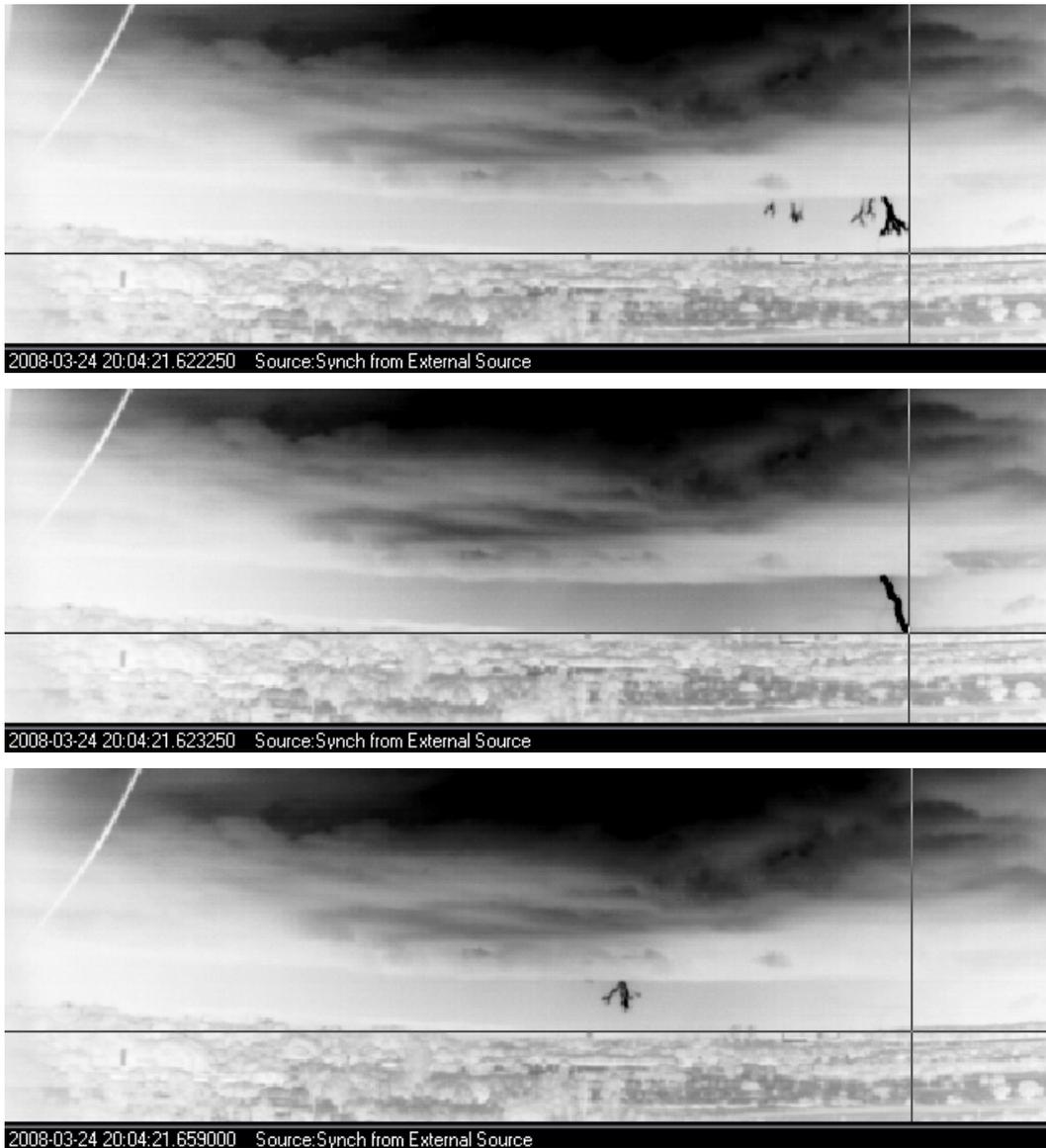


Figura 5.2 – Seqüência de imagens obtidas com uma câmara de alta velocidade mostrando a criação de um novo canal e o retorno para o canal “original”. No canto inferior esquerdo de cada quadro são informados a data e o horário de ocorrência da descarga com precisão de microssegundos. (continua)

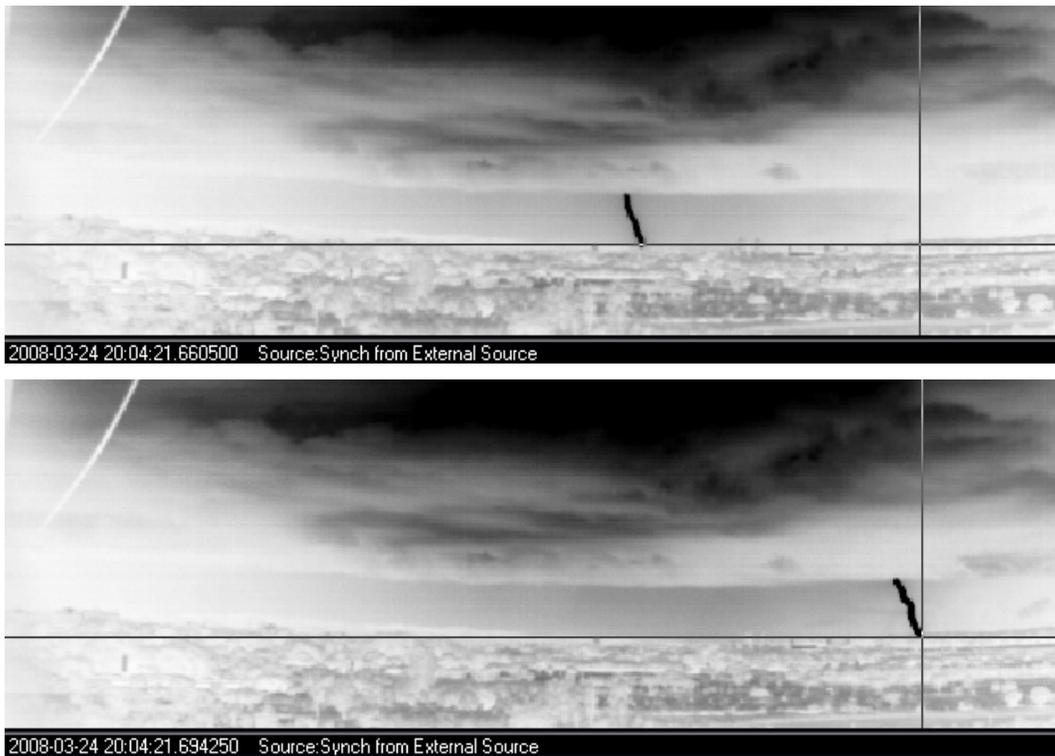


Figura 5.2 – (conclusão)

A seguir são descritos os equipamentos utilizados durante as campanhas realizadas para obtenção dos registros dos eventos de relâmpagos, base de dados na qual se apóia esse trabalho. Será descrita, também, a metodologia empregada na análise dos dados.

## 5.2 Equipamentos

### 5.2.1 Câmeras de alta velocidade

As gravações de vídeo foram feitas com duas câmeras de alta velocidade, uma *Red Lake 8000S Motion Scop* ajustada para gravar seqüências de imagens a uma taxa de 1000 quadros por segundo (com tempo de exposição de 1 ms) e uma *Photron Fastcam-512PCI* ajustada para gravar seqüências de imagem a uma taxa de 4000 quadros por segundo (com um tempo de exposição de 250

$\mu\text{s}$ ) e, em alguns casos, ajustada para gravar a uma taxa de aquisição de 8000 quadros por segundo (com um tempo de exposição de 125  $\mu\text{s}$ ).

O disparo para início de gravação é feito através do acionamento de uma chave manual no instante em que o observador enxerga um relâmpago. É criado, então, um arquivo contendo as imagens relativas a um intervalo de tempo de 1 s anterior ao instante do disparo e as imagens registradas no intervalo de 1 s após o instante do disparo, ou seja, o arquivo armazena um total de 2 s de gravação. O intervalo de 1s anterior ao momento do disparo mostrou ser longo o suficiente para prevenir a perda da primeira descarga de retorno devido ao tempo reflexo do operador da câmera (intervalo de tempo de reação do operador, compreendido entre a observação do relâmpago e o acionamento do dispositivo de disparo da gravação). Berger et al. (1975) encontrou em seu estudo uma duração média para os relâmpagos de 180 ms. Diendorfer et al. (1998) encontrou 175 ms e Saba et al. (2006a) 163 ms, sendo que a máxima duração observada neste último estudo foi 1356 ms em um relâmpago que produziu 16 descargas de retorno. Portanto, o tempo total de gravação de 2s é suficientemente longo para capturar um evento de relâmpago completo. Cada seqüência de imagens armazenada num arquivo de dados pode ser analisada posteriormente utilizando-se um software adequado. É possível reproduzir a seqüência de imagens em várias velocidades de maneira a se analisar os movimentos em detalhe, inclusive quadro a quadro.

As imagens de vídeo das câmeras de alta velocidade são sincronizadas por GPS com precisão de  $\pm 250$  ns. Essa sincronização permite a correlação das imagens de vídeo de cada relâmpago com os registros de campo elétrico e com as informações do sistema de detecção e localização de relâmpago.

As Figuras 5.3 e 5.4 a seguir mostram o equipamento e a montagem do sistema para aquisição de imagens das câmeras *Red Lake 8000S Motion Scop* e *Photron Fastcam-512PCI* respectivamente.

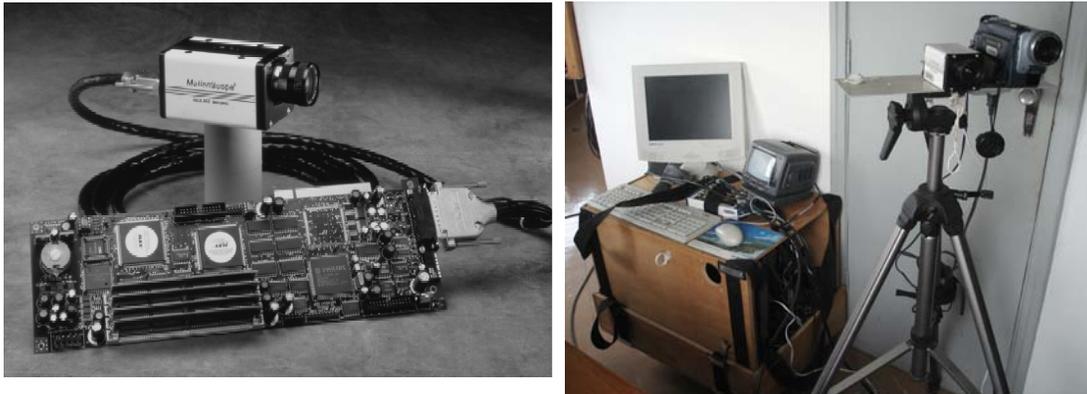


Figura 5.3 – Red Lake 8000S Motion Scope.



Figura 5.4 – Photron Fastcam-512PCI.

A Figura 5.5, a seguir, mostra uma seqüência de imagens obtidas com uma câmera rápida.

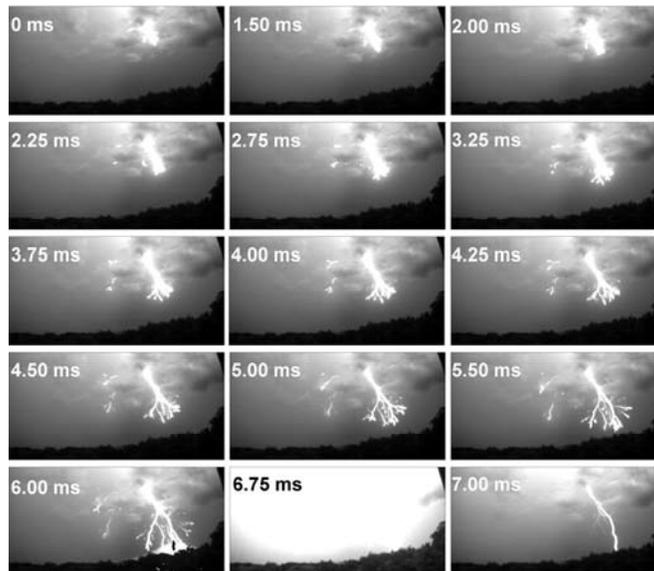


Figura 5.5 – Exemplo de registro da propagação de um líder nuvem-solo negativo, a 4.000 quadros por segundo (alguns quadros foram omitidos), até tocar o solo e a descarga de retorno preencher o quadro com uma luminosidade intensa.

### 5.2.2 Antena rápida de campo elétrico

Uma antena rápida tipo prato (“*fast flat antenna*”) é usada para registrar as variações do campo elétrico causadas pela descarga elétrica atmosférica. A antena rápida de campo elétrico trabalha na faixa de frequência de 306 Hz a 1,5 MHz, com tempo de decaimento de 0,5 ms e taxa de aquisição de 5.000.000 amostras por segundo (5 MS/s), o que implica num intervalo entre amostragens de 200 ns. Essa excelente resolução temporal permite uma reprodução da forma de onda do campo elétrico rica em detalhes o que, por sua vez, permite a identificação da “assinatura” do campo elétrico característica de cada um dos processos que compõem o relâmpago. Permite, também, medidas mais confiáveis da variação na amplitude do campo elétrico durante a ocorrência desses processos.

A calibração da antena é feita aplicando-se um valor conhecido de campo através de um prato colocado a uma distância conhecida acima da antena, conforme pode ser visto na Figura 5.6 a seguir.

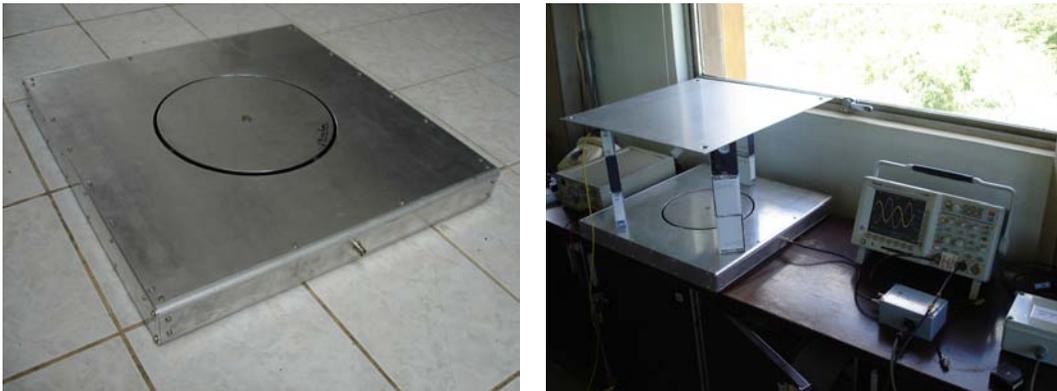


Figura 5.6 – São mostrados, na figura à esquerda, a antena tipo prato e, à direita, a calibração do sistema de medição do campo.

O esquema de montagem do sistema utilizado para medição do campo elétrico é mostrado na Figura 5.7, a seguir.

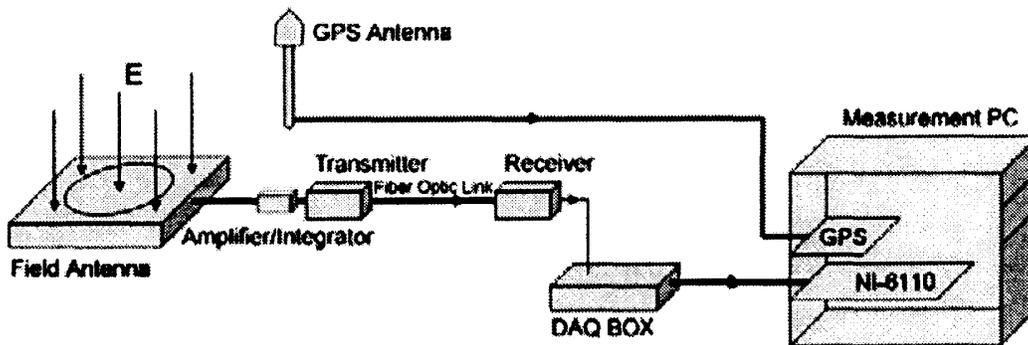


Figura 5.7 – Esquema de montagem do sistema de medição do campo elétrico.

Fonte: Schulz (2006).

A Figura 5.8, a seguir, mostra um exemplo de registro das variações do campo elétrico de um relâmpago completo, com 5 descargas de retorno, feito com a antena rápida utilizada neste trabalho.

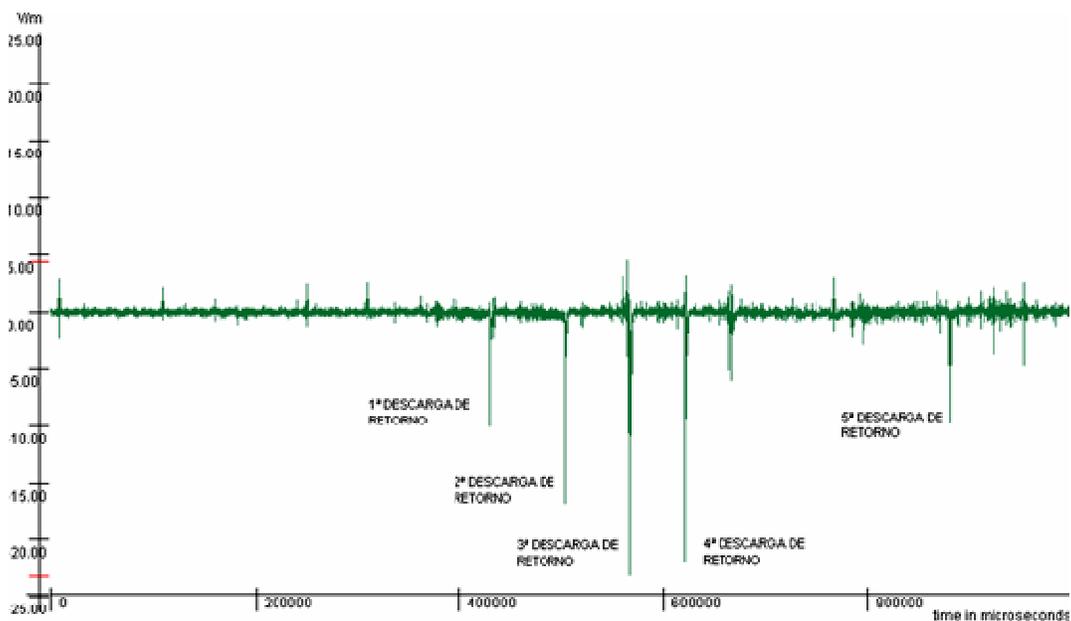


Figura 5.8 – Exemplo de registro das variações do campo elétrico de um relâmpago de multiplicidade 5 feito com uma antena rápida.

O *software* utilizado para análise do registro de campo obtido a partir da antena rápida permite ampliar a escala de tempo do registro, tornando possível identificar detalhes dos processos que ocorrem durante o desenvolvimento do relâmpago. Por exemplo, a Figura 5.9, a seguir, mostra a terceira descarga de retorno do mesmo relâmpago mostrado na figura anterior, numa escala de tempo ampliada. Pode-se observar as variações de campo típicas de um processo de *breakdown* antecedendo a descarga de retorno que seguiu um novo canal para o solo.

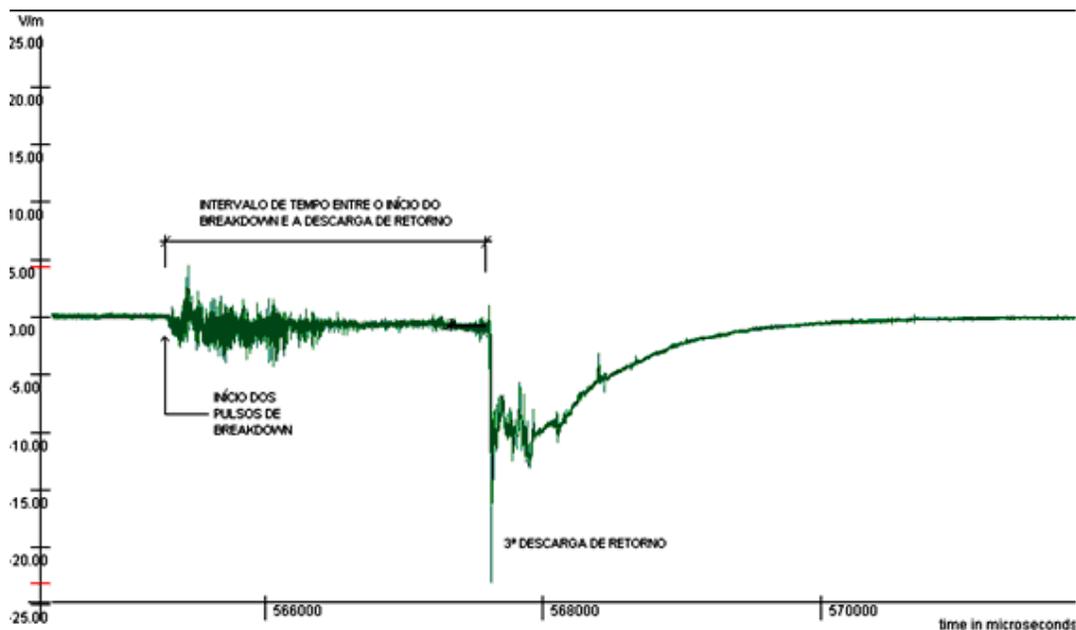


Figura 5.9 – Exemplo de registro, em escala ampliada, das variações do campo elétrico de uma descarga subsequente que seguiu um novo caminho para o solo.

### 5.2.3 Rede brasileira de detecção de descargas atmosféricas – BrasilDat.

Um consórcio entre 2 empresas do setor elétrico (Companhia Energética de Minas Gerais, CEMIG, e Furnas Centrais Elétricas) e 2 institutos de pesquisa (Sistema Meteorológico do Paraná, SIMEPAR, e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE) deu origem a uma rede de detecção de relâmpagos, denominada RINDAT (Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas), composta por 25 sensores com uma área de cobertura de seis Estados do país: SP, RJ, ES, MG, GO e MS.

Essa configuração permaneceu até 2006, quando foram integrados ao sistema de detecção existente os sensores do SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia), ao norte, e da SIDDEM (Sistema de Informações integradas baseado no sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas) ao sul do país. O novo consórcio passou a se denominar BrasilDat (Rede Brasileira de

Detecção de Descargas Atmosféricas), que possui atualmente um total de 45 sensores instalados em doze Estados do país: RS, SC, PR, SP, RJ, ES, MG, GO, MS, TO, MA e PA (coberto parcialmente). A Figura 5.10, a seguir, mostra não apenas a nova configuração de sensores da BrasilDat como a área de cobertura do sistema.

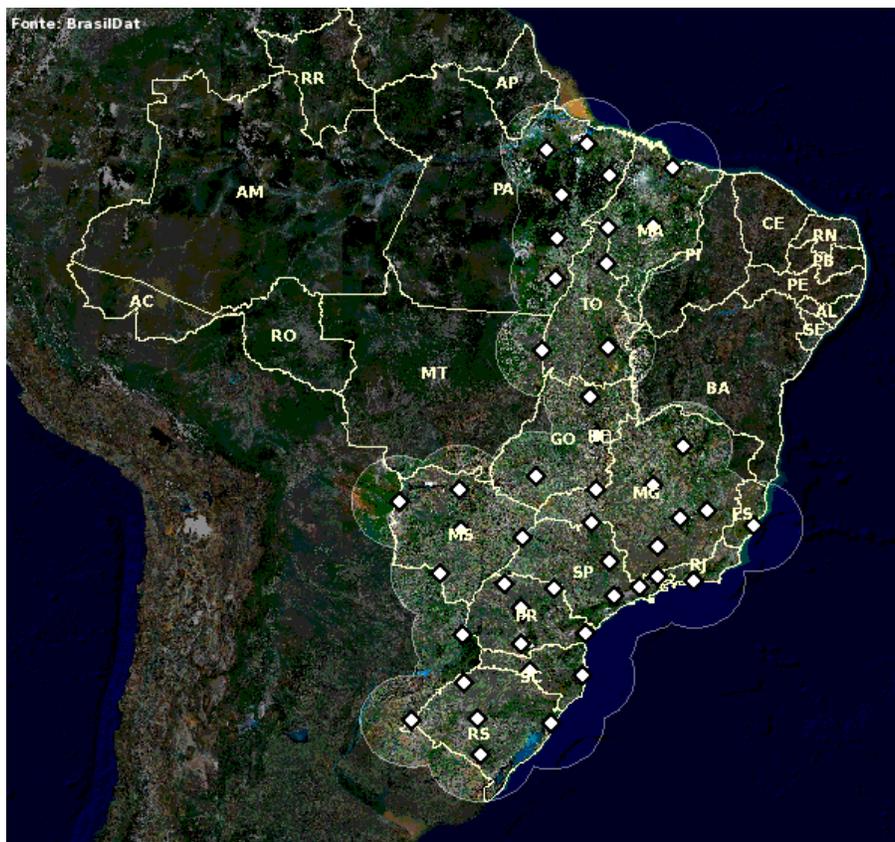


Figura 5.10 – Rede Nacional de Detecção e Localização de Relâmpagos - BrasilDat. Os losangos brancos indicam a localização dos sensores. Fonte: BrasilDat (2008).

À medida que os sensores vão registrando a ocorrência de descargas atmosféricas, enviam os parâmetros da radiação eletromagnética medidos para diversas centrais de processamento, as quais calculam a localização e os

principais parâmetros físicos da descarga (polaridade, multiplicidade, pico de corrente, entre outros).

Atualmente existem quatro centrais de processamento interligadas que recebem os dados dos sensores da rede: uma em Curitiba/PR do SIMEPAR, outra em Belo Horizonte/MG da CEMIG, uma terceira no Rio de Janeiro/RJ de Furnas e a quarta no INPE em São José dos Campos. A BrasilDat é uma rede híbrida, ou seja, é composta por sensores da linha LPATS (*Lightning Positioning And Tracking System*) e da linha ALDF (*Advanced Lightning Direction Finder*).

Os sensores LPATS, utilizam apenas o método de detecção por tempo de chegada - TOA (*Time-Of-Arrival*), e os sensores ALDF utilizam o método IMPACT (*IMProved Accurace from Combined Technology*), daí serem conhecidos simplesmente por sensores IMPACT. A tecnologia IMPACT combina o método TOA com o método MDF (*Magnetic Direction Finder*) que mede as componentes ortogonais do campo magnético radiado pela descarga (através de duas antenas ortogonais na forma de *loop*), o que lhe permite fornecer a direção (ou azimute) da fonte de radiação em relação ao norte geográfico. Desta forma, os sensores IMPACT, além de serem mais modernos que os LPATS, com inúmeras melhorias em seus circuitos internos, algoritmos de processamento e critérios de discriminação de descargas intranuvem, possibilitam uma redundância de informações (por combinarem as tecnologias TOA e MDF) que melhora o processo de otimização da solução pelas centrais de processamento e minimiza as limitações inerentes de cada tecnologia quando empregadas separadamente.

A Figura 5.11, a seguir, mostra uma das possíveis visualizações dos dados obtidos a partir da rede de sensores da BrasilDat. Além da divisão geopolítica do país mostrada nessa figura (opção feita para não tornar a imagem muito pesada), o sistema está integrado ao serviço *Google Maps* o que permite

apresentar na tela do sistema imagens de satélite mostrando o relevo de cada região. Também pode ser apresentada na tela do sistema a localização dos sensores. Essas duas opções de apresentação são mostradas na Figura 5.10 anterior.

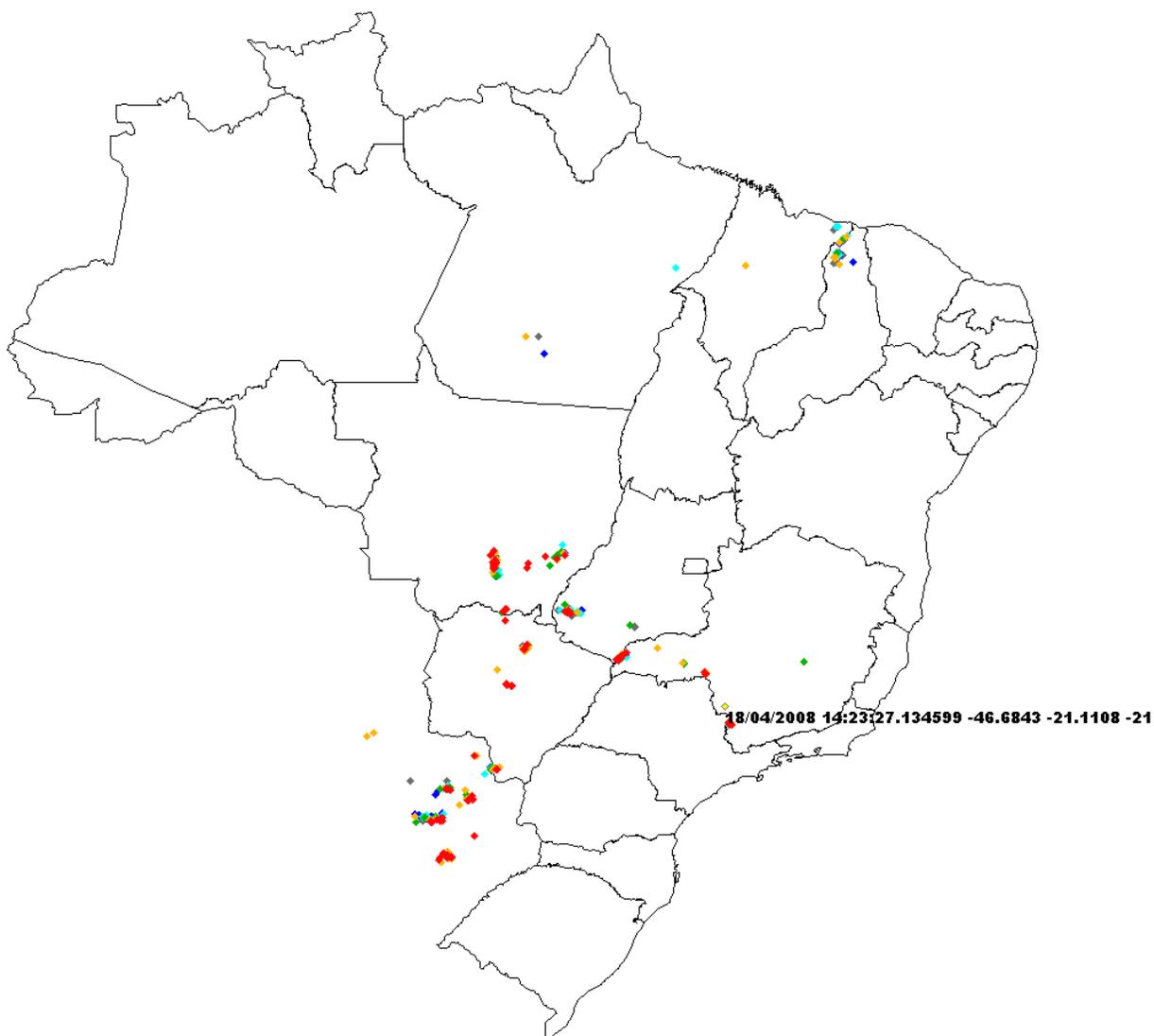


Figura 5.11 – A data, horário, latitude, longitude, polaridade e pico de corrente referentes a um dos relâmpagos localizados são mostradas na tela do sistema.

Fonte: BrasilDat (2008).

Como exemplo das informações fornecidas pela BrasilDat, a Figura 5.11 mostra os relâmpagos ocorridos no período de uma hora anterior ao horário da consulta. Um código de cores é usado para indicar a evolução temporal da ocorrência dos relâmpagos. Os mais recentes, ocorridos nos últimos 15 minutos, são mostrados em vermelho, os que ocorreram entre 15 e 30 minutos são mostrados em amarelo e assim sucessivamente. Associado a cada evento de relâmpago o sistema pode informar na tela: i) a data da ocorrência; ii) o horário da ocorrência com precisão de microssegundos; iii) a localização (latitude e longitude); iv) a polaridade e v) a estimativa do pico de corrente.

### **5.3 Metodologia de análise dos dados**

#### **5.3.1 – Dados coletados**

Foram analisados os registros de relâmpagos que fazem parte de um banco de dados do Grupo de Eletricidade Atmosférica – ELAT – ocorridos na região sudeste do Brasil, entre Janeiro de 2003 e Abril de 2007. Os relâmpagos registrados ocorreram num círculo de aproximadamente 80 km de raio ao redor de dois sites situados em São José dos Campos (latitude  $-23,21^{\circ}$ , longitude  $-45,89^{\circ}$  e altitude 635 m) e Cachoeira Paulista (latitude  $-22,69^{\circ}$ , longitude  $-44,98^{\circ}$  e altitude 625 m). Ambos os sites estão situados numa região que é bem coberta pela Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas – BrasilDat (ver Figura 5.12). A eficiência de detecção da BrasilDat para essa região é de 88% para relâmpagos e de 55% para descargas (BALLAROTTI et al., 2006).



Figura 5.12 – Localização dos sites de São José dos campos e Cachoeira Paulista na região sudeste.

Fonte: Adaptada de Saba et al. (2006a).

Foram analisados, também, os registros de relâmpagos obtidos em campanhas realizadas no Sul do país nos verões de 2005/2006 e 2006/2007 e no verão de 2007 em *Tucson, Arizona, USA* (ver Figura 5.13).

### 5.3.2 – Metodologia de análise

De um conjunto de cerca de 950 relâmpagos, foram selecionados aqueles identificados como relâmpagos nuvem-solo negativos. A informação sobre a polaridade de cada descarga de retorno foi extraída dos dados fornecidos pela rede brasileira de detecção e localização de descargas atmosféricas - BrasilDat.



Figura 5.13 – Localização do site de Tucson, Arizona - EUA.

Um relâmpago específico é considerado como tendo polaridade negativa se todas as descargas detectadas e identificadas como pertencentes àquele relâmpago tiverem polaridade negativa. No subgrupo de relâmpagos nuvem-solo negativos foram selecionados aqueles que apresentaram duas ou mais descargas de retorno (relâmpagos com descargas múltiplas) e, dentre esses, aqueles que apresentaram, claramente nas gravações de vídeo, pelo menos uma descarga de retorno seguindo um novo caminho para o solo. Por essa razão, relâmpagos com canais obscurecidos pela precipitação, pelo terreno ou muito difusos foram descartados. Dessa forma, foi selecionada uma amostra com 167 relâmpagos nuvem-solo negativos com múltiplas descargas e com pelo menos uma delas seguindo um novo canal para o solo.

Uma descarga é considerada seguindo um “novo canal” quando ela bifurca para fora de um canal pré-existente. Neste estudo não foi feita diferenciação

entre a descarga que bifurca para fora do canal pré-existente acima ou abaixo da base da nuvem. Uma descarga será denominada descarga de “mesmo canal” quando seguir um canal já percorrido por uma descarga anterior. Será denominada descarga de “reutilização” a descarga que, ocorrendo em seguida a uma descarga que percorreu um novo canal, retornar ao canal anterior ao novo canal ou, em outras palavras, retornar ao canal “original”

O subconjunto de 167 relâmpagos selecionados apresentou um total de 779 descargas, 265 (34%) das quais seguiram um novo caminho para o solo.

Um exaustivo trabalho de análise dos registros em vídeo, quadro a quadro, identificando cada descarga de retorno e a duração da corrente contínua, sempre que ele se fazia presente, associando-as, através do critério de coincidência no tempo, com as correspondentes “assinaturas” nos registros do campo elétrico e com os dados fornecidos pela BrasilDat, para cada um dos 167 relâmpagos, permitiu consolidar as informações constantes de uma planilha eletrônica, apresentada na Figura 5.14, que serviu de base para os estudos desenvolvidos nesse trabalho.

Além de vários outros, constam da planilha os seguintes dados diretamente associados a esse trabalho:

- identificação numérica seqüencial do relâmpago;
- data e horário da ocorrência de cada descarga que compõe o relâmpago com precisão de milissegundos;
- identificação do número do quadro do registro em vídeo (“*frame*”) em que aparece cada uma das descargas;
- o intervalo de tempo entre descargas consecutivas;
- a condição de visibilidade do canal do relâmpago (visível, difuso, parcialmente visível, etc.);
- a identificação da ordem em que as descargas ocorrem no relâmpago;

- a duração da corrente contínua (se observada);
- a multiplicidade de canais no mesmo relâmpago;
- a identificação da ordem em que os canais surgem no relâmpago;
- a polaridade;
- a latitude;
- a longitude; e
- o pico de corrente de cada descarga.

Camera Rápida e Instrumentos Auxiliares - Redução e Classificação													conferir os	
Informações Temporais do Início do Candidato a Stroke				Negativos		Vis. do Canal		Neg.		CG, IC, M, LE, Aranha, BD ou ? (alguns realim. pelo sist.)		multiplicidade de Canal (Bifurcação do Canal)		
Filme	Ano	Mês	Dia	hh (UT)	mm	ss	ms	Número do Frame no .avi útil p/ Lens Calc.	InterStroke e InterVal (s)	v=visível f=fora p=parcial d=difuso (só	Stroke Order	CG, IC, M, LE, Aranha, BD ou ? (alguns realim. pelo sist.)	Num. do Contato (n=ñ_vis, qdo difuso ou fora)	Quant. de Contatos n=indef.
322		11	15	18	55	40,376	376	-314		v	a	cg	1	2?
						40,445	445	-245	0,069	d	b	cg	2	
						40,477	477	-213	0,032	v	c	cg	2	
						40,511	511	-179	0,034	d	d	cg	2	

Figura 5.14 – Trecho da planilha que serviu de base para este estudo.

A partir da planilha-base, foram realizados estudos sobre algumas características específicas dos processos envolvidos na criação de um novo canal, que serão apresentados no Capítulo 6.

Foram analisados: i) a probabilidade de criação de um novo canal à medida que a ordem da descarga cresce; ii) a probabilidade de criação de um novo canal em função do número de descargas no mesmo canal que a precede; iii) a influência do intervalo de tempo que antecede um novo canal sobre a criação do mesmo; iv) a existência de um padrão de iniciação da corrente contínua longa para correntes contínuas longas iniciadas por uma descarga que segue um novo canal; v) a relação entre o pico de corrente da descarga que segue um novo canal, a descarga imediatamente anterior e a primeira descarga de retorno e vi) a relação entre a duração da corrente contínua e o pico de corrente da descarga que segue um novo canal que dá início a ela.



## **6 DESCARGAS QUE SEGUEM UM NOVO CANAL PARA O SOLO**

### **6.1 Revisão dos estudos envolvendo novos canais.**

A seguir, são feitos breves comentários a respeito dos estudos anteriores que analisaram uma ou mais características dos processos envolvidos na criação de um novo caminho para o solo por uma descarga nuvem-solo negativa. Os pontos mais importantes de cada um desses estudos serão comentados no próximo item desse capítulo, quando serão analisadas características específicas envolvidas no processo de criação de um novo canal abordadas neste estudo.

Kitagawa et. al. (1962)

Analisando 193 relâmpagos nuvem-solo negativos ocorridos durante três tempestades convectivas próximo à Socorro no Novo México, os autores estabeleceram que uma descarga subsequente pode seguir o mesmo canal que uma descarga precedente se a descarga subsequente ocorrer dentro de cerca de 100 ms do instante que o canal perdeu sua luminosidade. Quando um lapso de tempo mais longo ocorre, uma descarga subsequente, se ocorrer alguma, toma um canal diferente criado por um novo líder contínuo-escalonado. De acordo com os autores, intervalos entre descargas consecutivas que descem pelo mesmo canal para o solo devem ser, em média, mais curtos que os intervalos entre descargas consecutivas que descem por diferentes canais.

Winn et al. (1973)

Nesse estudo os autores acusaram o registro em vídeo, ao contrário de Kitagawa et al. (1962), de novos canais ocorrendo após um intervalo menor que 100 ms para a descarga imediatamente anterior. Os autores também sugerem duas explicações para o surgimento de novos canais: (i) que uma

dada descarga deve redistribuir carga dentro da nuvem de tal modo que uma quebra de rigidez completamente distinta ocorre, a qual forma um novo canal para o solo ou (ii) que parte do canal de uma dada descarga decai suficientemente antes do próximo líder de modo que não é mais o caminho preferido para a quebra de rigidez.

Krehbiel (1981)

A partir de medidas de campo elétrico em estações múltiplas na Flórida, o autor encontrou que muitos dos relâmpagos estudados por ele tinham mais que um canal para o solo. Ele notou que a deposição de carga negativa ao longo do canal, como resultado do processo de interrupção, possivelmente causaria a tomada de um caminho diferente para o solo do próximo líder.

Thottappillil et. al. (1992)

Nesse artigo os autores analisam, para 46 relâmpagos com múltiplas descargas, as descargas subseqüentes cujos picos dos campos elétricos são maiores que o pico do campo da primeira descarga de retorno, inclusive para seis casos de descargas de retorno que seguiram um novo caminho para o solo.

Rakov e Uman (1990a) e Rakov et. al. (1994)

Em ambos os artigos os autores analisaram, como função da ordem da descarga, o pico do campo elétrico da descarga de retorno inicial normalizado para 100 km, a probabilidade de criação de uma nova terminação no solo e a probabilidade de ocorrência de um líder contínuo-escalonado depois de um intervalo de 100 ms ou menos. Ambos os artigos se basearam na análise, a partir de registros simultâneos de campo elétrico e TV, de 76 relâmpagos

nuvem-solo negativos ocorridos durante três tempestades convectivas próximo à Tampa na Flórida.

Willett et al. (1995)

Utilizando registros de campo elétrico e de vídeo de 36 relâmpagos nuvem-solo ocorridos na Flórida, os autores analisaram as formas de onda do pico do campo (E) e da derivada do campo em relação ao tempo ( $dE/dt$ ), com o objetivo de identificar um canal visível no vídeo associado a cada uma delas, permitindo, assim, a classificação de cada tipo de canal (primeira descarga, subsequente, novo canal, “anômalo”) e a identificação de uma “assinatura” na forma de onda do campo para cada um deles. Os autores definiram como “anômalo” o canal que utiliza a maior parte do trajeto do canal anterior, desviando para um novo caminho num pequeno trecho próximo ao solo.

Shao et al. (1995)

Através da análise de observações de rádio-interferometria de relâmpagos nuvem-solo ocorridos na Flórida, os autores sugeriram que carga negativa havia sido deixada para trás, em baixa altitude, pela descarga de retorno inicial, e que isso forçou os líderes subsequentes a desenvolverem um novo caminho para o solo, primeiro como uma série de *attempted leaders* – assim chamados os líderes que falham em alcançar o solo - e depois como um líder contínuo-escalonado.

Mazur et al. (1995)

Os autores analisaram um relâmpago nuvem-solo com seis descargas de retorno, utilizando registros de um interferômetro (com resolução temporal de 1  $\mu$ s), de vídeo obtido com uma câmera de alta velocidade (1000 quadros por segundo – resolução temporal de 1 ms) e de campo elétrico e magnético. Eles

reforçam a observação de que carga negativa é aprisionada no canal da descarga de retorno inicial e analisam o comportamento de *attempted leaders*, de líderes contínuo-escalonados e sua influência no surgimento de novos canais.

Valine e Krider (2002)

Nesse artigo os autores analisaram características como: o número médio de pontos de impacto, o efeito da ordem da descarga e a presença de uma luminosidade longa e continuada na descarga imediatamente anterior à criação de novos canais. Essa análise foi baseada no registro em vídeo de 386 relâmpagos nuvem-solo ocorridos próximo à *Tucson* no *Arizona* durante o verão de 1997.

Saba et. al. (2006a)

Os autores analisaram, nesse artigo, a multiplicidade, a duração total do relâmpago, o número de pontos de impacto para os relâmpagos com múltiplos canais, o efeito da ordem da descarga e do número de descargas no mesmo canal na criação de novos canais, o intervalo entre descargas e o efeito da ordem da descarga bem como da duração do intervalo entre descargas imediatamente anterior na iniciação de uma corrente contínua longa. A análise se baseou no registro em vídeo, com câmera de alta velocidade (1000 quadros por segundo), de 233 relâmpagos nuvem-solo negativos ocorridos durante 27 tempestades de verão originadas por convecção local e sistemas frontais, em duas localidades, São José dos Campos e Cachoeira Paulista, no estado de São Paulo.

Vale a pena notar que em todos os estudos mencionados acima, com exceção de Mazur et al. (1995) e Saba et. al. (2006a) conforme mencionado anteriormente, foram utilizados, para o registro de imagens, sistemas de vídeo

VHS com resolução temporal limitada a 33 ms. Willett et al. (1995) utilizou um sistema que, para alguns casos, tinha uma resolução temporal de  $\pm 10$  ms; de modo geral seu sistema tinha uma resolução temporal de  $\pm 18$  ms. A resolução finita do vídeo foi discutida por Winn et al. (1973), Brantley et al. (1975), Thomson et al. (1984) e Rakov e Uman (1990b). Como consequência da resolução limitada de vídeo, se duas diferentes descargas ocorrem dentro do intervalo de 33ms, na análise das descargas desse relâmpago, elas parecerão ser uma descarga única, implicando na avaliação errônea de várias características do relâmpago, tais como: multiplicidade, ordem das descargas, classificação de um relâmpago como bifurcado, classificação de uma descarga como componente M, admitir erroneamente a presença de corrente contínua no relâmpago, entre outras. Saba et. al. (2006a), analisando 608 intervalos entre descargas contidas em 186 relâmpagos negativos com múltiplos canais, encontrou que cerca de 19% deles eram menores que 33 ms. Isso significa que, nos demais estudos mencionados, possivelmente, cerca de 19% das descargas tenham sido perdidas, o que pode comprometer alguns resultados apresentados.

## **6.2 Características específicas dos processos envolvidos na criação de um novo canal**

### **6.2.1 Relação entre novos canais e a ordem das descargas**

#### **6.2.1.1 Estudos anteriores**

Rakov e Uman (1990) e Rakov et. al. (1994)

Os autores encontraram indicações de que o status do canal da primeira até a quarta descarga difere do status do canal de ordem superior a 4.

Especificamente com relação às descargas que criam um novo canal para o solo eles observaram que a porcentagem dos líderes subseqüentes que criam

um caminho para o solo diferente do utilizado pela descarga imediatamente anterior decresce rapidamente com a ordem da descarga. Em seu estudo, eles encontraram que 37% de todos os segundos líderes seguiram um caminho para o solo diferente do seguido pela primeira descarga de retorno. Da mesma forma, 27 % de todos os terceiros líderes e 2% de todos os quartos líderes seguiram caminhos diferentes do da descarga de retorno imediatamente anterior. Nenhum novo canal foi criado por líderes de ordem cinco ou superior.

Mazur et al. (1995)

Os autores informam que o relâmpago estudado reforça a afirmação de Rakov et. al. (1994) de que a probabilidade de criação de um novo canal para o solo decai com a ordem da descarga, uma vez que a segunda descarga, em seis presentes no relâmpago estudado, seguiu um novo caminho para o solo. Porém, os autores lembram que a questão importante é: Por que os relâmpagos desenvolvem novos canais?

Valine e Krider (2002)

Os autores encontraram que a maior parte dos relâmpagos da sua amostra que produziram um novo ponto de impacto no solo o fez na segunda descarga do relâmpago. Ou seja, no seu estudo, 112 dos 167 relâmpagos (67%) que produziram um novo canal para o solo fizeram-no na segunda descarga.

Concluem que, com relação ao efeito da ordem da descarga na criação de novos canais, seus resultados corroboram a conclusão de Rakov et. al. (1994) que o segundo líder do relâmpago (i. e., o líder que precede a primeira descarga subsequente) encontra as condições de propagação menos favoráveis de todas as descargas subsequentes e que, portanto, ainda segundo Rakov et. al. (1994), quando a multiplicidade de descargas é alta, a

probabilidade de formação tanto de um novo canal como de um canal alterado torna-se bastante baixa.

Saba et. al. (2006a)

Nesse estudo os autores também encontraram um rápido decréscimo, com a ordem da descarga, na porcentagem de líderes subseqüentes que criam um caminho para o solo diferente do da descarga imediatamente anterior.

#### **6.2.1.2 – Este estudo**

Foram analisados 167 relâmpagos que apresentaram mais de um ponto de impacto no solo. A multiplicidade de descargas máxima encontrada foi 13. Os 167 relâmpagos produziram 779 descargas de retorno, das quais 264, independente da sua ordem, seguiram um novo canal para o solo. Foi observado um rápido decréscimo na porcentagem de líderes subseqüentes que criam um novo caminho para o solo com relação à ordem da descarga o que está em concordância com o informado por Rakov et al. (1994) e Saba et al. (2006a). 52 % dessas descargas (138 em 264) seguiram um novo canal criado pelo segundo líder e 24 % (64 em 264) seguiram um novo canal para o solo criado pelo terceiro líder. Portanto, encontramos 77 % (202 em 264) das descargas que percorreram um novo canal seguindo o segundo ou o terceiro líder.

A Figura 6.1 mostra a porcentagem de novos canais para o solo criados por descargas de diferentes ordens.

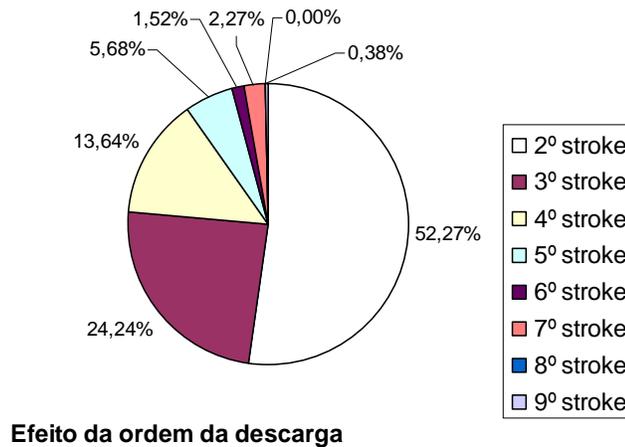


Figura 6.1 – Distribuição das descargas que percorrem um novo canal em função da ordem da descarga.

Como mencionado anteriormente, Rakov et al., (1994) encontraram que nenhuma descarga de ordem 5 ou maior tem um novo ponto de impacto no solo e hipotetizaram que o canal para o solo é cumulativamente “condicionado” por sucessivas descargas, causando sua permanência como um caminho preferido. Disso não segue, necessariamente, que a falta de tal condicionamento cause o desenvolvimento de novos canais para o solo pelas primeiras descargas de um relâmpago. Além disso, ordem de descargas 5 ou maior não são impeditivas do desenvolvimento de um novo canal. Há casos em que a sexta descarga seguiu um caminho completamente novo para o solo (por exemplo, Shao et. al. 1995 e Saba et al. 2006a). Novos canais de ordem tardia são exceções à regra, mas mostram que outros processos podem causar a multiplicidade dos canais, nesses casos.

Por outro lado, relâmpagos com múltiplos canais para o solo parecem ocorrer temporalmente agrupados, em seqüência dentro da mesma tempestade. Temos como exemplo, dentro do banco de dados utilizado

neste estudo, uma tempestade ocorrida no dia 23/03/2005, em São José dos Campos, que apresentou as características mostradas na tabela a seguir.

Tabela 6.1 Exemplo de agrupamento temporal de relâmpagos com novos canais.

	Início	Término	Intervalo	Total subseqüentes	New channel	% New channel
Tempestade	19:26	23:11	03:45	92	41	45
Agrupamento	22:50	23:11	00:21	37	27	73

Outros trabalhos, tais como Krehbiel (1981) e Mazur et al. (1995) já apontavam essa característica. Essa observação parecer indicar que outros fatores são importantes na determinação da multiplicidade dos canais.

## **6.2.2 Relação entre novos canais e o efeito do número de descargas no mesmo canal**

Foi visto no item anterior que a razão pela qual descargas de segunda ordem têm maior probabilidade de criar um novo canal está relacionada com a pobre consolidação do canal depois de apenas uma descarga (Rakov et al., 1994; Saba et al., 2006a). Será feita uma análise do efeito do número de descargas no mesmo canal sobre o condicionamento do mesmo e sua influência na criação de um novo canal.

### **6.2.2.1 Estudos anteriores**

Krehbiel et al. (1979)

Os autores observaram que todos os novos canais da sua amostra ocorreram em seguida a uma descarga inicial. Descarga inicial foi definida nesse estudo como a que percorre pela primeira vez um dado canal, independente da ordem

da descarga. A primeira descarga de retorno do relâmpago, ou descarga de retorno principal, também é uma descarga inicial uma vez que percorre o canal pela primeira vez.

Rakov et. al. (1994)

Os autores analisaram os registros em vídeo de 76 relâmpagos nuvem-solo negativos com múltiplas descargas e encontraram que 37 % de todos os segundos líderes criaram um novo caminho para o solo. Os autores apontam como uma característica interessante o fato de que igual porcentagem (37 %) dos líderes que ocorreram em seguida ao novo canal da segunda descarga de retorno (o terceiro líder do relâmpago), também criou um novo canal para o solo. Eles observam que o segundo líder (assim como o terceiro nesse caso) também segue uma descarga que percorreu um novo caminho para o solo (a primeira descarga de retorno ou descarga principal).

Os autores interpretaram esse resultado como uma indicação que a primeira descarga de retorno freqüentemente não condiciona o canal suficientemente bem de modo que ele seja capaz de suportar a propagação do líder seguinte durante todo o trajeto para o solo.

Como resultado das suas observações nesse trabalho os autores propuseram que um caminho inalterado para o solo seria estabelecido depois que, pelo menos, quatro descargas consecutivas tivessem participado do condicionamento do canal.

Mazur et al. (1995)

Assim como Krehbiel et al. (1979), os autores observaram que todos os novos canais seguiram uma descarga inicial.

Valine e Krider (2002)

Os autores apontaram a existência, em sua amostra, de 5 relâmpagos que produziram um novo contato com o solo depois de 4 descargas terem percorrido o mesmo canal no relâmpago. Esse fato, segundo eles, leva a acreditar que a afirmativa de Rakov et. al. (1994) que existe um “caminho inalterado” depois de 4 descargas pode não ser estritamente válida.

Saba et. al. (2006)

Os autores, assim como Valine e Krider (2002), também apontam para a existência em sua amostra de dados de líderes criando um novo caminho para o solo depois da ocorrência de quatro descargas de retorno consecutivas no mesmo canal.

#### **6.2.2.2 – Este estudo**

Foi encontrado que, em 264 novos canais, 222 (84 %) ocorreram em seguida a um canal inicial (conforme definição dada por Krehbiel et al., 1979), 20 (8 %) depois de duas descargas de retorno consecutivas no mesmo canal, 6 (2 %) depois de três descargas consecutivas, 1 (0,38 %) depois de quatro, 1 (0,38 %) depois de seis descargas consecutivas no mesmo canal e, em 14 casos, a descarga anterior ao novo canal ocorreu fora do campo de visão ou com a identificação do seu canal dificultada por apresentar-se difuso devido à precipitação, etc. O fato de 84% dos novos canais ocorrerem em seguida a uma descarga inicial corrobora a observação feita por Krehbiel em seus estudos realizados em 1979 e 1981 (seis relâmpagos produzindo 11 novos canais, dos quais 10 seguiram um canal inicial), embora nesses estudos o autor tenha utilizado uma amostra mais reduzida em relação à utilizada neste estudo (264 novos canais).

Assim como em Valine e Krider (2002) e em Saba et. al. (2006a), na amostra analisada nesse estudo foram encontrados novos canais depois de cinco descargas consecutivas no canal anterior. Em um relâmpago um novo canal foi criado depois que seis descargas consecutivas haviam percorrido o canal anterior e, em outro, ocorrido em *Tucson* (AZ), uma descarga seguiu um novo caminho para o solo depois de 7 descargas terem participado do condicionamento do canal prévio. No relâmpago ocorrido em *Tucson*, a segunda descarga de retorno criou um novo canal e as próximas seis descargas seguiram esse caminho para o solo. Todas as descargas anteriores tiveram um pico de corrente (variando de 11,4 a 35,4 kA) maior que o pico da nona descarga que novamente criou um novo canal (10,6 kA). Foi encontrado um valor médio de 24 ms (variando de 17 a 37 ms) para os intervalos de tempo entre as descargas do relâmpago. Embora esses curtos intervalos de tempo entre as descargas e os picos de corrente relativamente altos favorecessem o condicionamento do canal, um novo canal ocorreu em uma descarga de ordem muito alta (a nona no relâmpago). Não foi observada a presença de corrente contínua em nenhum intervalo entre descargas.

Nesse estudo também foi verificado que a existência de corrente contínua longa nem sempre consolida o canal. Isso é corroborado pelo fato que apenas 8 casos de formação de novos canais dentre os 264 estudados foram observados depois de descargas seguidas por correntes contínuas longas (duração: 150, 212, 220, 234, 266, 272, 368 e 370 ms).

Portanto, um número superior a quatro descargas no mesmo canal parece não condicioná-lo de modo a se tornar um caminho consolidado para o solo como proposto por Rakov et. al. (1994). A razão pela qual um líder busca um novo caminho para o solo parece estar associada à ordem da descarga, mas aparentemente não depende apenas da consolidação do canal anterior, como será mostrado nos capítulos seguintes.

## 6.2.3 Relação entre um novo canal e o intervalo que o antecede

### 6.2.3.1 Estudos anteriores

Kitagawa et. al. (1962)

Nesse estudo os autores encontraram que uma descarga subsequente pode seguir o mesmo canal, mas depois de 100 ms a descarga subsequente, nos casos em que houve alguma, na sua amostra, foi sempre iniciada por um líder escalonado e tomou um diferente caminho para o solo.

Winn et al. (1973)

Nesse estudo os autores acusaram o registro em vídeo, ao contrário de Kitagawa et al. (1962), de novos canais ocorrendo após um intervalo menor que 100 ms para a descarga imediatamente anterior.

Rakov e Uman (1990)

Para uma amostra de 71 primeiras descargas de retorno, os autores encontraram um valor para a média geométrica da duração do líder de 35 ms. Para os líderes que antecederam as 154 descargas subsequentes que seguiram o mesmo canal da descarga anterior, os autores encontraram uma média geométrica de 1,8 ms. Para os 28 líderes que criaram um novo caminho para o solo, a média geométrica foi de 15 ms. Os autores argumentam que esse observação indica que *“... o líder subsequente, criando uma nova terminação no solo, propaga-se em parte ao longo do canal formado previamente e em parte através do ar virgem...”*.

Por outro lado, os autores também encontraram na sua amostra 22 casos em 115 (19 %) onde o intervalo de tempo a partir da descarga de retorno anterior foi maior que 100 ms (sem evidência de uma corrente contínua longa) e

mesmo assim, ao contrário do que encontrou Kitagawa et. al. (1962), a descarga não produziu uma nova terminação no solo.

Thottappillil et. al. (1992)

Analisando as descargas subseqüentes cujos picos dos campos elétricos eram maiores que o pico do campo da primeira descarga de retorno, os autores encontraram seis casos de descargas de retorno que, além de apresentar um pico de campo maior, seguiram um novo caminho para o solo. Para esses casos eles informam um valor para a média geométrica de 130 ms para os intervalos entre as descargas que criaram um novo canal e as imediatamente anteriores, ficando um pouco acima do valor de 98 ms encontrado para a média geométrica dos intervalos das descargas que seguiram o mesmo canal que a primeira descarga de retorno e muito acima do valor de 57 ms encontrado para a média geométrica dos intervalos de todas as descargas, nos 46 relâmpagos analisados, sem nenhuma seleção.

Rakov e Uman (1994)

Os autores analisaram, em seu estudo, uma amostra de 38 (num total de 270) descargas subseqüentes que criaram uma nova terminação no solo. Eles encontraram um valor médio para o intervalo entre a descarga que seguiu um novo caminho para o solo e a imediatamente anterior cerca de 53 % maior que o valor médio do intervalo entre descargas que seguiram o mesmo canal.

Saba et. al. (2006a)

Analisando uma amostra cerca de duas vezes e meia maior que a usada por Rakov e Uman (1994), os autores encontraram que, apesar do valor médio do intervalo entre a descarga que segue um novo canal e a que a antecede tender para um valor maior que o encontrado entre descargas que seguem o mesmo

canal, a diferença não foi estatisticamente significativa. Os autores sugerem, em seu estudo, que o mecanismo que governa o intervalo entre descargas independe se o líder subsequente segue o mesmo caminho da descarga anterior ou se segue um novo caminho para o solo.

#### **6.2.3.2 – Este estudo**

Os relâmpagos analisados neste estudo foram extraídos da base de dados utilizada por Saba et al. (2006a) ampliada. Em seu estudo Saba et al. (2006a) analisaram 70 relâmpagos que apresentaram novos canais e um subgrupo de 101 intervalos que antecederam as descargas que seguiram um novo caminho para o solo. No presente estudo todos os 167 relâmpagos analisados continham pelo menos uma descarga seguindo um novo canal e foram contabilizados 259 intervalos que antecederam esses novos canais. De maneira a tornar possível a comparação com os estudos realizados por Saba et al. (2006a) e Rakov et al. (1994), os 610 intervalos entre descargas analisados foram subdivididos em dois subgrupos, os que precedem descargas que seguem o mesmo canal da imediatamente anterior e os que precedem um novo canal.

A Figura 6.2 mostra a distribuição desses dois subgrupos. Ambos os subgrupos apresentam uma distribuição lognormal.

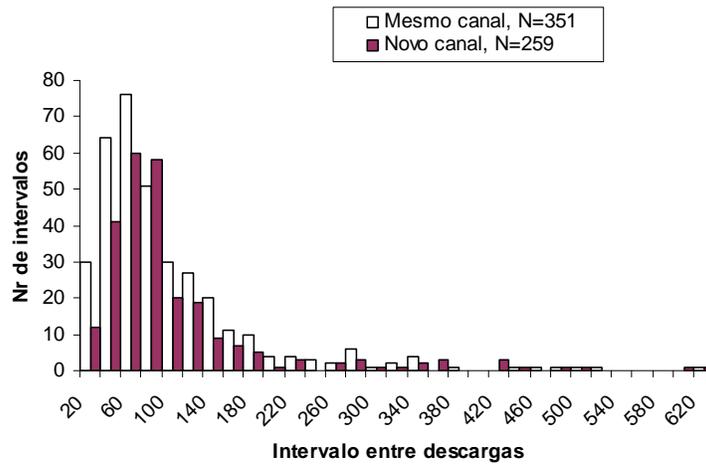


Figura 6.2 – Distribuição dos intervalos entre descargas de retorno

A tabela 6.1 resume algumas características encontradas nesse estudo, em Saba et al. (2006a) e em Rakov et al. (1994).

Tabela 6.2 Resumo estatístico dos intervalos entre descargas.

Subseqüentes	Este estudo <sup>a</sup>			Saba et al. (2006a) <sup>b</sup>			Rakov et al. (1994) <sup>c</sup>		
	N	MG, ms	$\sigma_{\log}$	N	MG, ms	$\sigma_{\log}$	N	MG, ms	$\sigma_{\log}$
todas	612	64	0,39	354	61	0,34	270	60	0,35
mesmo canal	348	62	0,39	253	60	0,36	232	56	0,35
novo canal	264	66	0,39	101	68	0,31	38	92	0,3

<sup>a</sup> Toda a amostra contem pelo menos uma descarga criando um novo canal (167 relâmpagos)

<sup>b</sup> Metade da amostra contem descargas seguindo um novo caminho para o solo (~70 relâmpagos)

<sup>c</sup> Metade da amostra contem descargas seguindo um novo caminho para o solo (~38 relâmpagos)

N é o tamanho da amostra, MG a média geométrica e  $\sigma_{\log}$  o desvio padrão para  $\log_{10} X$

Dentro do enfoque da análise das características das descargas que seguem um novo caminho para o solo, a observação mais importante quanto aos dados apresentados na tabela anterior diz respeito ao valor médio do intervalo que antecede uma descarga que cria um novo canal. Vale observar que o tamanho

da amostra para eventos com novos canais aumenta significativamente de estudo para estudo. Saba et al. (2006a) utilizou uma amostra aproximadamente 2,5 vezes maior que a utilizada por Rakov et al. (1994), enquanto que nesse estudo a amostra é, por sua vez, aproximadamente 2,5 vezes maior que a utilizada por Saba et al. (2006a).

Rakov et al. (1994) encontraram um valor médio para o intervalo que antecede um novo canal 53% maior que o valor médio do intervalo entre todas as descargas subseqüentes da sua amostra. Saba et al. (2006a) encontraram um valor cerca de 12% maior e no presente estudo foi encontrado um valor cerca de 3% maior. Pode-se notar que, à medida que o tamanho da amostra aumenta, a média geométrica do intervalo que antecede um novo canal tende a se aproximar do valor médio típico do intervalo entre descargas subseqüentes. Essa observação corrobora a sugestão de *Saba et al.* (2006a) de que o mecanismo que governa o intervalo entre descargas independe se um líder subseqüente segue um canal previamente formado ou um novo canal.

Porém, o mecanismo que rege a criação do novo canal parece ter, em certos casos, uma dependência com o intervalo que o antecede. Analisando uma amostra de 26 relâmpagos que apresentaram casos de novos canais ocorrendo em descargas de ordem mais alta (entre a 3<sup>o</sup> e a 9<sup>o</sup> descarga), com o número de descargas antecedentes percorrendo o mesmo canal variando entre 2 e 7, foi encontrado que a média do intervalo de tempo separando o novo canal da descarga de retorno anterior (117,9 ms) é cerca de 3 vezes maior que a média do intervalo entre as descargas que seguiram o mesmo canal (35,0 ms). Portanto, parece que é necessário um intervalo de tempo mais longo para a criação de um novo canal depois que várias descargas percorreram o canal anterior.

Por outro lado, neste estudo foram encontrados 73 casos em 348 (21 %) nos quais o intervalo de tempo a partir da descarga de retorno anterior foi maior

que 100 ms (sem evidências da presença de corrente contínua longa) e mesmo assim a descarga não seguiu um novo caminho para o solo. A proporção é muito semelhante à encontrada por Rakov e Uman (1990) no estudo mencionado anteriormente (19%).

Uma observação importante, mostrada a seguir, é que um intervalo relativamente mais curto entre descargas é importante para explicar os casos de retorno ao canal “original” de descargas imediatamente posteriores às que seguiram um novo canal. A Figura 6.3 a seguir ilustra a situação descrita.

Esse tipo de comportamento foi observado por Valine e Krider (2002) em 2% 36dos relâmpagos com múltiplas descargas em sua amostra. Saba et al. (2006a) encontraram em sua amostra os 8 primeiros casos mostrados na Tabela 6.2 a seguir. A estes casos, este estudo adicionou os 13 casos seguintes incluídos dentre os analisados.

A tabela 6.2 mostra o intervalo de tempo entre a descarga que segue um novo canal e a descarga imediatamente anterior a ela ( $A1 \rightarrow B$ ), o intervalo de tempo entre a descarga que segue um novo canal e a descarga imediatamente seguinte a ela que retorna ao canal “original” ( $B \rightarrow A2$ ) e o intervalo de tempo total desde a ocorrência da descarga original, a criação de um novo canal e o retorno da descarga subsequente para o canal original ( $A1 \rightarrow A2$ ). Em dois relâmpagos da amostra o retorno para o canal original ocorreu duas vezes (esses casos estão indicados na tabela como 1a 1b e 2a 2b).

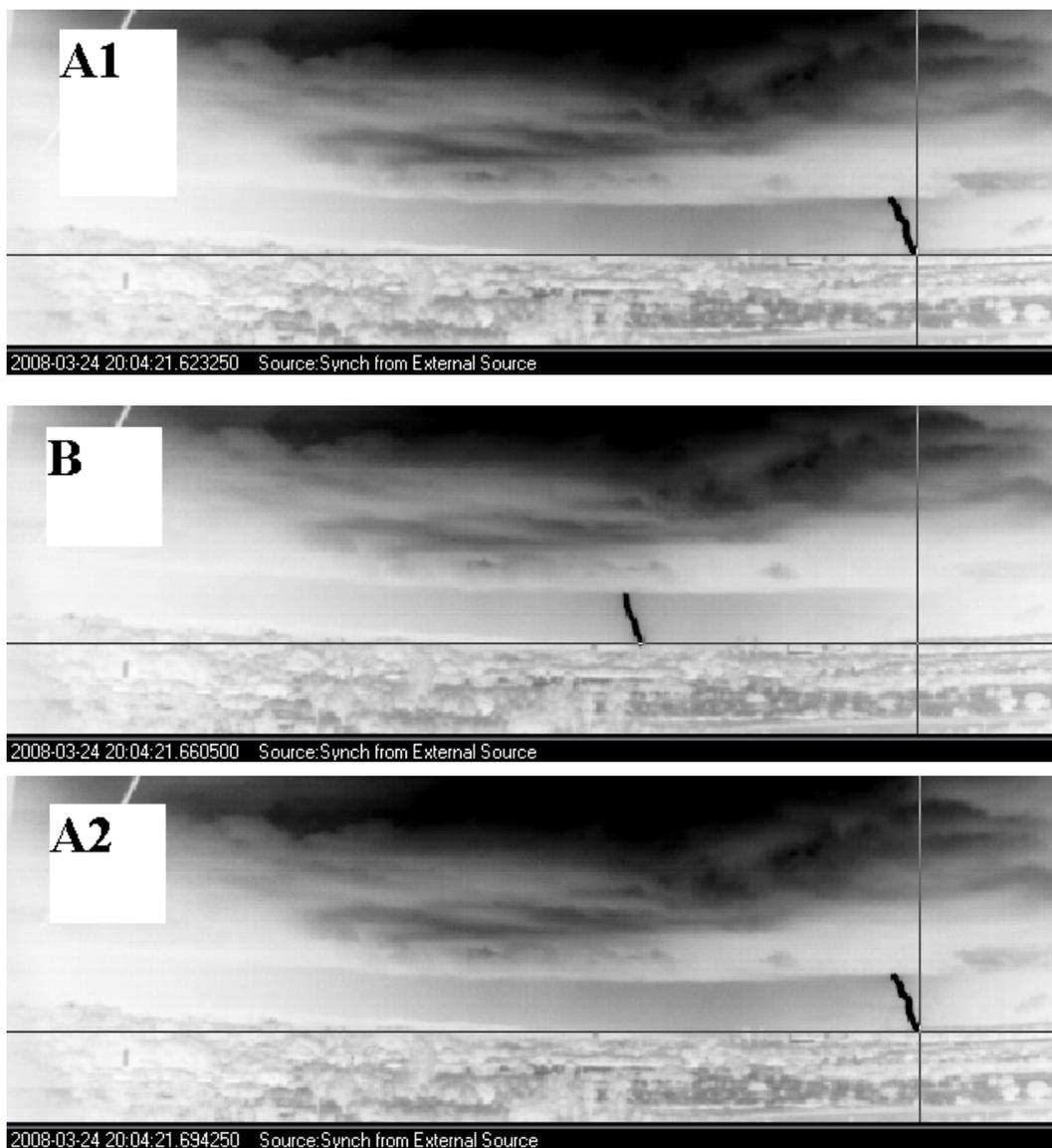


Figura 6.3 – Descargas de um mesmo relâmpago mostrando a seqüência de mudança para um novo canal e o retorno para o canal “original” imediatamente anterior à mudança. No canto inferior esquerdo de cada imagem estão informados a data e o horário de ocorrência de cada descarga com precisão de microssegundos. A distância entre o canal “original” e o novo canal é de 3,3 km.

Tabela 6.3 – Intervalo de tempo entre descargas alternando entre canais

	Eventos																			GM		
	1a	1b	2a	2b	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		18	19
A1→B, ms	100	40	39	52	94	72	41	48	41	29	19	37	87	70	75	86	43	48	44	37	38	50
B→A2, ms	12	15	16	32	35	37	43	25	19	14	20	16	37	36	37	52	17	30	16	33	24	25
A1→A2, ms	112	55	55	84	129	109	84	73	60	53	39	53	124	106	112	138	60	78	60	70	62	77

A1 é a descarga que usa o canal “original”, B é a descarga que cria um novo canal e A2 é a descarga que retorna ao canal original. MG é a média geométrica.

### Relação entre os intervalos antecedendo

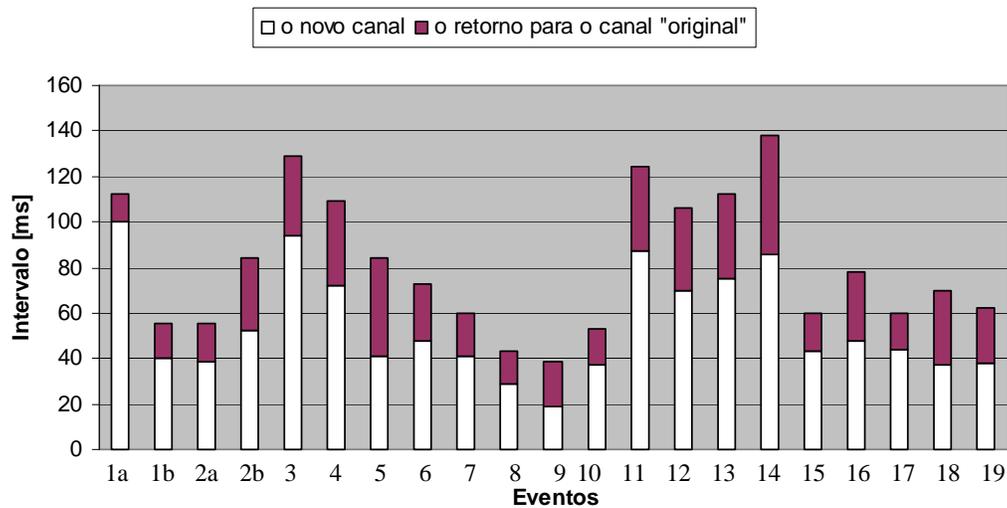


Figura 6.4 – Relação entre o intervalo que antecede o novo canal e o intervalo que antecede o retorno para o canal “original”.

Pode-se observar na Tabela 6.2 que a média geométrica do intervalo de tempo entre a descarga que segue um novo canal e a descarga que retorna ao canal original (B→A2) é duas vezes menor que a média geométrica do intervalo de tempo entre a descarga que segue um novo canal e a descarga imediatamente anterior a ela (A1→B). Será mostrado nos capítulos seguintes que esse pode ser um dos fatores que favorecem o retorno da descarga para um canal original, pois ainda não houve tempo suficiente para a completa dissipação da ionização do mesmo.

## 6.2.4 Padrão de iniciação da corrente contínua longa iniciada por uma descarga que segue um novo canal.

### 6.2.4.1 Estudos anteriores

Rakov e Uman (2003)

Os autores sugeriram um padrão na iniciação de corrente contínua longa. De acordo com sua sugestão, esse padrão tem as seguintes características (vide Figura 6.5 a seguir): (i) descargas iniciando uma corrente contínua longa têm um pico de campo elétrico ( $E_p$ ) menor que as descargas regulares, essa última definida como não iniciando uma corrente contínua longa, nem precedendo a que inicia e nem ocorrendo em seguida a uma corrente contínua longa; (ii) descargas que precedem aquelas que iniciam uma corrente contínua longa são mais prováveis de ter um  $E_p$  relativamente maior que as descargas regulares e (iii) descargas que iniciam uma corrente contínua longa são usualmente precedidas por um intervalo entre descargas relativamente mais curto.

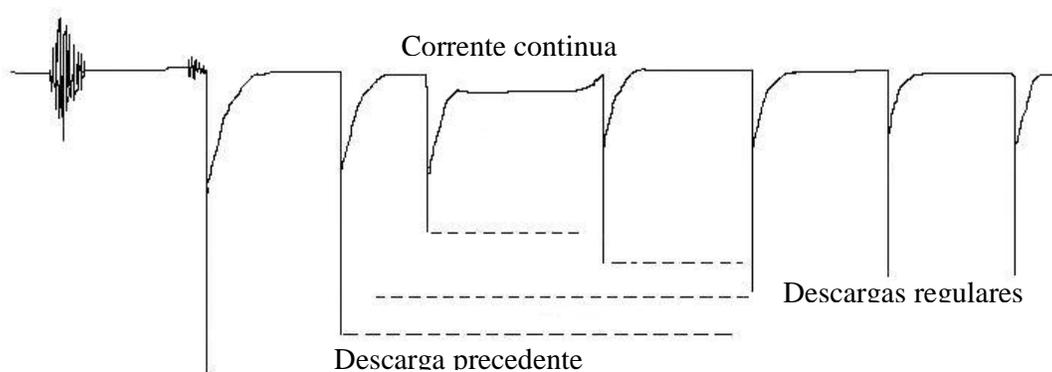


Figura 6.5 – Esquema ilustrativo do padrão de iniciação de corrente contínua longa proposto por Rakov e Uman (2003).

#### 6.2.4.2 Este estudo.

Usando os valores de pico de corrente fornecidos pela BrasilDat para diferentes descargas nós tentamos verificar se o padrão de iniciação sugerido por Rakov e Uman (2003) também é válido para correntes contínuas longas iniciadas por uma descarga que segue um novo canal.

A Figura 6.6 mostra a média geométrica dos valores dos picos de corrente ( $I_p$ ) das descargas que precedem aquelas que dão início a uma CC longa (Precedente), das descargas regulares (Regular) e daquelas que seguem um novo canal e também dão início a uma CC longa (Novo + CCLonga)

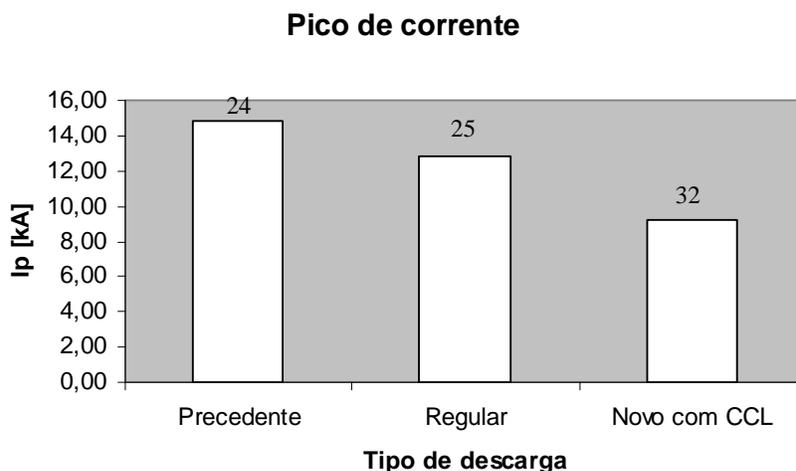


Figura 6.6 – Valor da média geométrica do pico de corrente em função do tipo da descarga. O número em cima das barras representa o número de cada tipo de descarga.

Os valores médios de  $I_p$  da Figura 6.6 aparentemente corroboram os critérios (i) e (ii) para descargas que seguem um novo caminho para o solo e também iniciam uma CC longa, embora o teste de *T Student* indique que a amostra não é estatisticamente significativa ao nível de confiança de 5%.

A Tabela 6.4, a seguir, mostra que as descargas em novos canais que iniciam correntes contínuas longas foram precedidas por intervalos de tempo relativamente curtos se comparados ao intervalo usual entre descargas (SABA et al., 2006). Embora a formação de novos canais seja favorecida por um longo intervalo entre descargas que seguem um novo canal e as imediatamente anteriores, o critério do intervalo de tempo proposto por Rakov e Uman (2003) mostrou-se válido.

Tabela 6.4 Intervalos de tempo precedendo descargas seguidas por uma CC longa.

	Mesmo canal + CCLonga	Novo canal + CCLonga	Todas as descargas subseqüentes <i>Saba et al. (2006a)</i>
N	43	23	608
Intervalo (MG)	35,5 ms	58,4 ms	61,0 ms

Portanto, o padrão de iniciação de corrente contínua longa sugerido por Rakov e Uman (2003) também é válido para correntes contínuas longas iniciadas por descargas que seguem um novo caminho pra o solo (FERRO et al., *in press*).

### **6.2.5 Comparação do pico de corrente da descarga que segue um novo canal, com a que segue um mesmo canal e com a primeira descarga de retorno**

#### **6.2.5.1 Estudos anteriores**

Thottappillil et. al. (1992)

Analisando relâmpagos com descargas subseqüentes cujos picos dos campos elétricos eram maiores que o pico do campo da primeira descarga de retorno, os autores encontraram seis casos nos quais, além da descarga subseqüente apresentar pico de campo maior, ela seguiu um novo caminho para o solo. Para esses casos, a média geométrica do pico de campo das primeiras descargas de retorno foi cerca de 50% da média geométrica dos picos das

primeiras descargas de todos os relâmpagos com múltiplas descargas e 75% da média geométrica do pico de campo dos relâmpagos com descarga única. Segundo os autores isso demonstra que as primeiras descargas desses relâmpagos são incomuns e que a redução do seu pico de campo pode estar relacionada, de alguma maneira, ao fato que uma descarga subsequente maior, de um modo não muito diferente de uma primeira descarga típica, estar seguindo um novo canal.

#### **6.2.5.2 Este estudo.**

A primeira descarga de retorno usualmente transfere uma grande quantidade de carga armazenada no canal durante o processo do líder escalonado através do ar virgem (RAKOV e UMAN, 2003). Como o líder contínuo-escalonado que precede um novo canal também se propaga, durante a parte escalonada, através do ar virgem, é esperado um  $I_p$  para o novo canal menor que o da primeira descarga de retorno mas maior que o  $I_p$  de uma descarga de retorno que siga o mesmo canal da primeira. Para verificar essa relação, as descargas nuvem-solo negativas do nosso banco de dados foram divididas em 3 grupos: (a) aquelas sem qualquer CC; (b) aquelas seguidas por CC curta ou muito curta (CCMC) e (c) aquelas seguidas por CC longa (CCL).

Foram utilizadas nesse estudo as definições adotadas por Kitagawa et al. (1962) e Brook et al. (1962) que definem como “longa” a corrente continua com duração maior que 40 ms; por Shindo e Uman (1989) que definem como “curta” a corrente continua com duração entre 10 ms e 40 ms e por Ballarotti et al. (2005) e Saba et al. (2006) que mostraram que a corrente contínua com duração menor que 10 ms pode ser identificada usando uma câmera de alta velocidade e definiram-na como corrente contínua “muito curta”. Neste estudo optamos por restringir o intervalo de duração da corrente continua muito curta entre 4 ms e 10 ms porque abaixo de 4 ms é muito difícil discriminar entre o

final da recuperação (“cauda”) da descarga de retorno e o início de um processo de corrente contínua (BALLAROTTI et al., 2005; SABA et al., 2006).

Os valores da média geométrica do  $I_p$  para cada subconjunto, mostrado nas Tabelas 6.5, 6.6 e 6.7 respectivamente, seguiram a relação:

$$I_{p\text{primeira}} > I_{p\text{novo canal}} > I_{p\text{mesmo canal}}$$

Tabela 6.5 Descargas sem nenhuma corrente contínua

	Primeira	Novo canal	Mesmo canal
N	444	237	427
MG [kA]	19,2	16,3	14,7

Tabela 6.6 Descargas seguidas por corrente contínua curta ou muito curta (CCCMC)

	Primeira + CCCMC	Novo canal + CCCMC	Mesmo canal + CCCMC
N	131	149	289
MG [kA]	21,3	16,2	15,2

Tabela 6.7 Descargas seguidas por correntes contínuas longas (CCL)

	Primeira + CCL	Novo canal + CCL	Mesmo canal + CCL
N	21	20	80
MG [kA]	13,2	11,0	10,9

Os resultados mostram que o efeito do novo canal se faz sentir da maneira como era esperado em todos os subgrupos, independente da presença de corrente contínua longa ou não.

Para os dois primeiros subconjuntos (sem CC e com CCCMC), as médias das populações são significativamente diferentes entre si ao nível de confiança de 5 % (teste de *t Student*) com exceção dos grupos correspondentes aos novos canais e mesmos canais tanto sem CC como com CCCMC.

Para o último subconjunto (CCL) todas as médias das populações mostraram-se não significativamente diferentes ao nível de confiança de 5 %.

## **6.2.6 Relação entre a duração da corrente contínua e o pico de corrente da descarga que segue um novo canal que dá início a ela.**

### **6.2.6.1 Estudos anteriores**

Saba et. al. (2006a)

Saba et al. (2006a) encontraram que descargas negativas com grande pico de corrente podem ser seguidas apenas por corrente contínua curta enquanto que as seguidas por corrente contínua longa têm pico de corrente menor. Os autores chamam de “zona de exclusão” o fato de que nenhuma descarga de retorno seguida por corrente contínua longa tem pico de corrente maior que 20 kA e descargas com grande pico de corrente nunca são seguidas por uma corrente contínua com duração maior que 40 ms.

Ferro et. al. (2008)

Ferro et al. (2008) analisando 61 novos canais que deram início a algum tipo de CC com duração superior a 4 ms, encontraram que novos canais seguidos por CC também obedecem à zona de exclusão proposta por Saba et al. (2006a).

### **6.2.6.2 Este estudo.**

Neste estudo a amostra analisada por Ferro et al. (2008) foi ampliada para 44 novos canais seguidos por CC curta ou muito curta (variando de 4 ms a 40 ms) e 32 novos canais seguidos por uma CC longa. O diagrama com o pico de corrente ( $I_p$ ) versus a duração da CC é mostrado na Figura 6.7 abaixo.

Portanto, esse estudo corrobora o resultado encontrado por Ferro et al. (2008) de que novos canais seguidos por CC também obedecem à zona de exclusão proposta por Saba et al. (2006b). Logo, pode-se concluir que a relação entre a duração da CC longa e o pico de corrente da descarga que a inicia é a mesma, independente dessa descarga seguir ou não um novo canal.

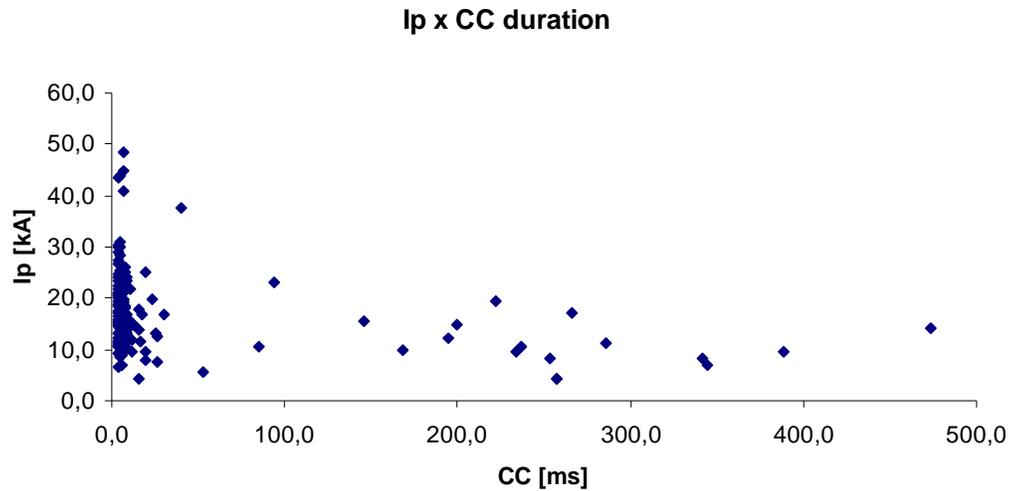


Figura 6.7 – Pico de corrente ( $I_p$ ) versus duração da CC para 76 descargas que seguiram um novo caminho para o solo.



## **7 COMPROVAÇÃO DA TEORIA DO LÍDER BI-DIRECIONAL**

Nas últimas décadas, várias pesquisas abordaram características específicas de descargas que seguem novos canais. Kitagawa et. al. (1962) analisando a relação entre os novos canais e a duração do intervalo que os antecedem propuseram que eles ocorreriam quando esse intervalo tivesse uma duração superior a 100 ms. Winn et al. (1973), além de contestarem o critério de duração do intervalo entre descargas proposto por Kitagawa, propuseram uma nova explicação para o surgimento de um novo canal que estaria associada à redistribuição de cargas na nuvem causada pela descarga anterior à que seguiu um novo caminho para o solo e ao decaimento da condutividade do canal anterior. Krehbiel (1981) propôs que a deposição de carga negativa ao longo da extremidade mais baixa do canal da descarga, como resultado do processo de interrupção, possivelmente causaria a tomada de um caminho diferente para o solo do próximo líder. Rakov e Uman (1990) e Rakov et. al. (1994) propuseram que depois da ocorrência de quatro descargas consecutivas no mesmo canal esse caminho estaria “consolidado”, não havendo possibilidade de um novo canal ocorrer em descargas de ordem cinco ou superior. Shao et al. (1995) também sugeriram que a descarga de retorno anterior deixa para trás carga negativa em baixa altitude forçando os líderes subseqüentes a desenvolverem um novo caminho para o solo. Mazur et al. (1995), Valine e Krider (2002) e Saba et. al. (2006a) observaram que seus estudos confirmavam a proposição de Rakov et. al. (1994) de que a probabilidade de criação de um novo canal diminui drasticamente com o aumento da ordem da descarga, porém diversos desses autores registraram a ocorrência de novos canais em descargas de ordem superior o cinco, o que levou Mazur et al. (1995) a lembrar que a questão importante é: Por que os relâmpagos desenvolvem novos canais?

Nesse capítulo é apresentada uma hipótese que busca explicar os processos físicos envolvidos quando, em um relâmpago nuvem-solo negativo, uma determinada descarga subsequente abandona o caminho percorrido pela(s) descarga(s) anterior(es) e cria um novo caminho em direção ao solo. A hipótese busca explicar, também, os casos em que, depois de uma descarga ter percorrido um novo canal, a seguinte retorna ao canal anterior ou “original”.

A hipótese apresentada está apoiada no conceito do líder bi-direcional de carga líquida zero, discutido no Capítulo 4. Conforme mencionado anteriormente (item 4.3.2), a teoria do líder bi-direcional foi comprovada a partir da observação de relâmpagos iniciados artificialmente por aeronaves (MAZUR, 1989) ou por foguete (MAZUR, 1993).

Neste capítulo também será apresentada a comprovação da teoria do líder bi-direcional, utilizando, de forma inédita, o registro de um relâmpago nuvem-solo natural.

O relâmpago nuvem-solo negativo analisado foi registrado pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica - ELAT - durante o verão de 2007 em *Tucson, Arizona*. O relâmpago, ocorrido em 31/07/2007 às 22:19:06 h, apresentou 12 descargas de retorno que percorreram 3 canais distintos mostrados na Figura 7.1 a seguir.

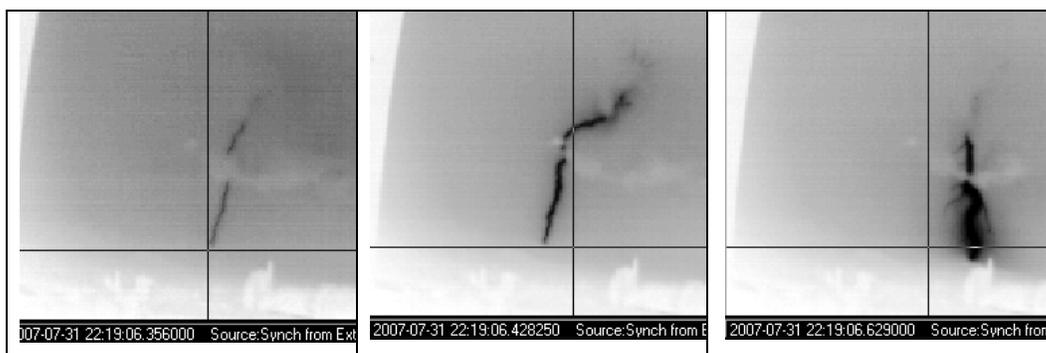


Figura 7.1 - Três canais distintos utilizados pelas descargas de um relâmpago nuvem-solo negativo registrado em *Tucson, Arizona*, no verão de 2007.

## 7.1 Desenvolvimento do líder bi-direcional – A árvore de dupla terminação

### 7.1.1 Hipótese proposta

Durante o desenvolvimento da hipótese proposta, são apresentados os diagramas de distribuição do potencial na nuvem e no canal da descarga, bem como a distribuição de carga no canal para as várias etapas envolvidas na criação do canal original, do novo canal e no retorno para o canal original, com o objetivo de tornar claro o entendimento dos processos físicos envolvidos.

A distribuição do potencial da nuvem em função da altitude será função do clássico modelo tripolar adotado para a distribuição de carga numa nuvem de tempestade, o qual está esquematicamente representado na Figura 7.2. Os centros de carga são representados por três esferas verticalmente arranjadas, uma em cima da outra e preenchidas com uma distribuição homogênea de carga espacial (KASEMIR, 1960). A esfera no topo, com carga positiva, representa o centro principal de carga espacial positiva no alto da nuvem de tempestade; a esfera central, com carga negativa, representa o centro principal de carga espacial negativa e a esfera mais baixa representa um pacote menor de carga positiva na base da nuvem. À direita da Figura 7.2 é mostrada a função potencial resultante de tal arranjo em função da altitude. A linha vertical

grossa representa a descarga na nuvem. As áreas achuradas mostram a distribuição de carga no canal do relâmpago.

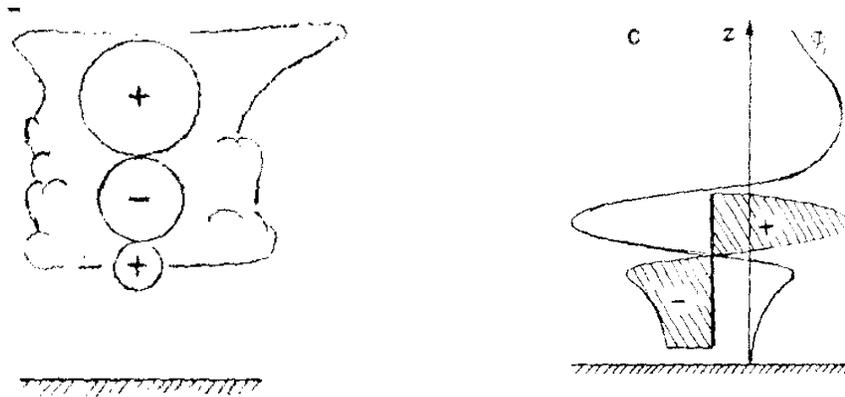


Figura 7.2 - À esquerda: a representação esquemática da clássica distribuição tripolar dos centros de carga numa nuvem de tempestade. À direita: a distribuição do potencial na nuvem em função da altitude e a distribuição de carga no canal do relâmpago para uma descarga nuvem-solo negativa.

Fonte : Adaptada de Kasemir (1960).

Será admitida a existência de um mecanismo de intensificação do campo elétrico presente no interior de uma nuvem de tempestade, conforme discutido no Capítulo 4, de tal modo que sua intensidade no ponto de iniciação do relâmpago seja suficiente para provocar a quebra da rigidez dielétrica que dará início ao desenvolvimento do líder bi-direcional.

No lado esquerdo da Figura 7.3 é mostrado, para um relâmpago nuvem-solo negativo, o ponto a partir do qual o líder é iniciado, provavelmente na periferia inferior do centro de cargas negativas.

Conforme visto no Capítulo 4, a intensidade de campo necessária para a quebra de rigidez na extremidade positiva do líder bi-direcional é menor que a necessária para a quebra de rigidez na extremidade negativa. Portanto,

*streamers* positivos desenvolvem-se provocando, simultaneamente, um aumento na ionização e o aquecimento das moléculas do ar no ponto de iniciação do relâmpago. O ar aquecido e ionizado dá início à formação do canal de plasma do líder que, como conseqüência do processo de ionização tem carga líquida zero (definição de plasma).

Embora possua carga líquida zero, o canal de plasma do líder é polarizado pela ação do campo elétrico ambiente. Assim, haverá uma maior concentração de cargas positivas na extremidade que acompanha o sentido do campo (extremidade positiva do líder bi-direcional na Figura 7.3) e uma maior concentração de cargas negativas na extremidade oposta (extremidade negativa do líder bi-direcional na Figura 7.3).

Nos instantes iniciais do processo de desenvolvimento do líder, a intensidade do campo ainda é insuficiente para provocar a quebra de rigidez na extremidade negativa e, portanto, enquanto o líder positivo se propaga na direção ascendente, cargas negativas irão se acumular no ponto de iniciação do líder até que a intensidade do campo alcance o valor da quebra de rigidez e o líder negativo seja iniciado na direção descendente. Conforme mostrado no Capítulo 4, um canal carregado negativamente se propaga escalonadamente (em passos) em direção ao solo enquanto um canal carregado positivamente progride suavemente penetrando na região do centro de cargas negativas no interior da nuvem, dando origem ao desenvolvimento da árvore de dupla terminação.

No lado direito da Figura 7.3 é mostrada a variação do potencial da nuvem com relação à altura. Como nesse estudo estão sendo analisados somente os relâmpagos nuvem-solo negativos, cujo desenvolvimento ocorre na região compreendida entre o centro principal de carga espacial negativa e o solo, na Figura 7.3 e seguintes, visando à simplificação na exposição da hipótese, será considerada apenas a distribuição do potencial nessa região.

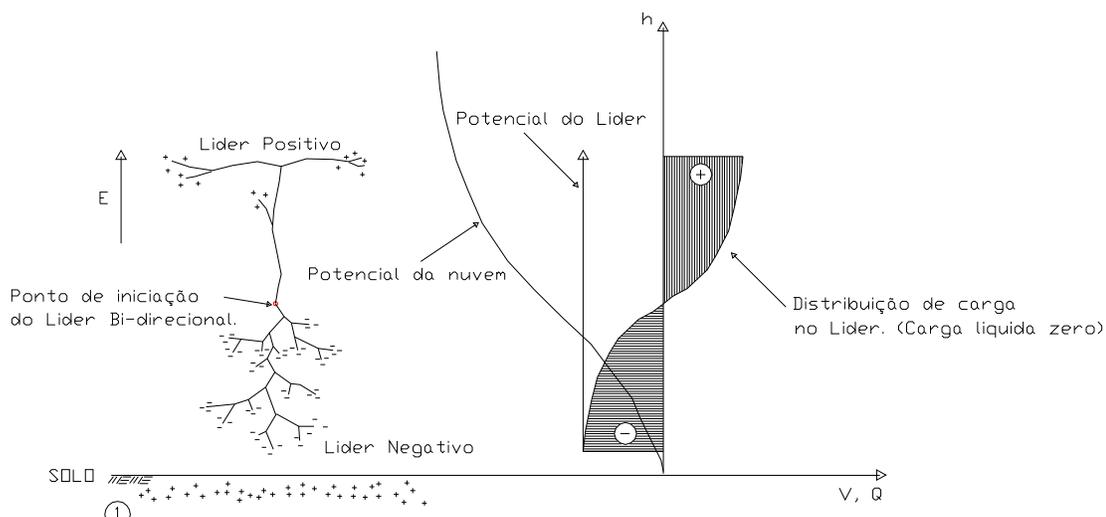


Figura 7.3 – Líder bi-direcional se propagando. O gráfico à direita mostra o potencial da nuvem em função da altura, o potencial no canal do líder e a distribuição de carga no mesmo.

Sendo um condutor, o canal do relâmpago tem potencial constante ao longo de toda a sua extensão. É mostrada também a distribuição de carga ao longo do canal que apresenta, conforme explicado anteriormente, carga líquida zero e encontra-se polarizado pela ação do campo elétrico, cuja polaridade é invertida em relação ao campo elétrico de tempo bom, em função da presença da nuvem de tempestade. A Figura 7.3 mostra a distribuição de cargas imediatamente antes de ser estabelecido o contato com o solo.

### 7.1.2 Comprovação através do relâmpago analisado

O registro em vídeo do relâmpago analisado foi feito a uma velocidade de 4000 quadros por segundo, o que possibilita uma análise com resolução temporal de 250  $\mu$ s. Essa resolução temporal permite acompanhar os processos que ocorrem durante o desenvolvimento do relâmpago com bastante detalhe.

### **7.1.2.1 Desenvolvimento da árvore de dupla terminação**

Foi utilizado especificamente esse relâmpago porque, quando analisadas as imagens quadro a quadro, verificou-se que um grande número de trechos de canais iluminados internos à nuvem era visível. Isso possibilitou a utilização da técnica de superposição de imagens para reconstruir, para um relâmpago natural, a “árvore” com dupla terminação, citada por Mazur (1989, 1993, 2002) e Williams (2006).

Até onde sabemos, o caso em análise é o primeiro registro em vídeo do desenvolvimento de uma árvore de dupla terminação para um relâmpago natural.

A intensidade da luminosidade apresentou uma grande variação para cada trecho iluminado registrado em vídeo. Isso fez com que, durante o processo de superposição das imagens, trechos com luminosidade pouco intensa praticamente desaparecessem, impedindo a visualização completa da árvore de canais ramificados criada pelo líder positivo. Para contornar esse problema foi utilizado um software gráfico que permite importar as imagens de vídeo e, sobre elas, traçar o trajeto dos diversos trechos de canais iluminados, superpondo-os uns aos outros. Desse modo foi possível a construção de um desenho esquemático mostrando todos os canais gerados pelos líderes positivo e negativo do relâmpago em análise, integrados no tempo (Figura 7.4).

A numeração que aparece ao lado de cada trecho de canal indica a seqüência cronológica de aparecimento do mesmo durante o desenvolvimento do relâmpago. A ausência de um determinado número na seqüência cronológica indica que um trecho preexistente de canal foi re-iluminado naquele instante. As descargas de retorno ocorridas são mostradas na base da figura, logo abaixo do canal percorrido por cada uma delas, e estão indicadas pelo mesmo

número do trecho de canal que se desenvolveu simultaneamente à sua ocorrência.

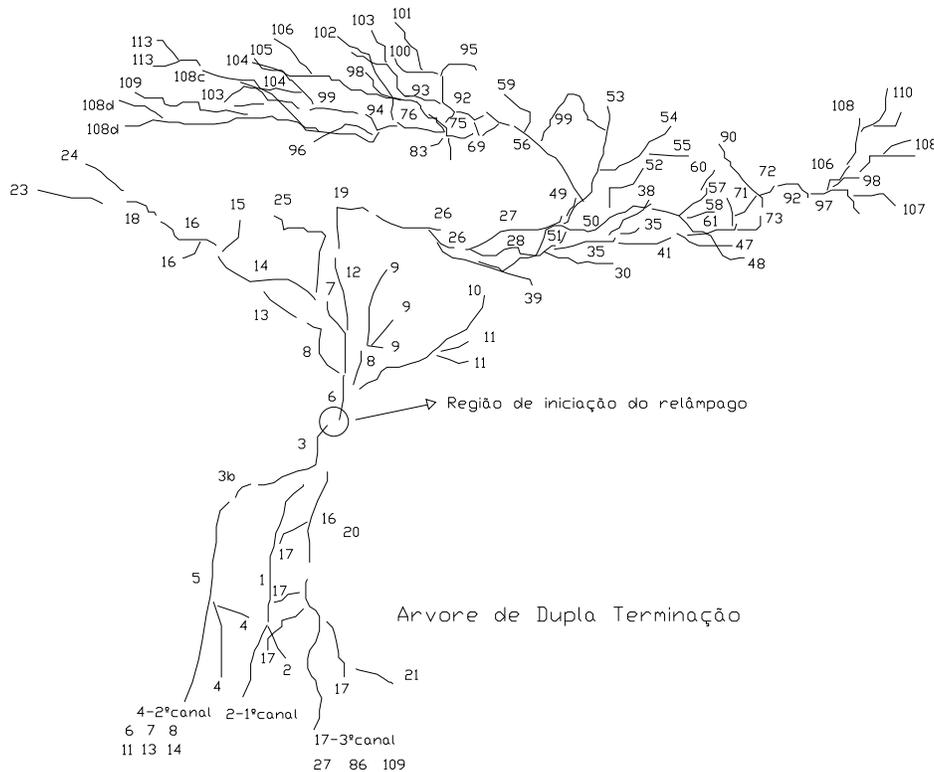


Figura 7.4 - “Reconstrução” da árvore de dupla terminação integrando os canais dos líderes positivo e negativo no tempo.

### 7.1.2.2 A região de iniciação do relâmpago

A primeira imagem registrada em vídeo do relâmpago mostra o líder escalonado (a extremidade negativa do líder bi-direcional) descendo em direção ao solo. Porém, mesmo sabendo-se que, no caso de um relâmpago nuvem-solo negativo como o que está sendo analisado, o líder positivo inicia sua propagação ascendente antes do início da propagação do líder negativo, não há imagens de canais desenvolvendo-se no interior da nuvem nesse período porque o líder positivo não apresentou intensidade luminosa suficiente para ser registrado em vídeo.

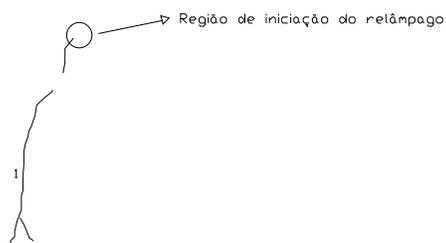
A luminosidade pouco intensa talvez possa ser explicada pelo fato das correntes que percorrem os canais criados pelo líder positivo serem, provavelmente, de menor intensidade que as que percorrem os canais criados pelo líder negativo. Conforme mencionado no capítulo 4, medidas realizadas em laboratório apresentaram valores médios de pico de corrente para o líder positivo uma ordem de grandeza menor que os apresentados para o líder negativo (WILLIAMS, 2006). Observações recentes de líderes positivos em raios naturais confirmam a sua baixa luminosidade (SABA et al., 2008).

Outra observação que justifica a ausência de registro em vídeo do desenvolvimento do líder positivo na fase inicial do relâmpago foi feita por Mazur (2002). O autor observou que as radiações associadas com a quebra de rigidez durante o desenvolvimento dos líderes positivos são de intensidade muito mais fraca que as emitidas durante o desenvolvimento dos líderes negativos. Esse comportamento “silencioso” do líder positivo contrastando com o comportamento “ruidoso” do líder negativo estão associados, provavelmente, com os processos de características diferentes envolvidos na quebra de rigidez durante a propagação desses líderes, conforme mostrado no Capítulo 4.

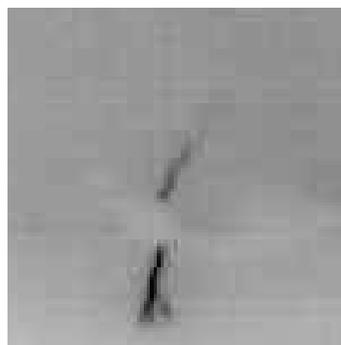
Porém, os canais do líder positivo são passíveis de registro em vídeo quando sua luminosidade é intensificada ao serem percorridos por *recoil leaders* (SABA et al., 2008), ou quando da ocorrência da forte intensificação do processo de quebra de rigidez nas extremidades superiores dos líderes positivos devido à “energização” causada por uma descarga de retorno (MAZUR, 2002).

Logo, a probabilidade de se conseguir o registro em vídeo dos canais do líder positivo na fase inicial de desenvolvimento do relâmpago é muito baixa, aumentando depois da ocorrência de uma descarga de retorno, pois ambos os processos mencionados no parágrafo anterior ocorrem ou durante a descarga de retorno (a energização do líder positivo) ou seguindo a interrupção do canal

do relâmpago (*recoil leaders*). O registro de ambos os processos ocorridos no relâmpago em análise serão mostrados adiante.



Iniciação do relâmpago - Líder Escalonado



22:19:05,798000

Figura 7.5 - Região de iniciação do relâmpago. A imagem à direita mostra o líder escalonado descendo em direção ao solo. A região de iniciação do relâmpago, mostrada na figura à esquerda, só poderá ser identificada em imagens posteriores, porém sua indicação é feita desde o primeiro momento como ponto de referência no desenvolvimento do relâmpago.

A Figura 7.5 mostra a região onde o líder é iniciado - cuja altura foi estimada em cerca de 3,5 km - provavelmente na periferia do centro de cargas negativas com um canal carregado negativamente descendo em direção ao solo enquanto um canal carregado positivamente, não visível nessa imagem, penetra na região do centro de cargas negativas. Essa situação é ilustrada na Figura 7.6.

Proctor (1991), analisando um conjunto de 773 relâmpagos intranuvem e nuvem-solo ocorridos na África do Sul, encontraram uma distribuição bimodal para a altura do ponto de iniciação, com um pico a 5,3 km e outro a 9,2 km acima do nível do mar. Como o nível do solo encontrava-se a 1,4 km acima do nível do mar, a região de iniciação mais baixa, associada à iniciação dos

relâmpagos nuvem-solo, encontrava-se a 3,9 km do solo, bastante próxima da altura estimada neste estudo (3,5 km).

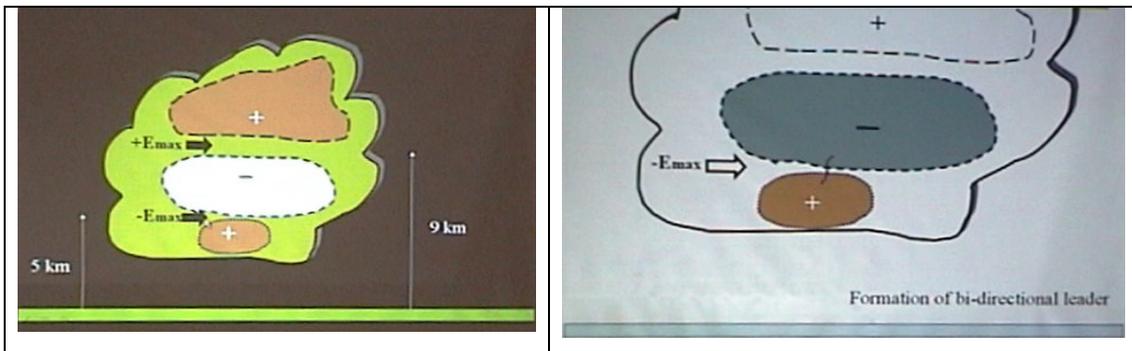


Figura 7.6 - A ilustração à esquerda mostra a clássica estrutura tripolar, indicando as alturas onde a intensidade do campo elétrico é máxima no interior da nuvem de tempestade. A ilustração à direita indica a região de iniciação do líder para um relâmpago nuvem-solo negativo.

Krehbiel (1981), analisando as primeiras descargas de retorno dos relâmpagos nuvem-solo negativos de seu estudo, encontrou que as fontes de carga negativa moveram-se somente uma curta distância (cerca de 1 km) enquanto o líder escalonado progredia em direção ao solo. O autor informa, também, que as descargas de retorno imediatamente seguintes à primeira freqüentemente descarregam a mesma região de carga na nuvem, como se a primeira descarga de retorno tivesse descarregado apenas parcialmente aquela região.

A partir da teoria do líder bi-direcional, as observações relatadas por Krehbiel podem ser interpretadas da seguinte maneira: a) o líder bi-direcional inicia-se, provavelmente, numa região abaixo do centro de cargas negativas onde o campo é mais intenso, o que sugere que a iniciação se dá próximo a uma região com alta concentração de carga negativa; b) não são as fontes de carga negativa que se movem, mas sim o líder positivo que progride no interior do centro de cargas; c) como a progressão está ocorrendo numa região com alta densidade de cargas o desenvolvimento do líder positivo é curto até o líder

negativo (*stepped leader*) alcançar o solo e d) a alta densidade de carga da região pode suportar o desenvolvimento das descargas de retorno subseqüentes. Esse cenário retrata bastante bem o observado no relâmpago em estudo.

## **7.2 Descarga de retorno**

### **7.2.1 Hipótese proposta**

No lado esquerdo da Figura 7.7 é mostrado o instante em que o líder negativo toca o solo. Nesse instante o processo de neutralização da carga negativa do canal tem início a partir do solo, transferindo carga positiva até a extremidade superior do mesmo.

Depois do contato com o solo o relâmpago assumirá o potencial da terra (potencial zero ou potencial de referência). Para a descarga para o solo nós não temos a condição de que a carga líquida do canal do relâmpago tem que ser zero. No sentido eletrostático, a terra é um condutor de grande capacidade e o relâmpago pode extrair a quantidade que for necessária de carga dele. Está estabelecida, então, a configuração de um condutor conectado a uma fonte de grande capacidade, capaz de fornecer qualquer quantidade de carga demandada. Essa é a configuração de uma linha de transmissão conectada a uma fonte geradora suficientemente grande. A carga injetada pela descarga de retorno se distribuirá uniformemente ao longo do canal do relâmpago, nos mesmos moldes da carga distribuída numa linha de transmissão ao ser conectada à fonte geradora.

No lado direito da Figura 7.7 é mostrado que toda a extensão do canal (condutor) está, agora, no mesmo potencial do solo (zero). É mostrada, também, a carga positiva transferida pela descarga de retorno, distribuída uniformemente ao longo do canal.

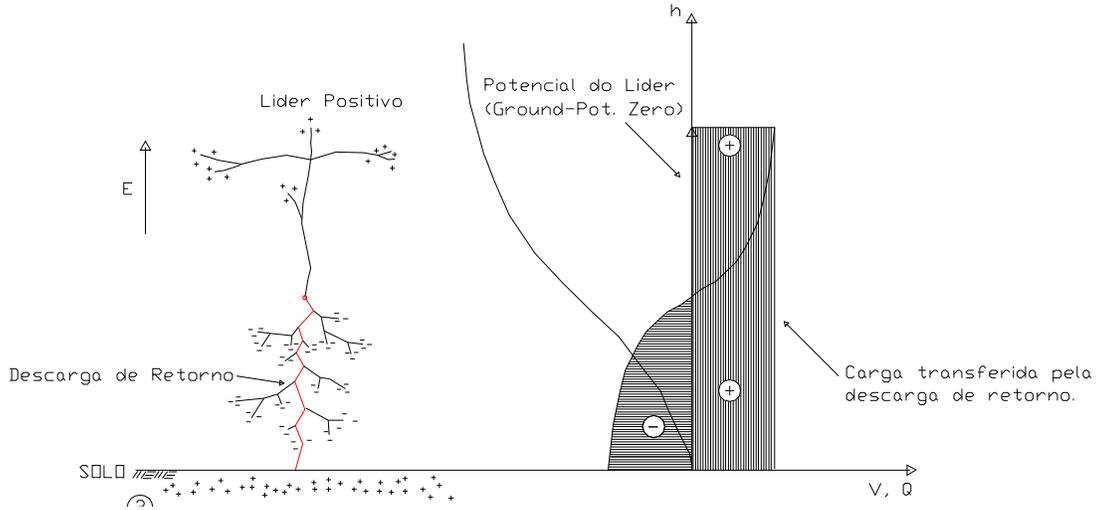


Figura 7.7 - Descarga de retorno no canal “original”. O gráfico à direita mostra o potencial no canal do líder levado a zero devido ao contato com o solo e a carga transferida ao canal pela descarga de retorno.

Nessa situação, a extremidade superior do canal encontra-se com potencial zero, carregada positivamente, e imersa no centro de cargas negativas.

### 7.2.2 Comprovação através do relâmpago analisado

Na Figura 7.8 é mostrado o quadro imediatamente posterior (250  $\mu$ s depois) ao quadro que foi completamente inundado pelo brilho intenso da primeira descarga de retorno. A imagem permite visualizar o ponto de contato no solo e o trajeto completo do canal da primeira descarga de retorno desde o ponto de iniciação do relâmpago (o trecho negativo do líder bi-direcional).



Figura 7.8 - Formação do primeiro canal do relâmpago. A imagem à direita mostra o canal cujo contato com o solo já se encontra estabelecido. Na figura à esquerda é possível ver a seqüência cronológica dos eventos desde a iniciação do relâmpago.

### 7.3 Canal “original” – A energização do líder positivo pela descarga de retorno

#### 7.3.1 Hipótese proposta

No lado esquerdo da Figura 7.9 não estão mais representados os diversos ramos do líder negativo, indicando que a carga negativa neles depositada também se moveu em direção ao canal principal devido à diferença de potencial entre a extremidade de cada ramo e o solo (canal principal).

O lado direito da Figura 7.9 mostra a redistribuição de cargas no canal. Como o canal está carregado positivamente, a maior parte da carga será concentrada, por ação do campo elétrico, na extremidade superior do mesmo.

Portanto, ao ser conectado ao solo, o canal do relâmpago passa a ser percorrido, a partir do ponto de contato, por uma frente de onda - a descarga de retorno - que irá transportar o potencial do solo ao longo de toda a sua extensão até as extremidades superiores do mesmo. Como a diferença entre o

potencial nas extremidades superiores do canal do relâmpago (potencial do solo) e o potencial da região de cargas espaciais da nuvem onde elas estão imersas é muito grande, a produção de *streamers* nas extremidades é “energizada”, favorecendo a extensão do líder positivo (MAZUR, 2002).

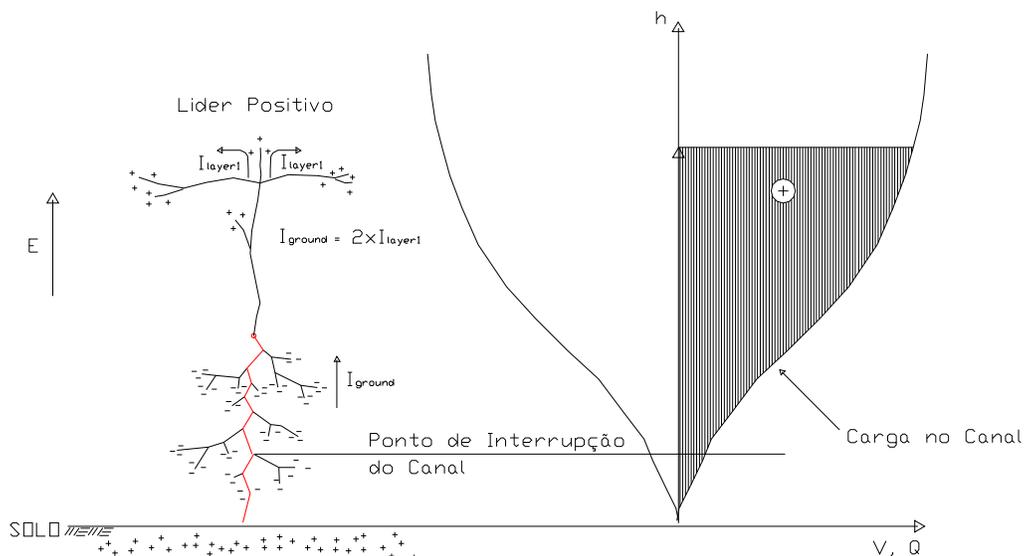


Figura 7.9 - Canal “original”. O gráfico à direita mostra o potencial no canal do líder levado a zero devido ao contato com o solo e a redistribuição da carga no canal devido à ação do campo elétrico.

Nessa situação a soma das correntes que circulam pelos ramos superiores do líder positivo é igual à corrente no canal principal do relâmpago (MAZUR, 2002), ou seja, conforme mostrado na Figura 7.9

$$I_{ground} = 2 \times I_{layer1}$$

### 7.3.2 Comprovação através do relâmpago analisado

Embora o líder positivo geralmente apresente uma fraca intensidade luminosa, conforme mencionado no item 7.1.2.2, Mazur (2002) informa que a exceção ocorre quando a frente de onda que transporta o potencial do solo (a descarga

de retorno) alcança as extremidades superiores do líder positivo. Essa situação provoca a energização do líder positivo causando, ainda segundo Mazur, uma poderosa quebra de rigidez positiva que intensifica o brilho nos trechos de canal envolvidos.

A Figura 7.10, a seguir, mostra claramente o processo de energização do líder positivo causado por uma das descargas de retorno subseqüentes que seguiram o terceiro canal do relâmpago. Pode-se observar nas imagens de vídeo que o canal, cujo contato com o solo já se encontra estabelecido, é iluminado por um pulso ascendente, enquanto que, em seguida, uma nova ramificação estende-se à direita do canal principal do relâmpago.

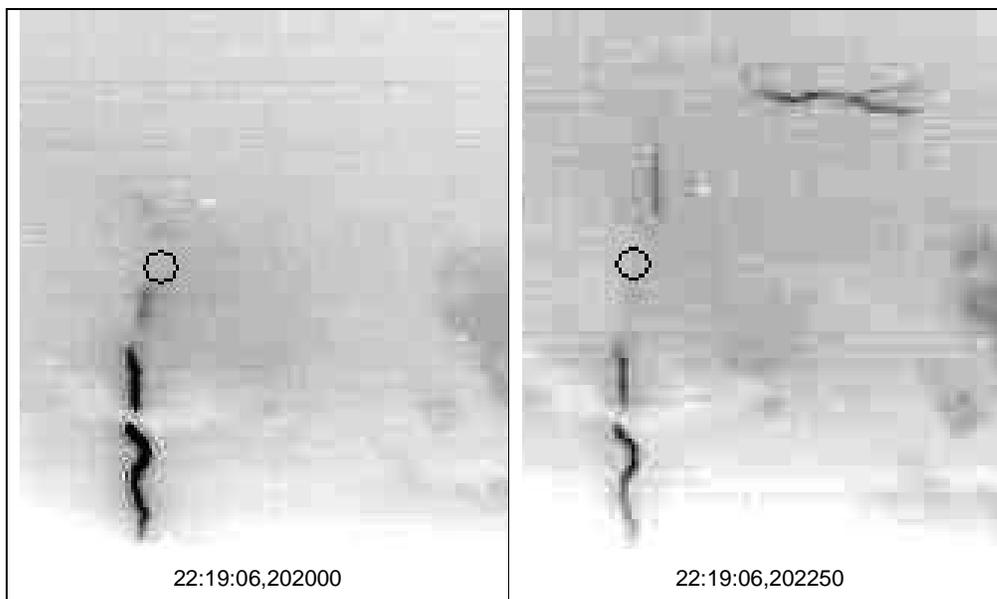


Figura 7.10 - Processo de energização do líder positivo pela descarga de retorno. As imagens acima mostram, em seqüência, no primeiro quadro a descarga de retorno e no segundo quadro um novo trecho de canal ilumina-se à direita do canal do relâmpago. Na figura mostrada abaixo é possível ver a seqüência cronológica dos eventos desde a iniciação do relâmpago. (continua)

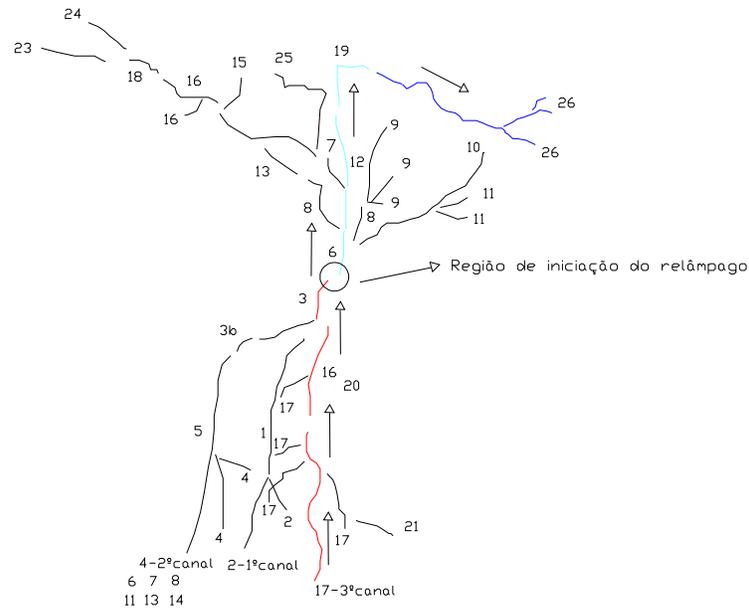


Figura 7.10 – (conclusão).

## 7.4 Interrupção do canal “original”

### 7.4.1 Hipótese proposta

A interrupção do canal “original” é condição essencial para a ocorrência de uma descarga subsequente (MAZUR, 2002). As observações mostram que as condições mais favoráveis para a interrupção geralmente ocorrem na porção mais baixa do canal, próximo à superfície do solo. Quanto mais próximo da superfície do solo, a densidade do ar é maior. Assim, as taxas de recombinação são maiores e maior é a perda de calor através dos processos de convecção turbulenta e condução térmica (KREHBIEL et al., 1979).

Se o mecanismo dominante de resfriamento do canal for a convecção turbulenta, Heckman (1992) afirma que o canal interrompe-se em um intervalo tão pequeno quanto um milissegundo. A convecção turbulenta faz com que a

ionização do canal se dissipe, condição que favorece a criação de um novo canal para a próxima descarga de retorno.

Por outro lado, seguindo o foco deste trabalho, o processo de desenvolvimento do líder positivo parece ter um papel relevante na questão da interrupção do canal. Conforme explicado no item anterior, as extremidades positivas do líder propagam-se energizadas pela descarga de retorno. Dessa forma o canal do relâmpago torna-se mais longo e, de acordo com a hipótese sugerida por Heckman (1992), um canal longo, pode tornar-se instável em virtude do aumento do valor da sua constante de tempo RC.

A propagação das extremidades superiores positivas do líder propicia a ocorrência do processo de “estrangulamento” do campo, sugerido por Mazur (1993) e esquematizado na Figura 7.11 que leva a diminuição da corrente no canal principal fazendo com que a resistividade do canal cresça e, conseqüentemente, provoque o aumento da constante de tempo RC, tornando o canal instável.

O mais provável é que ambos os processos, isto é, o estrangulamento do campo e o alongamento do canal do relâmpago, contribuam para o aumento da constante de tempo RC, levando à instabilidade do canal principal da descarga e causando a interrupção da corrente no mesmo (MAZUR, 2002).

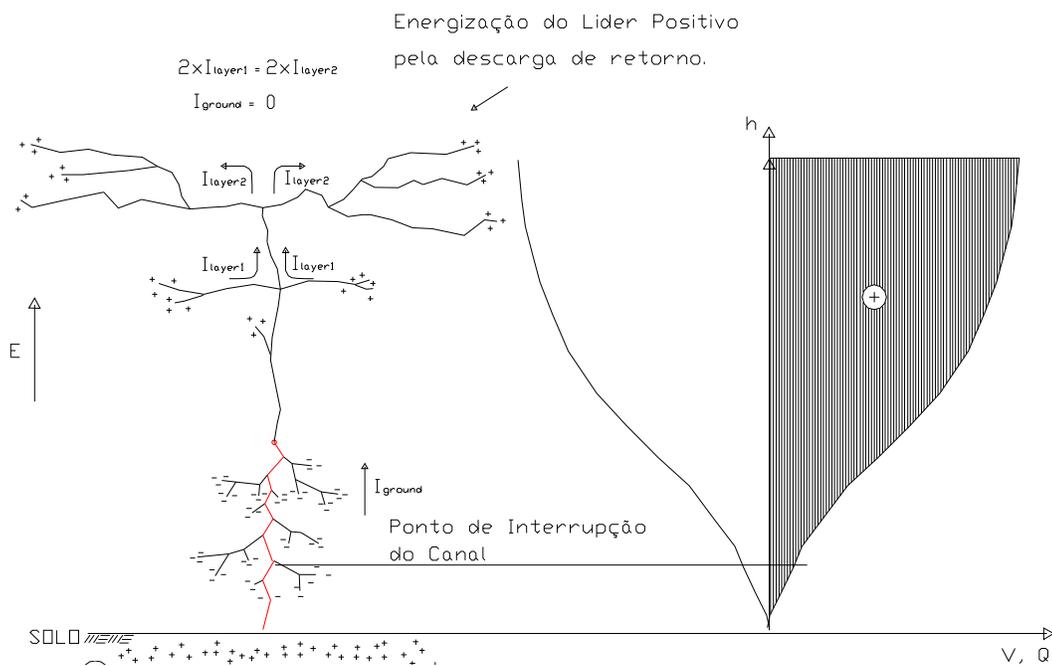


Figura 7.11 - Processo de “estrangulamento” do campo que acaba por levar à interrupção do canal.

Assim sendo, nessa situação, como a corrente no canal principal é interrompida ( $I_{\text{ground}} = \text{zero}$ ), a soma das correntes que circulam pelos ramos superiores do líder positivo é igual à soma das correntes que circulam pelos ramos das camadas inferiores, uma vez que a redução na intensidade do campo nessa região, devido à cobertura (como um guarda-chuvas) causada pelo desenvolvimento das camadas superiores, leva à inversão no sentido da corrente nos ramos das camadas inferiores (MAZUR, 1993), ou seja, conforme mostrado na Figura 7.11:

$$2 \times I_{\text{layer1}} = 2 \times I_{\text{layer2}}$$

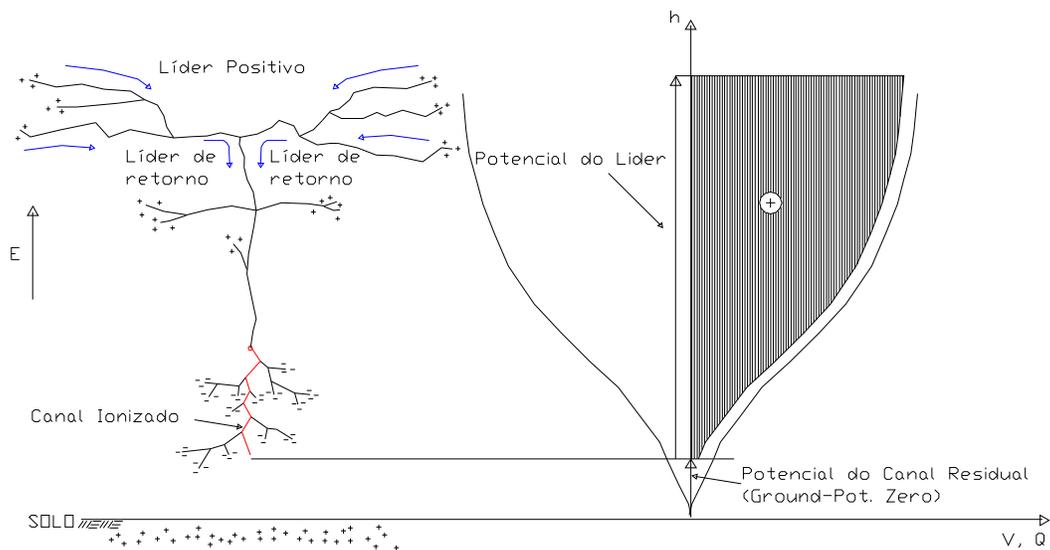


Figura 7.12 - Interrupção do canal “original”. O gráfico à direita mostra a variação no potencial do canal do líder depois da interrupção pela ação do campo elétrico.

O lado esquerdo da Figura 7.12 mostra a interrupção do canal (ou interrupção da corrente) desconectando-o do solo. Nessa situação, o canal volta a ser um longo condutor isolado imerso num campo elétrico.

Mazur e Ruhnke (1993) explicam que, seguindo a interrupção do canal, a carga depositada pela descarga de retorno é “esticada” em função do alongamento do canal causado pela “energização” na propagação do líder positivo, tendo como consequência a diminuição da densidade de carga por unidade de comprimento do canal. Outro efeito da propagação continuada do líder positivo após a interrupção do canal é a diminuição da carga no fundo do canal, a inversão da sua polaridade e seu posterior aumento. Isso faz com que o potencial do canal passe a aumentar em relação ao trecho não condutor que permanece conectado ao solo, conforme mostram, numa seqüência do processo, as Figuras 7.11 e 7.12. Esse efeito da mudança no potencial do canal com a redistribuição de carga no mesmo é observado como a rápida

recuperação do campo elétrico em um ponto no solo próximo ao relâmpago, como mostrado na Figura 7.13 a seguir.

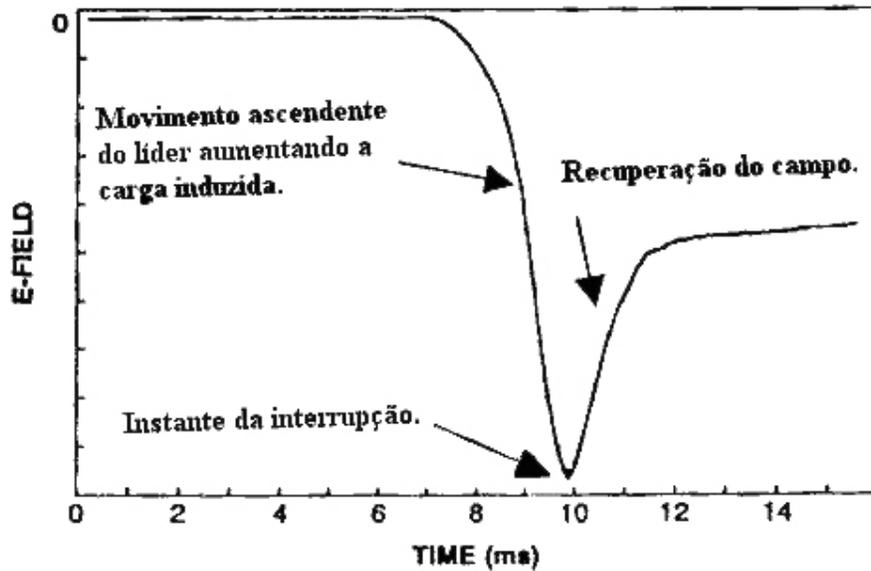


Figura 7.13 - Um exemplo do efeito da interrupção da corrente observado na rápida inversão do campo elétrico no solo, próximo a um líder negativo induzido pela clássica técnica de iniciação por foguete.

Fonte : Adaptada de Mazur (2002)

## 7.4.2 Comprovação através do relâmpago analisado

### 7.4.2.1 Desenvolvimento do líder positivo no interior da região de carga espacial negativa da nuvem

A Figura 7.14 a seguir mostra a relação entre as descargas de retorno que utilizaram cada canal e o desenvolvimento das ramificações do líder positivo no interior da nuvem.

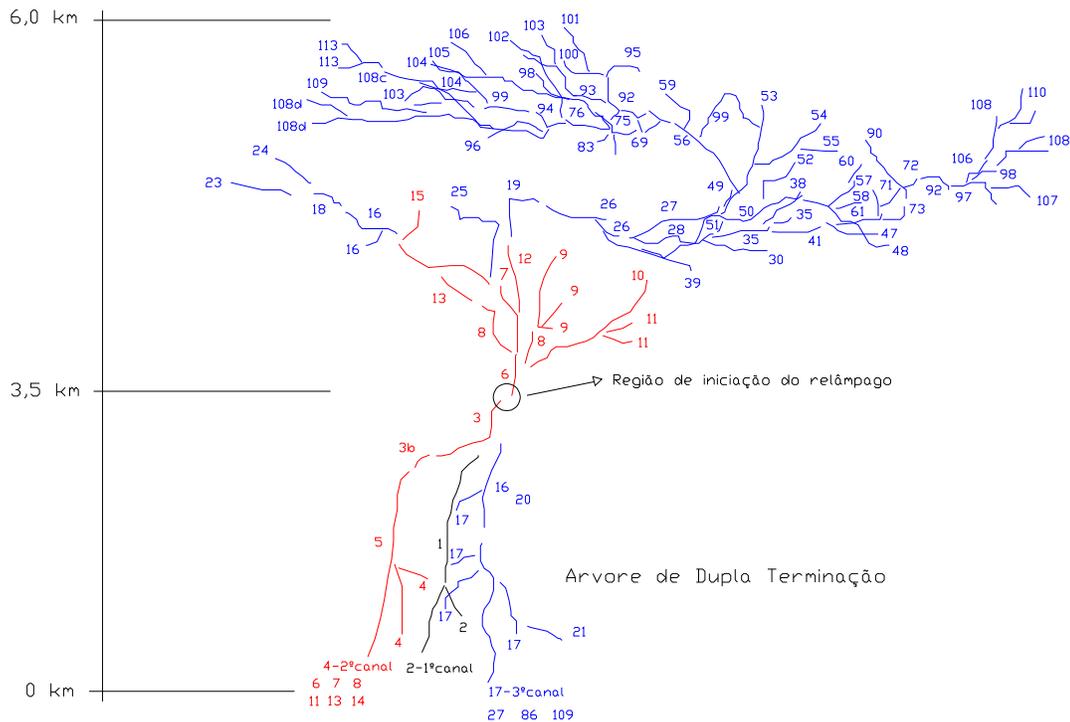


Figura 7.14 - Desenvolvimento do líder positivo em relação às descargas ocorridas em cada canal do relâmpago.

As imagens do desenvolvimento do líder positivo acima do ponto de iniciação do relâmpago surgiram a partir da terceira descarga de retorno. Esse comportamento é coerente com a observação feita por Krehbiel (1981) de que, para as primeiras descargas de retorno, a fonte de carga moveu somente uma curta distância (a propagação do líder positivo) enquanto o líder negativo percorria o trajeto até o solo.

O desenho esquemático da Figura 7.14 evidencia que a maior propagação do líder positivo está associada com as descargas de retorno que utilizaram o terceiro canal, as descargas de maior ordem. O que está de acordo com a idéia de que o líder positivo, ao se desenvolver após cada descarga de retorno, propaga-se em direção à região da nuvem cuja diferença de potencial, em relação à sua extremidade, é superior ao valor necessário para a quebra de

rigidez. Conforme mostrado na Figura 7.2, admitindo-se uma estrutura tripolar de distribuição de carga na nuvem, o potencial ambiente aumenta, a partir da base da nuvem, rapidamente na direção horizontal.

Portanto, à medida que a ordem da descarga de retorno torna-se maior, o desenvolvimento do líder tende a buscar a estratificação em camadas horizontais, com cada camada posterior situada em um nível superior à sua precedente.

A partir dos dados de sondagem fornecidos pela Universidade de *Tucson*, buscamos estimar, para o relâmpago analisado, em que faixa de altitude ocorreu o processo de desenvolvimento do líder positivo no interior da nuvem. No dia da ocorrência do relâmpago em estudo, a isoterma de 0 °C encontrava-se a uma altitude de cerca de 4,7 km e a isoterma de -15 °C a cerca de 7,4 km. Nessa faixa de altitude situa-se o centro principal de cargas negativas da nuvem (IRIBARNE e CHO, 1980; PINTO JR. e PINTO, 2000; RAKOV e UMAN, 2003). Como já foi dito, o ponto de iniciação do relâmpago foi estimado encontrar-se a cerca de 3,5 km do solo, o que está coerente com a idéia de que a iniciação do líder bi-direcional nos relâmpagos nuvem-solo negativos ocorre na periferia inferior do centro de cargas negativas da nuvem e, portanto, para o caso em estudo, abaixo dos 4,7 km.

Foi estimada, também, a altura do trecho do líder positivo que aparece no extremo superior da árvore de dupla terminação do relâmpago analisado. Visando eliminar erros nessa estimativa, devido à imagem planificada das ramificações da árvore do relâmpago, utilizaram-se imagens simultâneas de duas câmeras, conforme explicado no item 7.4.2.2 a seguir. Assim, estimou-se um valor de cerca de 5,8 km para a altura do ponto mais alto do líder positivo. Portanto, as ramificações do líder positivo desenvolveram-se acima de 3,5 km (região de iniciação do relâmpago) e abaixo de 7,4 km (nível da isoterma de -15 °C). Logo, o desenvolvimento do líder positivo, ou a parte superior da árvore

de dupla terminação, ocorreu dentro da região do centro principal de cargas negativas da nuvem.

#### **7.4.2.2 A interrupção da corrente no canal**

Conforme explicado no Capítulo 4, item 4.5.2, as múltiplas ramificações do desenvolvimento do líder escondem (como um guarda-chuva) as camadas inferiores, desse modo impedindo o desenvolvimento dos ramos mais baixos e causando a diminuição da corrente no canal principal através do processo de estrangulamento do campo.

A diminuição da intensidade do campo próximo à base do canal do relâmpago leva à diminuição da corrente no canal principal que, por sua vez, contribui para que a resistividade do canal cresça e, conseqüentemente, provoque o aumento da constante de tempo RC, tornando o canal instável. Por outro lado, o mais provável é que ambos os processos, isto é, o estrangulamento do campo com o conseqüente aumento da constante de tempo RC e o alongamento do canal causado pela propagação do líder positivo energizada pela descarga de retorno, contribuam para a interrupção do canal da descarga (MAZUR, 2002).

Na Figura 7.15 pode-se identificar o desenvolvimento das camadas de ramificação do líder positivo que levam ao mecanismo de “estrangulamento” do campo proposto por Mazur (2002) para explicar a diminuição da corrente fluindo no canal principal. Porém, essa é uma imagem bidimensional, planificada, do desenvolvimento dos canais do relâmpago.

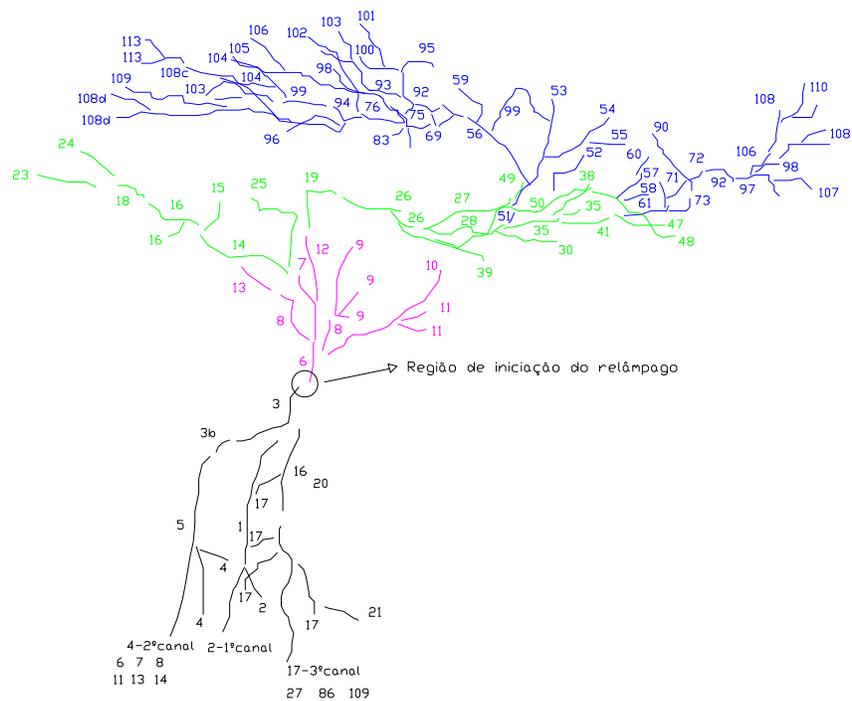


Figura 7.15 - Camadas de ramificação do líder positivo. A camada superior “esconde” as camadas inferiores do campo elétrico ambiente “estrangulando” ou impedindo o desenvolvimento dos ramos mais baixos.

O relâmpago analisado foi filmado simultaneamente por duas câmeras localizadas em pontos diferentes. A Figura 7.16, a seguir mostra o ponto de impacto do relâmpago (32,275N; 111,143W) e a posição das duas câmeras: a câmera rápida, identificada na Figura 7.16 como *Penthouse* (32,230N; 110,954W), localizada a cerca de 18 km do ponto de impacto e a câmera VHS, identificada como *Canon* (32, 330N; 110,927W) localizada a cerca de 21 km do ponto de impacto.

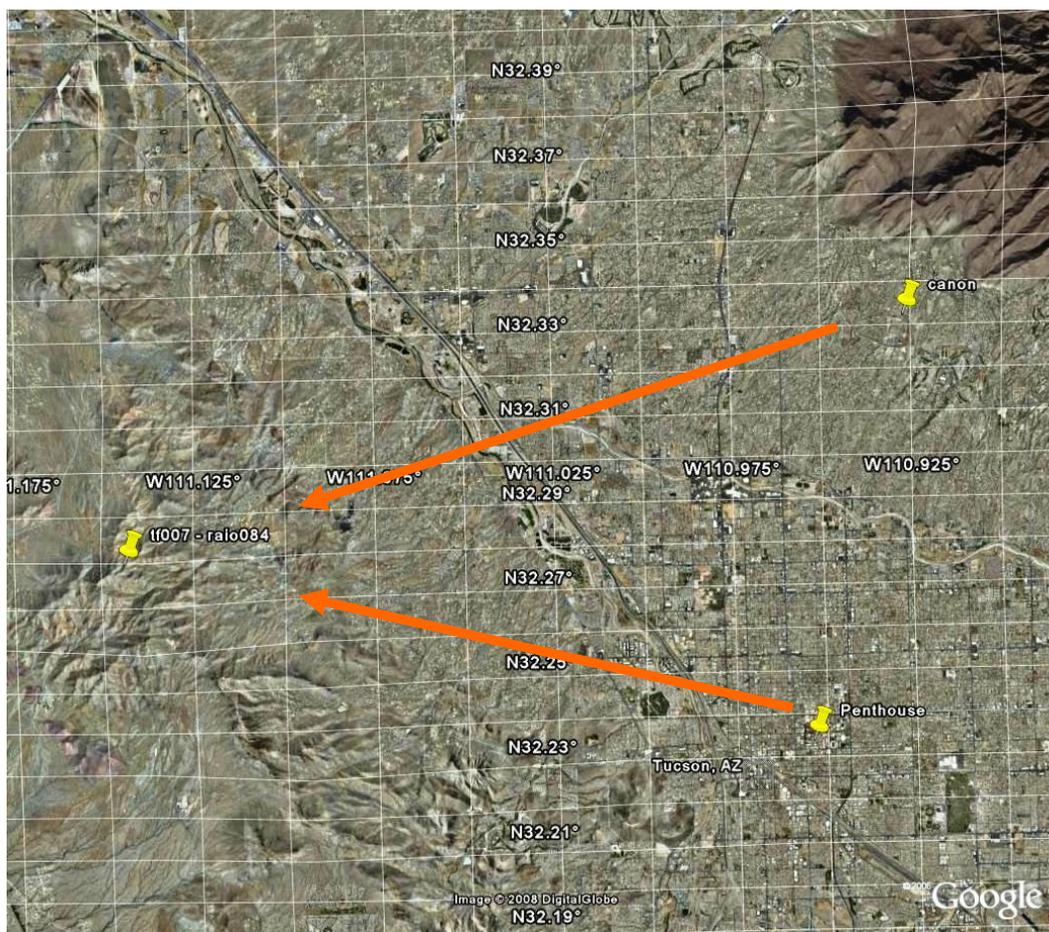


Figura 7.16 - Posição das câmeras em relação ao ponto de impacto do relâmpago (nomeado tf007 – raio 084).

A análise comparativa dos dois registros em vídeo permitiu observar que poderiam estar ocorrendo situações peculiares, como a mostrada na Figura 7.17 a seguir, nas quais líderes que aparentemente desenvolviam-se num nível superior por sobre um trecho pré-existente, como mostrado na imagem à esquerda obtida pela câmera rápida, na realidade estavam realmente propagando-se num nível superior, mas afastando-se do ramo existente, conforme revelou a imagem obtida pela câmera VHS mostrada à direita na Figura 7.17.

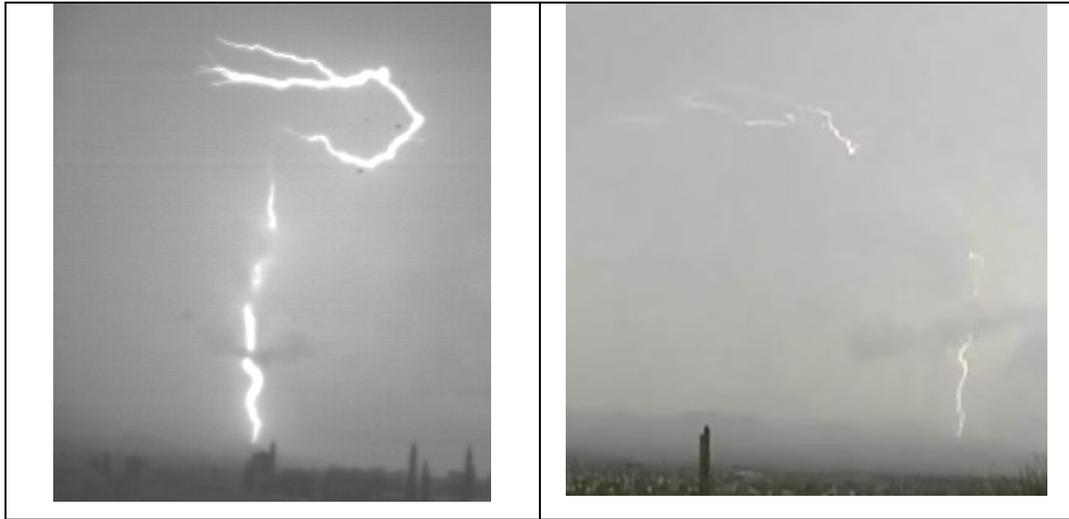
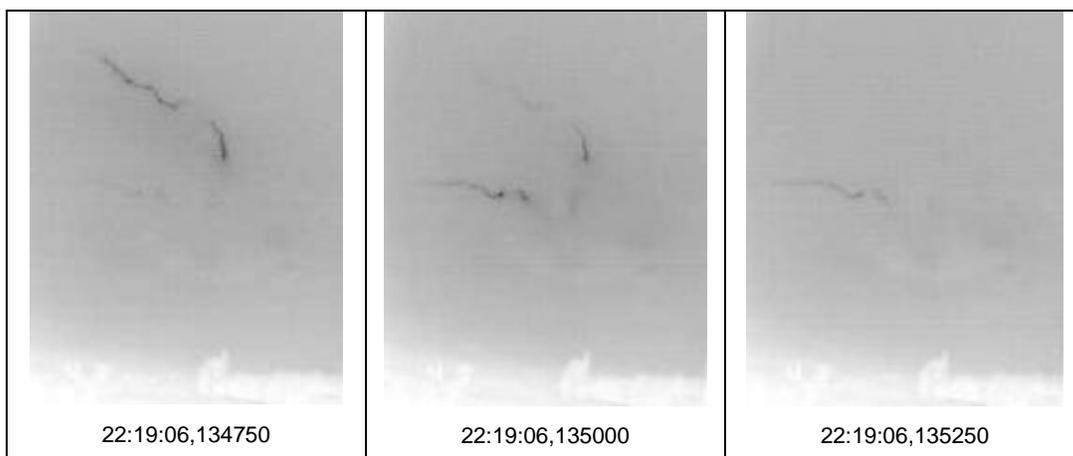


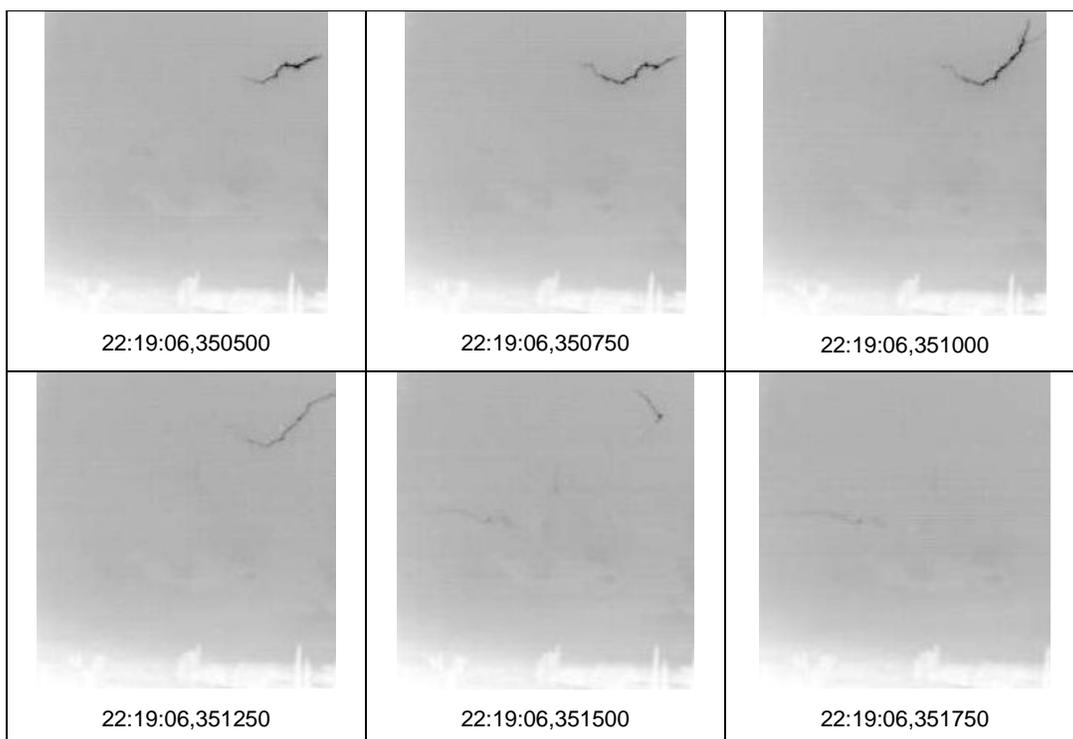
Figura 7.17 - Imagens comparativas da última descarga de retorno do relâmpago e da propagação do líder positivo na parte superior dos quadros. No lado esquerdo imagem registrada pela câmera rápida e no lado direito imagem registrada pela câmera VHS.

Portanto, ainda que a estratificação em camadas das ramificações do líder positivo seja claramente identificada, não é possível garantir que as camadas superiores estejam exatamente sobre as inferiores “cobrindo-as” ou “escondendo-as” das linhas de campo.

Por outro lado, a seqüência de imagens da Figura 7.18 a seguir, mostra *recoil leaders* propagando de ramos da camada superior da “árvore” em direção à extremidade de ramos de camadas inferiores ao invés de percorrer o canal principal em direção ao solo, numa evidência de que o processo de “estrangulamento” do campo que afeta a distribuição do potencial da nuvem na região do canal principal e dos ramos mais baixos, conforme ilustrado na Figura 4.24, está ocorrendo.



*Recoil leader – seqüência A*



*Recoil leader – seqüência B*

Figura 7.18 - Duas seqüências de imagens mostrando a propagação de *recoil leaders* partindo de um ramo da camada superior em direção à extremidade de um ramo da camada inferior.

É importante notar também que, mesmo utilizando um equipamento com excelente resolução temporal, muitas ramificações do líder positivo que eventualmente se propagaram por sobre as camadas inferiores podem não ter sido registradas em vídeo por apresentarem intensidade de brilho muito baixa, estarem obscurecidas pela nuvem ou ambos.

### **7.5 Deposição de carga negativa na extremidade inferior do canal “original”**

Krehbiel (1981), analisando os dados obtidos simultaneamente em 9 estações de medição situadas sob ou ao redor das tempestades, encontrou que as variações do campo elétrico das descargas para o solo usualmente exibiam uma rápida reversão no sinal uns poucos milissegundos depois da descarga de retorno nas estações de medida próximas ao ponto de impacto da descarga no solo. Durante esse intervalo, o campo elétrico nas estações mais distantes (5 km ou mais) continuou a ser positivo, como se uma curta descarga de corrente contínua estivesse ocorrendo. Isso indica, segundo o autor, que o canal extinguiu-se ao longo da sua extensão mais baixa enquanto corrente ainda estava fluindo na parte mais alta do canal. Krehbiel chamou esse período de “intervalo de interrupção” e encontrou que a duração desse período é, tipicamente, de 5 ms ou menos. O autor observou, para algumas das descargas de retorno, que a variação do campo nesse intervalo é encerrada por um pequeno e rápido evento do tipo variação-K, que também transfere carga negativa para a parte mais baixa do canal. Portanto, a atividade de interrupção deposita carga negativa ao longo da parte inferior e média do canal. Os resultados quantitativos de Krehbiel (1981) mostram que, seguindo a interrupção, 1 Coulomb ou mais de carga negativa pode ser depositada no canal em baixa altitude.

Shao et al. (1995) observam que, para relâmpagos próximos, as variações do campo para descargas para o solo freqüentemente apresentam polaridade

invertida em relação às aquelas observadas a grandes distâncias. Isso indica, segundo os autores, que uma certa quantidade de carga negativa é deixada para trás na parte mais baixa do canal, em concordância, segundo esses autores, com os resultados obtidos por Livingston e Krider (1978), os quais mostram que carga negativa residual encontra-se a baixa altitude, entre 1 a 2 km do solo.

Mazur et al. (1995) dão seqüência às idéias de Shao et al. (1995) estudando um relâmpago nuvem-solo com seis descargas de retorno. Os autores observaram que o campo elétrico da primeira descarga de retorno interrompeu abruptamente sua variação, tornando-se plana 0,5 ms depois do início da descarga, conforme mostra a Figura 7.19. Os autores informam que essa observação foi feita a uma distância intermediária do canal para o solo e indica que a descarga iniciou a interrupção naquele instante. Segundo os autores, o fato que a primeira descarga não inundou o seu quadro do vídeo com luz, também indica que ela foi interrompida bruscamente.

Na tentativa de entender porque algumas descargas iniciam novos canais para o solo, Mazur et al. (1995) consideram importante o fato que tais descargas quase sempre ocorrem após uma descarga inicial. Por descarga inicial os autores entendem a primeira descarga descendo em um dado canal. Uma vez que descargas iniciais são ramificadas e têm pronunciadas variações na interrupção, os autores concluem que seus resultados indicam que descargas iniciais podem de alguma forma ser mais susceptíveis de serem interrompidas mais cedo durante a descarga e/ou que os efeitos da interrupção são exacerbados durante descargas iniciais, tanto pelo aumento da carga acessível ao longo dos ramos do líder como na região fonte da nuvem. Quando uma descarga desaparece, o ponto de interrupção seria esperado progredir para cima no canal, preenchendo com carga negativa trechos do canal progressivamente mais altos. O canal, como resultado, poderia ser descrito

como “sendo preenchido” com carga negativa durante a interrupção (MAZUR et al.,1995).

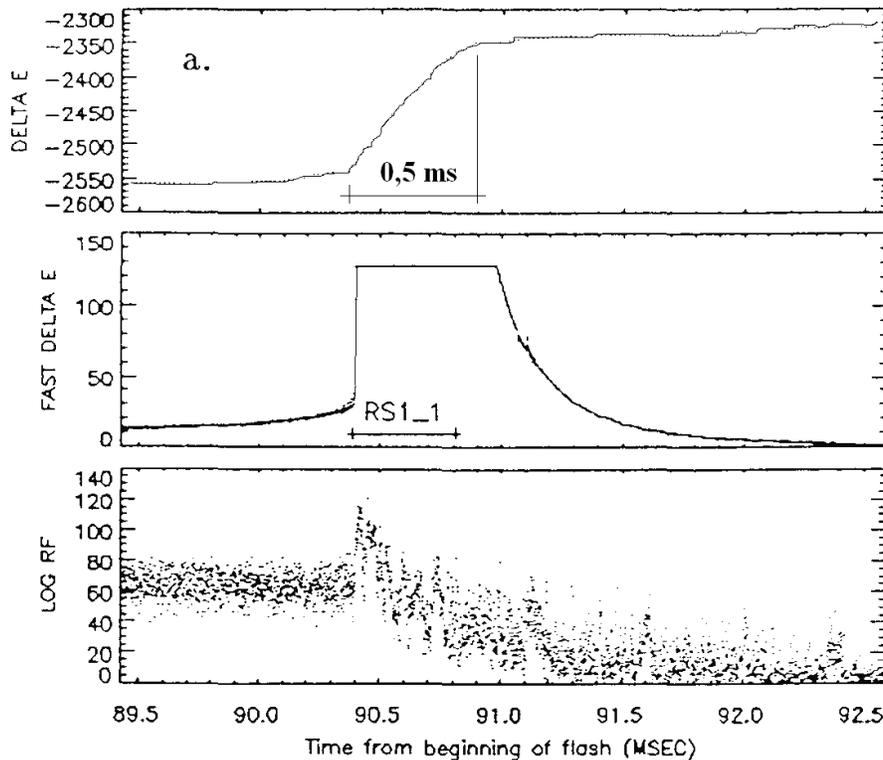


Figura 7.19 - O aplanamento da forma de onda do campo elétrico (Delta E) 0,5 ms depois do início da descarga de retorno indica que o canal para o solo interrompeu-se naquele instante.

Fonte: Adaptada de Mazur et al. (1995)

Assim que o canal torna-se interrompido, passa a se comportar como um condutor isolado imerso no campo elétrico ambiente. Nessa situação, três fontes podem dar origem à carga residual negativa depositada na extremidade inferior do canal. Uma possível fonte é a carga negativa armazenada na bainha de corona que se forma ao redor do canal (com diâmetro de poucos metros) que, pela ação do campo, é direcionada para a extremidade mais baixa do canal. As outras fontes, mais efetivas, são: (i) a carga depositada nas diversas ramificações criadas durante o desenvolvimento do líder escalonado ou do líder

contínuo-escalonado, no caso de novos canais ocorrendo após canais iniciais e (ii) a progressão das extremidades positivas do líder bi-direcional que conduzem carga positiva para dentro do centro de cargas negativas, efetivamente removendo, portanto, carga negativa dele (COORAY, 2003). Como resultado, a carga negativa “líquida” do centro de carga diminui e a carga negativa transportada para a extremidade inferior do canal aumenta com o desenvolvimento do líder positivo.

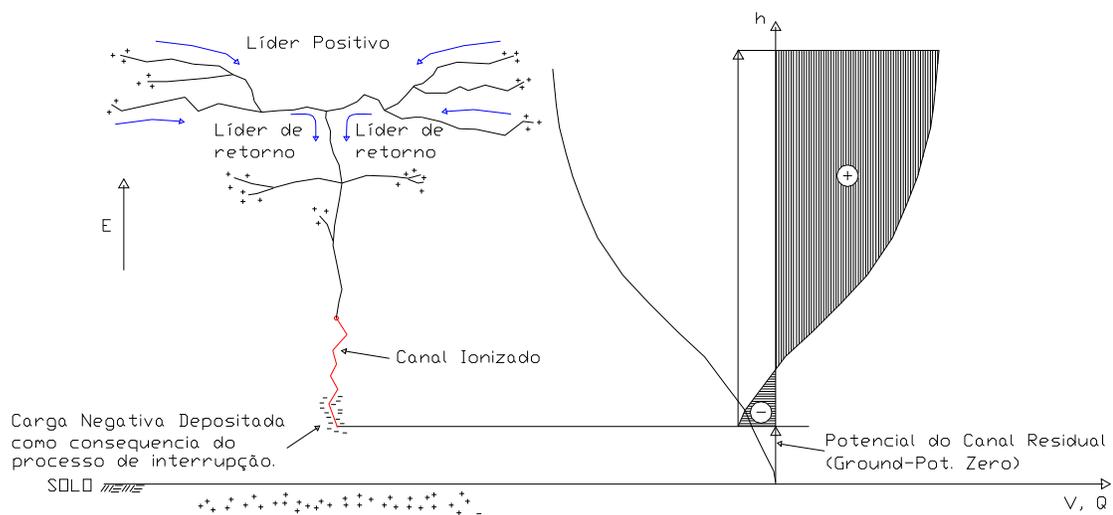


Figura 7.20 - Deposição de carga negativa na extremidade inferior do canal “original”.  
O gráfico à direita mostra a variação no potencial do canal do líder depois da interrupção e a redistribuição de carga no mesmo.

A deposição de carga poderia ocorrer ou durante a interrupção da descarga prévia ou durante “*attempted leaders*”, que são os líderes que não conseguem alcançar o solo, posteriores à interrupção.

Mazur et al. (1995) notaram que a deposição de carga negativa na parte mais baixa do canal provê uma explicação mais direta para a ocorrência de líderes contínuo-escalonados e para os “*attempted leaders*”, quando eles ocorrem.

A Figura 7.20 mostra, no seu lado esquerdo, a deposição de carga negativa na extremidade inferior do canal, próximo ao ponto de interrupção do mesmo. No lado direito é mostrada a variação no potencial do líder depois da interrupção e o processo de redistribuição de carga (mudança de polaridade seguida do aumento da carga negativa na extremidade inferior) do canal como consequência da atividade dos líderes de retorno (*recoil leaders*).

## 7.6 Criação do líder contínuo-escalonado

### 7.6.1 Hipótese proposta

O transporte de cargas negativas para a extremidade inferior do canal do relâmpago é feito, segundo Mazur (2002), pelos líderes de retorno (*recoil leaders*), que surgem como consequência da propagação continuada do líder positivo na região do centro de cargas negativas no interior da nuvem.

No passado, os *streamers* de retorno foram interpretados como equivalentes a “mini descargas de retorno” transportando cargas negativas nos relâmpagos intranuvem ou durante o desenvolvimento, no interior da nuvem, de relâmpagos nuvem-solo, quando alguns líderes alcançavam pacotes de cargas espaciais de sinal oposto (BRUCE e GOLDE, 1941; BRUCE, 1944). A denominação dessas “mini descargas de retorno” como *streamers* de retorno (também chamados de variações-K) foi devida à similaridade das suas formas de onda observadas a partir de medidas do campo elétrico (OGAWA, 1964), com o tipo de variações observado nos registros do campo das descargas de retorno em relâmpagos nuvem-solo. No entanto, segundo a interpretação da teoria “clássica”, a natureza dos *streamers* de retorno e seu papel na seqüência dos processos do relâmpago permanecem confusos.

Segundo a interpretação dada por Mazur (2002), os *streamers* de retorno são líderes negativos que se auto-propagam, movendo-se ao longo da trilha previamente desenvolvida por partes positivamente carregadas de líderes bi-

direcionais. Como líderes negativos, segundo Mazur, eles deveriam ser mais propriamente chamados de líderes de retorno (*recoil leaders*) do que de *streamers* de retorno. Como já mencionado no Capítulo 4, *streamers* são filamentos frios de corona com comprimento de uns poucos metros, enquanto que líderes são canais de plasma quente e são auto-propagantes. Líderes contínuos em relâmpagos nuvem-solo (*dart leaders*) são líderes de retorno que alcançam o solo, quando falham em alcançar o solo são denominados “*attempted leaders*”. As condições sob as quais a iniciação dos líderes de retorno ocorre continuam a não ser plenamente entendidas (MAZUR, 2002).

Krehbiel (1981) reporta que a carga residual depositada na extremidade mais baixa do canal poderia causar o “desvio” do próximo líder contínuo e passar a ser, a partir desse ponto, um líder escalonado.

Shao et al. (1995), a partir da observação de um relâmpago que apresentou um comportamento específico, oferecem uma explicação para o desvio do líder contínuo. Nesse relâmpago, depois de três tentativas de reconectar o canal da primeira descarga de retorno ao solo, o quarto líder tem sucesso, mas ao longo de um novo caminho a partir de um determinado ponto do canal existente. Portanto, segundo os autores, a carga residual depositada na extremidade inferior do canal provê uma possível explicação porque os primeiros *attempted leaders* não conseguem alcançar o solo e a quarta tentativa tem sucesso, através de um novo canal.

Segundo Mazur et al. (1995), o “preenchimento” do canal com carga negativa durante a interrupção, a partir da sua extremidade inferior, poderia causar a tomada de um caminho diferente para o solo da descarga de retorno seguinte. Os autores informam, ainda, que descargas posteriores descendo pelo canal da primeira descarga não mostraram evidências de rápida interrupção.

Um programa que simula a propagação do líder em relâmpagos nuvem-solo, deslocando-se com passos de 50 m, com ponto de iniciação localizado a 2 km de altura, foi utilizado para verificar o comportamento dos líderes subseqüentes quando uma carga de -1 C é inserida a 1 km de altura no canal da descarga anterior. A simulação mostrou que este depósito de carga negativa de fato provoca o desvio do líder seguinte (LACERDA, 2008).

Adicionalmente, líderes contínuo-escalonados teriam uma tendência a seguir *attempted leaders*, os quais também levam carga negativa para baixa altitude no canal.

Portanto, a partir de um determinado ponto, o líder contínuo deixa o canal existente formado pela descarga de retorno “original” e passa a procurar um novo caminho para o solo como um líder escalonado, conforme mostrado no lado esquerdo da Figura 7.21.

O lado direito da Figura 7.21 mostra que o potencial do canal do relâmpago continua a aumentar em relação ao potencial do trecho resistivo do canal que continua conectado ao solo. É mostrada, também, a redistribuição de carga ao longo do mesmo em função do desenvolvimento das extremidades positivas do líder na parte superior do canal, causando um aumento da carga negativa na região próxima ao ponto de interrupção.

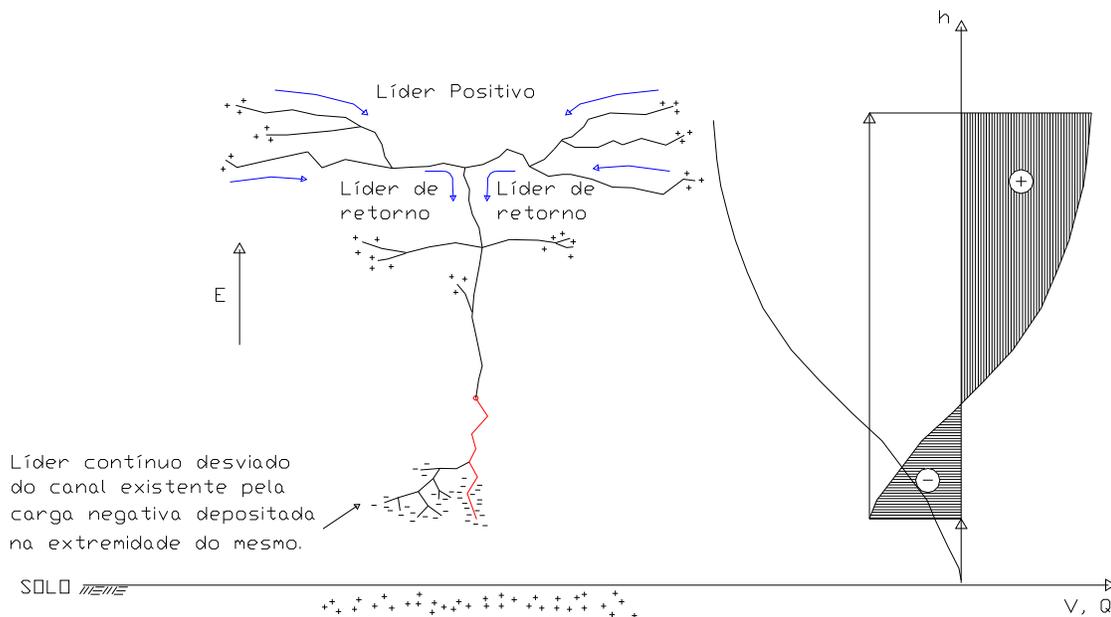


Figura 7.21 - Desvio do líder contínuo devido à carga negativa na extremidade inferior do canal “original”. O gráfico à direita mostra a variação no potencial do canal do líder e a redistribuição de carga no mesmo.

### 7.6.2 Comprovação através do relâmpago analisado

As imagens de vídeo mostram a seqüência de ramificações iluminadas, a partir das extremidades do líder positivo em direção à origem do relâmpago, indicando a ocorrência de líderes de retorno (*recoil leaders*) que irão depositar carga negativa na extremidade inferior do canal nos casos em que falham em conectar o solo (chamados, então, de *attempted leaders*) ou dando origem a uma nova descarga de retorno quando têm sucesso em alcançar o solo (chamados, neste caso, de líderes contínuos - *dart leaders* – quando o canal existente é utilizado, ou líderes contínuo-escalonados – *dart stepped leaders* – ao se desviarem do canal original criando um novo caminho para o solo).

A Figura 7.22 mostra, em seqüência, o líder de retorno percorrendo os canais existentes da árvore criados pelo líder positivo (de A a D), o instante da

reconexão do 3º canal do relâmpago com o solo (E) e, por fim, a descarga de retorno transportando o potencial do solo até as extremidades superiores causando a energização do processo de quebra de rigidez e a propagação do líder positivo criando um novo ramo horizontal logo acima do existente (F). O desenho esquemático mostra o caminho percorrido pelo líder de retorno até alcançar o solo e provocar uma nova descarga de retorno.

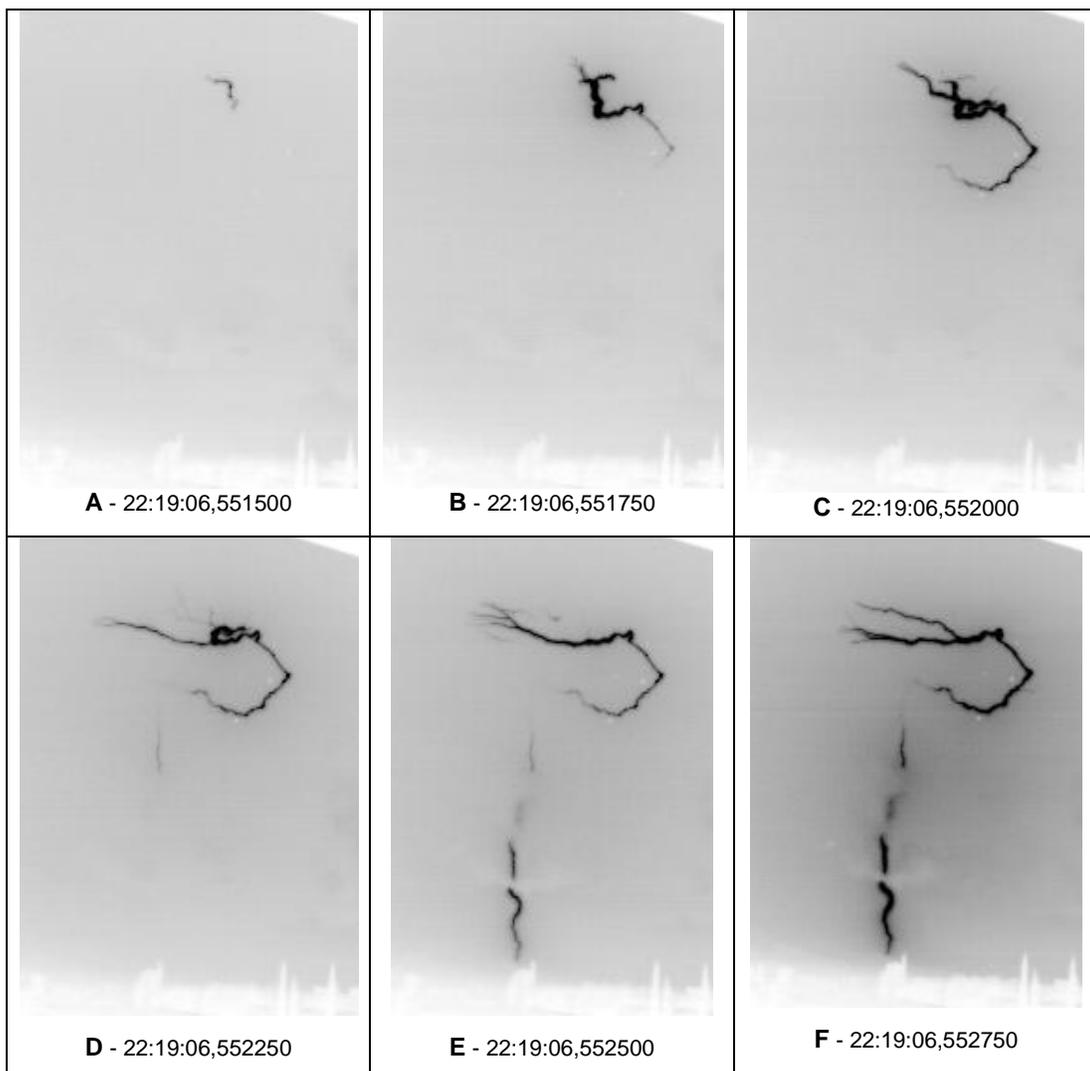


Figura 7.22 - Líderes de retorno (*recoil leaders*). Líderes de retorno alimentando os *attempted leaders* e/ou os líderes contínuos (*dart leaders*) que darão origem à próxima descarga de retorno. (continua)

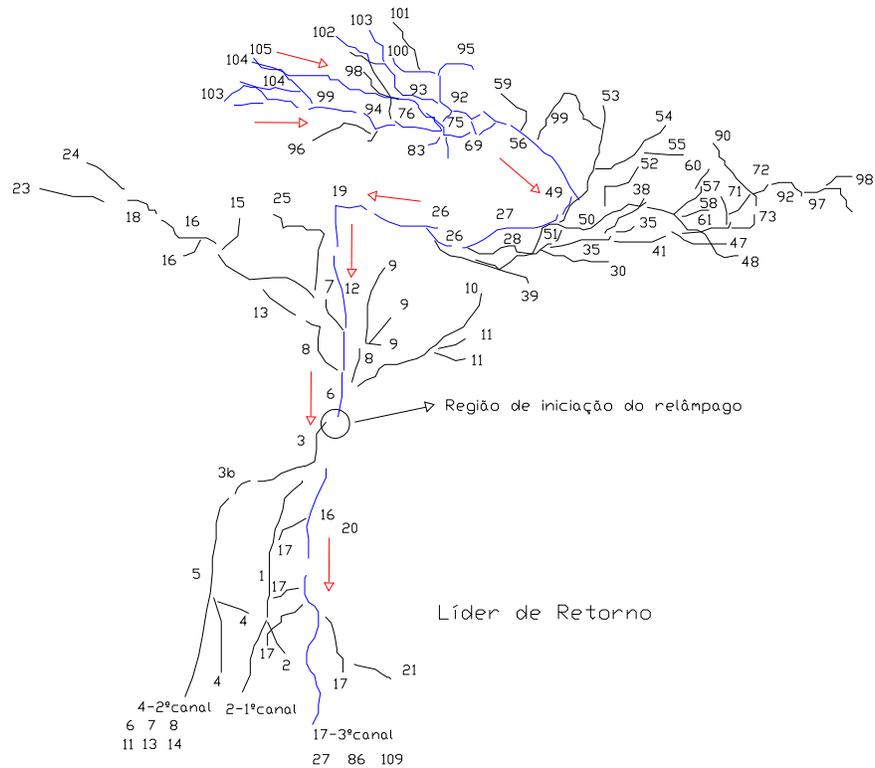


Figura 7.22 – (conclusão).

## 7.7 Propagação do líder contínuo-escalonado

### 7.7.1 Hipótese proposta

Shao et al. (1995) afirmam que a principal razão para que líderes morram antes de alcançar o solo é que não há energia suficiente disponível para re-ionizar o caminho todo do canal até o solo. Os autores observam, no entanto, que muitos dos líderes que falham em alcançar o solo (*attempted leaders*) conseguem chegar muito próximo a ele.

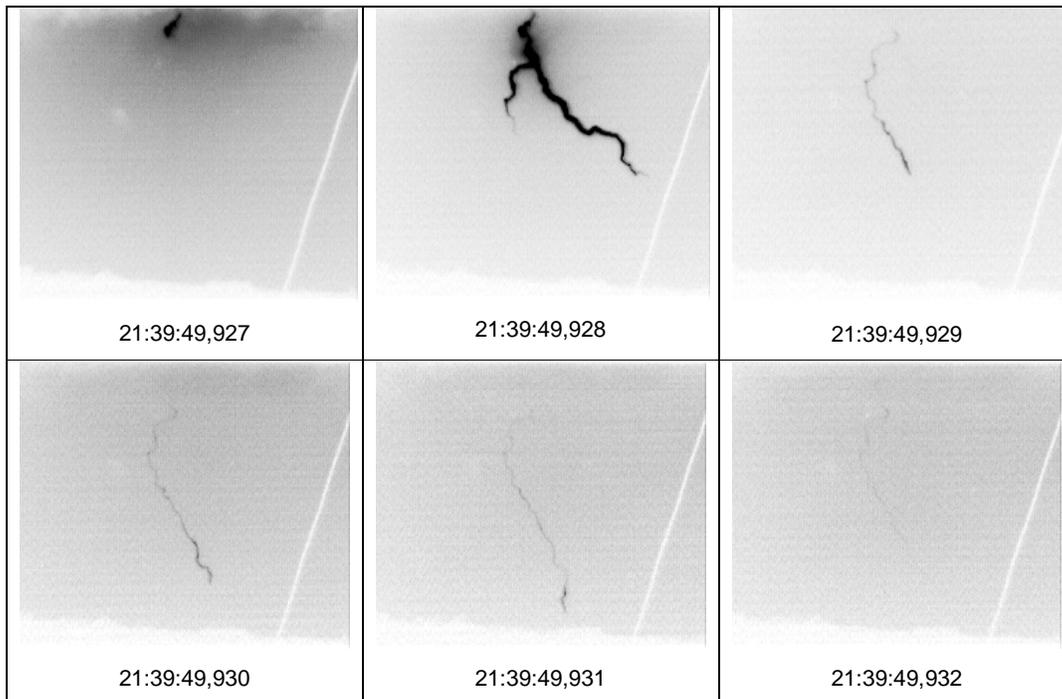


Figura 7.23 - Seqüência de imagens mostrando um *attempted leader*. Relâmpago nuvem-solo negativo registrado em 17/12/2004 a 4 km de distância em São José dos Campos - SP.

O líder contínuo-escalonado aproxima-se do solo em um ponto distinto do ponto de contato da descarga “original”.

A Figura 7.24 mostra o instante imediatamente anterior à conexão do líder contínuo-escalonado com o novo ponto de impacto no solo. Vale a pena notar que as cargas negativas transportadas pelos *recoil leaders* depositam-se tanto nos novos ramos do líder escalonado como no trecho do canal original que permanece conectado ao canal do relâmpago.

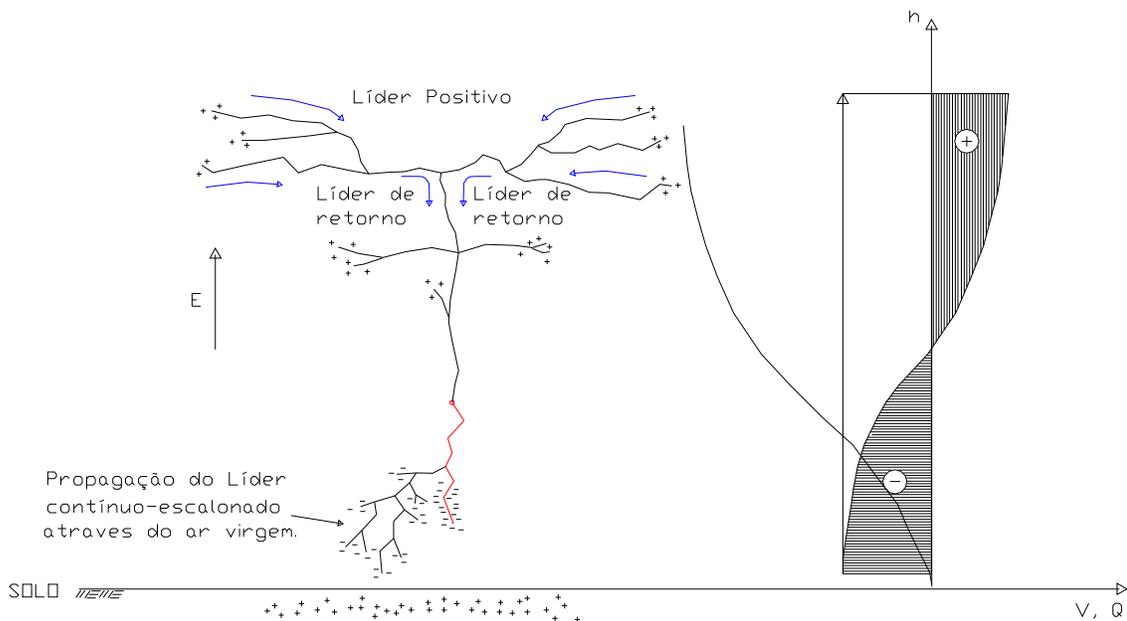


Figura 7.24 - Propagação do líder contínuo-escalonado em busca de um novo caminho para o solo. O gráfico à direita mostra a variação no potencial do canal do líder e a redistribuição de carga no mesmo.

### 7.7.2 Comprovação através do relâmpago analisado

Na Figura 7.25 é mostrado o ponto de contato no solo e o trajeto completo do canal da primeira descarga de retorno desde o ponto de iniciação do relâmpago (o trecho negativo do líder bi-direcional).

A carga negativa depositada na extremidade mais baixa do canal, durante e após o processo de interrupção do canal, causa o desvio dos *attempted leaders* e do líder contínuo seguinte, conforme mostrado nas Figuras 7.26 a 7.30 a seguir, passando o mesmo a buscar um novo caminho até o solo, tornando-se, então, um líder contínuo-escalonado.



Figura 7.25 - Formação do primeiro canal do relâmpago. A imagem à direita mostra o canal cujo contato com o solo já se encontra estabelecido. Na figura à esquerda é possível ver a seqüência cronológica dos eventos desde a iniciação do relâmpago.

A região do canal principal onde ocorre o desvio dos líderes contínuos ou dos *attempted leaders*, abaixo da qual está situado o ponto de interrupção do canal e o depósito de carga negativa que provoca o desvio, pôde ser determinada.

#### 7.7.2.1 O desvio para o segundo canal do relâmpago.

Não é perceptível nenhuma atividade do líder positivo no interior da nuvem entre a primeira e a segunda descarga de retorno. As únicas atividades perceptíveis no registro em vídeo são dois *attempted leaders* que já buscam um novo trajeto para a segunda descarga de retorno.

Portanto, mesmo não havendo registro de propagação do líder positivo, do processo de interrupção do canal ou de *recoil leaders* transportando carga negativa para a extremidade inferior do canal da primeira descarga no período entre a primeira e a segunda descarga de retorno, houve o desvio dos *attempted leaders* mencionados, o que permitiu identificar a região do canal onde ocorreu tal desvio, conforme mostra a Figura 7.26.

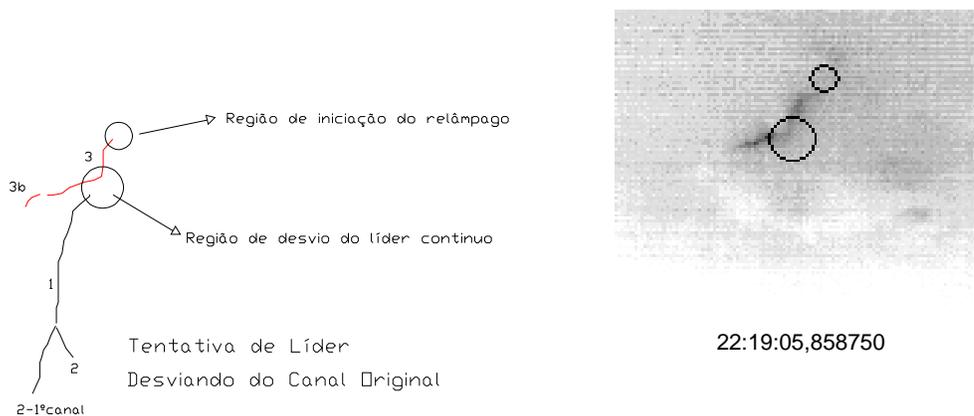


Figura 7.26 - Desvio do líder contínuo do canal formado pela descarga de retorno anterior. A imagem à direita mostra o desvio de líder contínuo buscando um novo canal já na segunda descarga de retorno. Na figura à esquerda é possível ver a seqüência cronológica dos eventos desde a iniciação do relâmpago.

Como a região de iniciação foi estimado estar a cerca de 3,5 km de altura, pode-se supor que a região do desvio encontre-se entre 2 e 3 km. Portanto, o depósito de carga negativa deve encontrar-se abaixo de 2 km, o que está de acordo com os resultados obtidos por Livingston e Krider (1978).

Na Figura 7.27 é mostrada a segunda descarga de retorno. A imagem permite visualizar o novo ponto de contato no solo e o trajeto percorrido pelo novo canal desde o ponto de iniciação do relâmpago, passando pelo trecho de canal percorrido pelos *attempted leaders* precedentes.

Ocorreram seis descargas subseqüentes à segunda antes que um novo desvio levasse à criação do terceiro canal do relâmpago quando da ocorrência da nona descarga de retorno. Durante o período em que o segundo canal foi utilizado surgiram as primeiras imagens do desenvolvimento dos canais do líder positivo acima do ponto de iniciação do relâmpago.

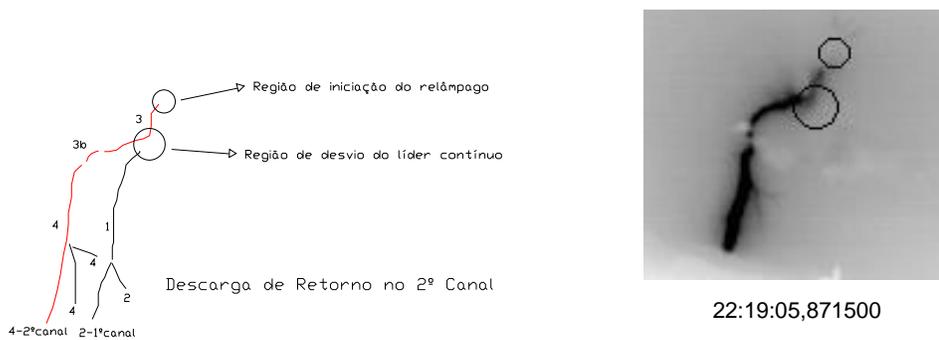


Figura 7.27 - Descarga de retorno no novo canal. A imagem à direita mostra a primeira descarga de retorno que percorreu o segundo canal do relâmpago, ainda são visíveis as ramificações do líder contínuo-escalonado. Na figura à esquerda é possível ver a seqüência cronológica dos eventos desde a iniciação do relâmpago.

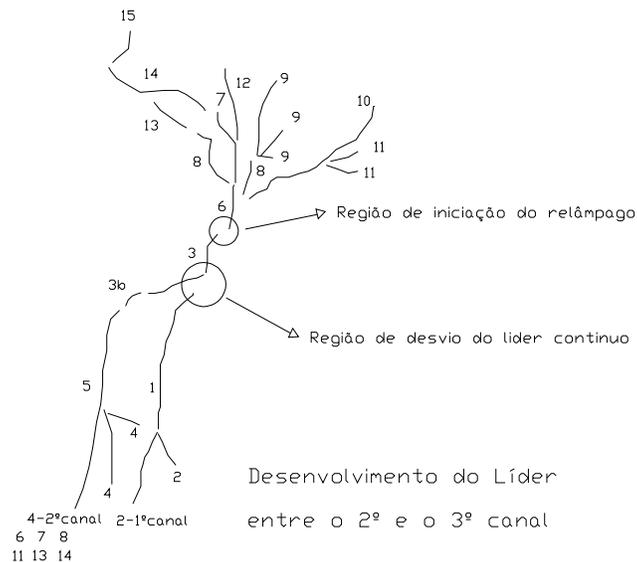


Figura 7.28 - Desenvolvimento do líder positivo no período em que ocorreram as seis descargas de retorno subseqüentes à 2º.

Conforme explicado no início deste capítulo, a numeração que aparece ao lado de cada trecho de canal indica a seqüência cronológica de aparecimento do

mesmo durante o desenvolvimento do relâmpago. As descargas de retorno ocorridas são mostradas na base da Figura 7.28, logo abaixo do canal percorrido por cada uma delas, e estão associadas ao trecho de canal que se desenvolveu simultaneamente à sua ocorrência, como consequência da propagação do líder positivo “energizada” por ela.

### 7.7.2.2 O desvio para o terceiro canal do relâmpago.

Pode ser identificado no registro em vídeo o trecho do líder positivo associado com o *attempted leader* que é desviado do canal anterior na mesma região onde ocorreu o desvio do primeiro canal, conforme mostra a Figura 7.29 a seguir.

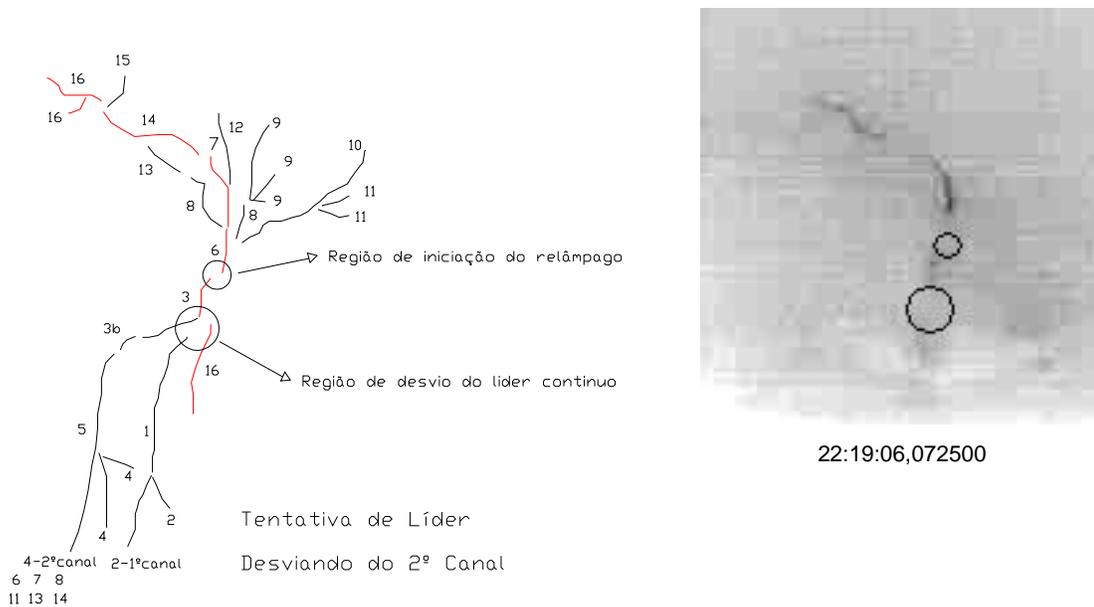
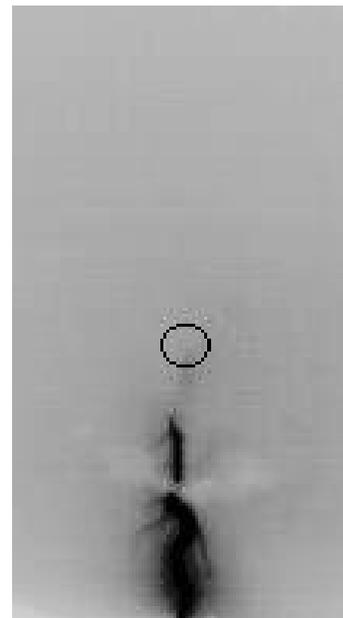
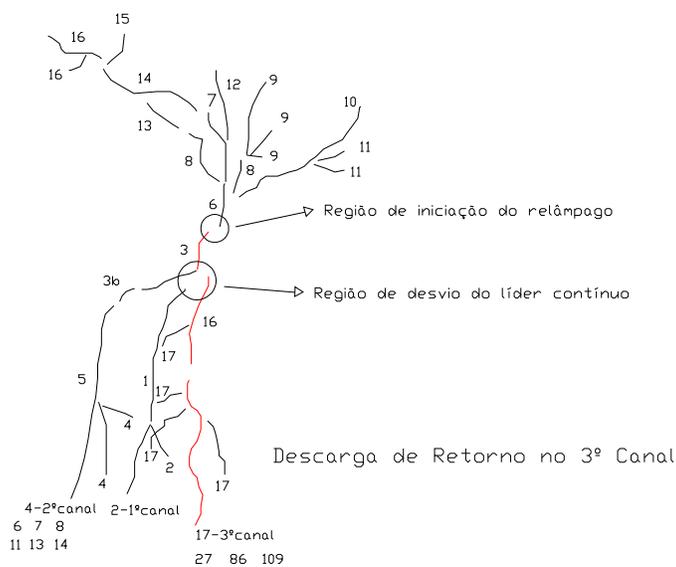


Figura 7.29 - Desvio do *attempted leader* do canal formado pela descarga de retorno anterior. A imagem à direita mostra o *attempted leader* buscando um novo canal na nona descarga de retorno. Na figura à esquerda é possível ver a seqüência cronológica dos eventos desde a iniciação do relâmpago, inclusive o trecho do líder positivo associado com o *attempted leader*.

Na Figura 7.30 é mostrada a nona descarga de retorno percorrendo o terceiro canal do relâmpago. A imagem permite visualizar o terceiro ponto de contato no solo e o trajeto percorrido pelo novo canal desde o ponto de iniciação do relâmpago, passando pelo trecho de canal percorrido pelo *attempted leader* precedente.



22:19:06,072750

Figura 7.30 - Descarga de retorno no terceiro canal. A imagem à direita mostra a nona descarga de retorno que percorreu o terceiro canal do relâmpago, ainda são visíveis as ramificações do líder contínuo-escalonado. Na figura à esquerda é possível ver a seqüência cronológica dos eventos desde a iniciação do relâmpago.

Ocorreram três descargas subseqüentes à nona antes do término do relâmpago. Durante o período em que o terceiro canal foi utilizado ocorreu a maior parte da atividade visível do líder positivo no interior da nuvem. Portanto, foi nesse período que puderam ser visualizados alguns dos processos que ocorrem durante o desenvolvimento do relâmpago.

### 7.7.2.3 A influência dos *attempted leaders* na criação de um novo canal.

A Figura 7.31 mostra, para o relâmpago em análise, a seqüência dos *attempted leaders* anteriores ao desenvolvimento do segundo canal. O primeiro *attempted leader* desviado do primeiro canal e que deu início ao trajeto a ser percorrido pelo segundo ocorreu 53 ms depois da descarga de retorno imediatamente anterior. Houve um segundo *attempted leader* na direção do segundo canal 6 ms após a primeira e, finalmente, o líder contínuo-escalonado bem sucedido, que resultou na descarga de retorno no segundo canal, ocorreu 13 ms depois do segundo *attempted leader* (72 ms depois da descarga de retorno no primeiro canal).

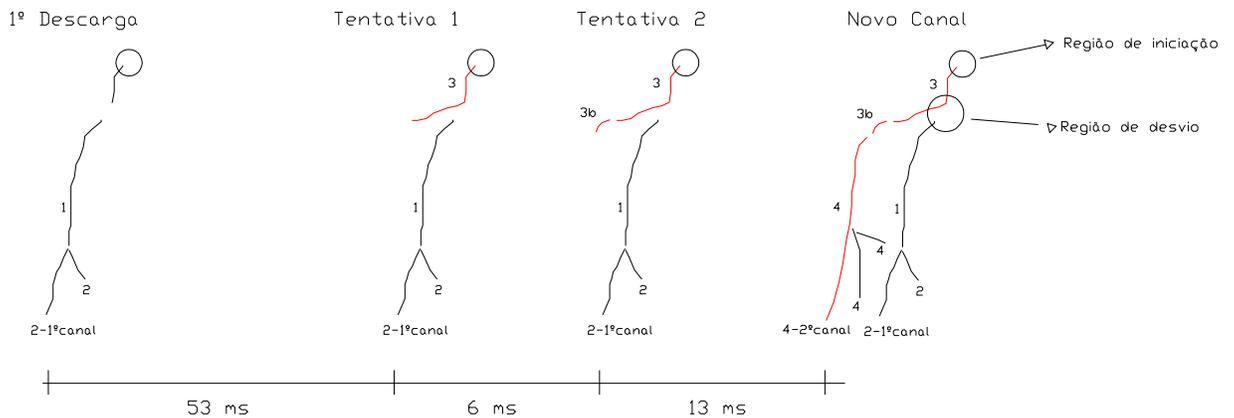


Figura 7.31 - Intervalos de tempo entre os *attempted leaders* anteriores ao segundo novo canal.

Apenas um *attempted leader* ocorreu antes da criação do terceiro canal. Esse *attempted leader* desviou do segundo canal dando início ao trajeto do terceiro 49 ms depois da descarga de retorno imediatamente anterior. O líder contínuo-escalonado bem sucedido, que resultou na descarga de retorno no terceiro canal, ocorreu 7 ms depois do único *attempted leader* (56 ms depois da descarga de retorno no segundo canal imediatamente anterior).

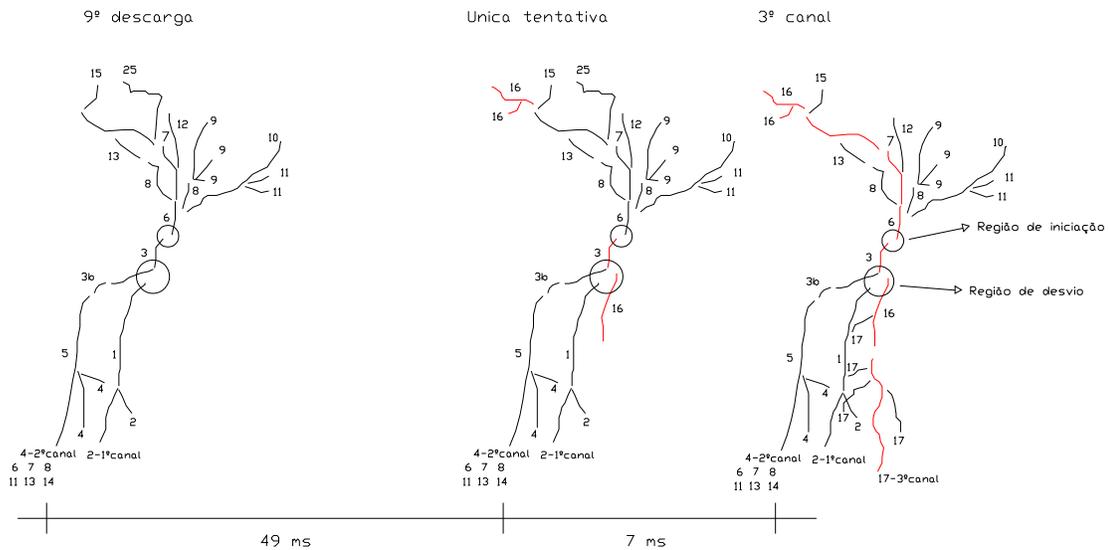


Figura 7.32 - Intervalos de tempo entre os *attempted leaders* anteriores ao terceiro novo canal.

No estudo realizado por Mazur (1995), o líder contínuo-escalonado ocorreu em um intervalo de tempo relativamente longo (145 ms) depois da primeira descarga de retorno. No estudo de Shao et al., três *attempted leaders* ocorreram em intervalos de 20 a 35 ms depois da descarga inicial, seguidas por um líder contínuo-escalonado finalmente bem sucedido na quebra de rigidez do último 1 km para o solo. O líder contínuo-escalonado analisado por Rhodes et al. (1994) seguiu um *attempted leader* ocorrido 62 ms depois da descarga inicial. Tanto Shao et al. (1995) como Mazur (1995) sugeriram que suas observações seriam explicadas se carga negativa fosse deixada para trás na parte mais baixa do canal pela descarga inicial.

Portanto, no caso do relâmpago em estudo, ocorreram situações semelhantes aos casos estudados por Mazur (1995) e Shao et al. (1995), ou seja, antes de cada líder contínuo-escalonado, ocorreram *attempted leaders* que desviaram dando início ao canal que seria percorrido pela descarga de retorno seguinte.

## 7.8 Descarga de retorno do novo canal

No lado esquerdo da Figura 7.33 é mostrado o instante em que o líder contínuo-escalonado toca o solo estabelecendo um novo canal para a descarga de retorno. Nesse instante o processo de neutralização da carga negativa do canal tem início a partir do solo, transferindo carga positiva até a extremidade superior do mesmo.

Novamente, depois do contato com o solo o relâmpago assumirá o potencial da terra e, novamente, a carga injetada pela descarga de retorno se distribuirá uniformemente ao longo do canal do relâmpago, nos mesmos moldes da carga distribuída numa linha de transmissão ao ser conectada à fonte geradora.

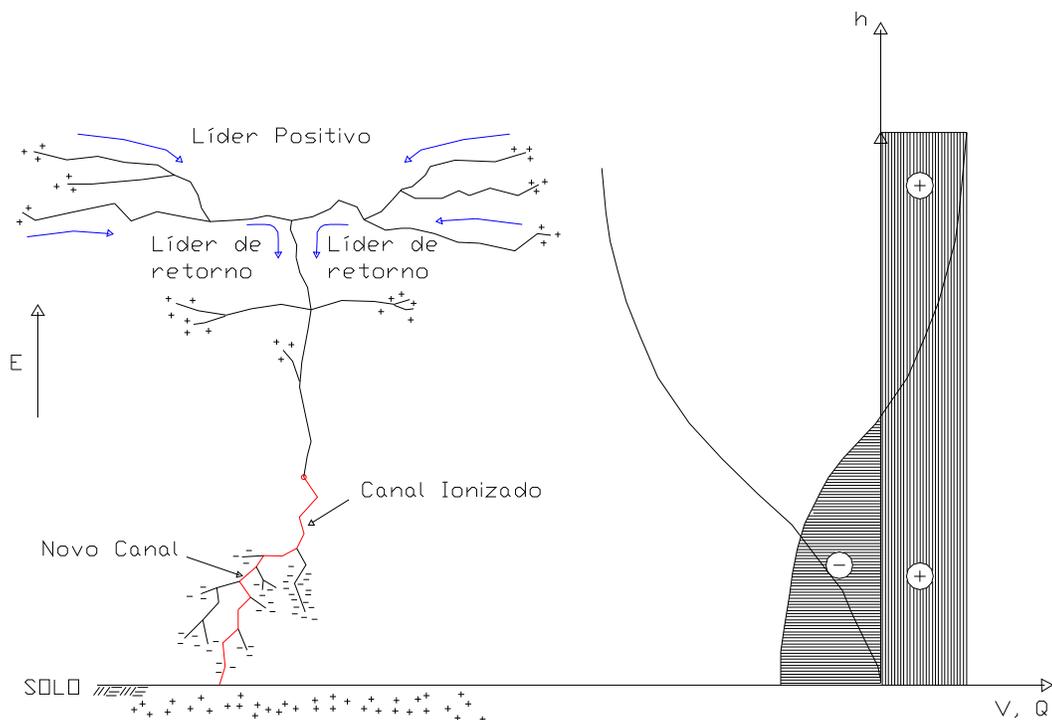


Figura 7.33 - Descarga de retorno no novo canal. O gráfico à direita mostra o potencial no canal do líder levado a zero devido ao contato com o solo e a carga transferida ao canal pela descarga de retorno.

No lado direito da Figura 7.33 é mostrado que toda a extensão do canal (condutor) está, novamente, no mesmo potencial do solo (zero). É mostrada, também, a carga positiva transferida pela descarga de retorno, distribuída ao longo do canal.

### **7.9 Novo canal**

O lado esquerdo da Figura 7.34 mostra que a carga negativa depositada nos diversos ramos do líder contínuo-escalonado também se moveu em direção ao novo canal devido à diferença de potencial entre a extremidade de cada ramo e o solo (novo canal). Mostra, ainda, o desenvolvimento do líder positivo dentro da nuvem, na região do centro de cargas negativas.

Pode-se supor que o trecho do canal “original” compreendido entre a sua extremidade mais baixa e o ponto de desvio do novo canal tem sua ionização “reforçada”, uma vez que uma considerável quantidade de carga (cerca de 1 C ou mais) depositados nessa região durante o processo de interrupção (KREHBIEL,1981) são escoados através dele em direção ao novo canal devido à diferença de potencial existente (MAZUR, comunicação pessoal, 2007).

O lado direito da Figura 7.34 mostra a redistribuição de cargas no canal. Novamente, como o canal está carregado positivamente, a maior parte da carga será concentrada, por ação do campo elétrico, na extremidade superior do mesmo. Como já foi dito anteriormente, estando o canal ainda conectado ao solo, a extremidade superior encontra-se submetida a uma grande diferença de potencial, com uma grande concentração de carga positiva. Essa situação “energiza” a produção de *streamers* em suas extremidades, favorecendo a extensão do líder positivo (MAZUR, 2002).

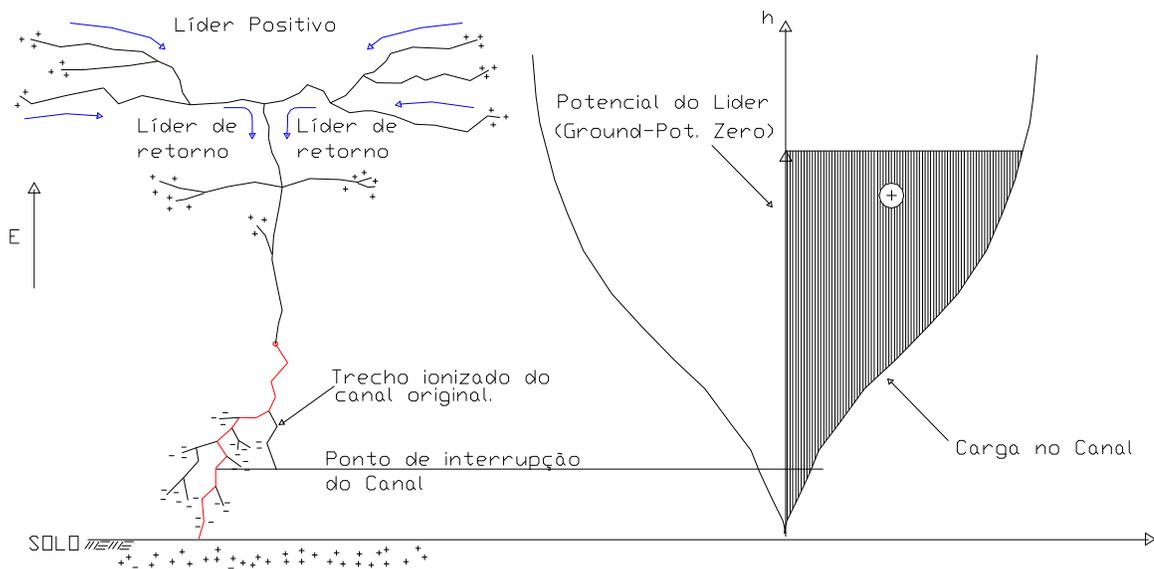


Figura 7.34 - Novo canal. O gráfico à direita mostra o potencial no canal do líder levado a zero devido ao contato com o solo e a redistribuição de carga no canal devido à ação do campo elétrico.

### 7.10 Interrupção do novo canal

Um novo processo de interrupção do canal (ou interrupção da corrente) ocorre, conforme descrito anteriormente no item 7.4. O lado esquerdo da Figura 7.35 mostra o instante da interrupção do canal (ou interrupção da corrente) desconectando-o do solo. Nessa situação, o novo canal se torna um longo condutor isolado imerso num campo elétrico.

Novamente, seguindo a interrupção do canal, a carga depositada pela descarga de retorno é “esticada” em função do alongamento do canal causado pela “energização” na propagação do líder positivo causada pela descarga de retorno. Como já foi dito, o alongamento do canal tem como consequência a diminuição da densidade de carga por unidade de comprimento do canal. Outro efeito já mencionado da propagação continuada do líder positivo após a interrupção do canal, que torna a repetir, é a diminuição da carga positiva, a inversão da sua polaridade e o posterior aumento de carga negativa na

extremidade inferior do canal. Isso faz com que o potencial do canal passe a novamente aumentar em relação ao trecho não condutor do novo canal que permanece conectado ao solo.

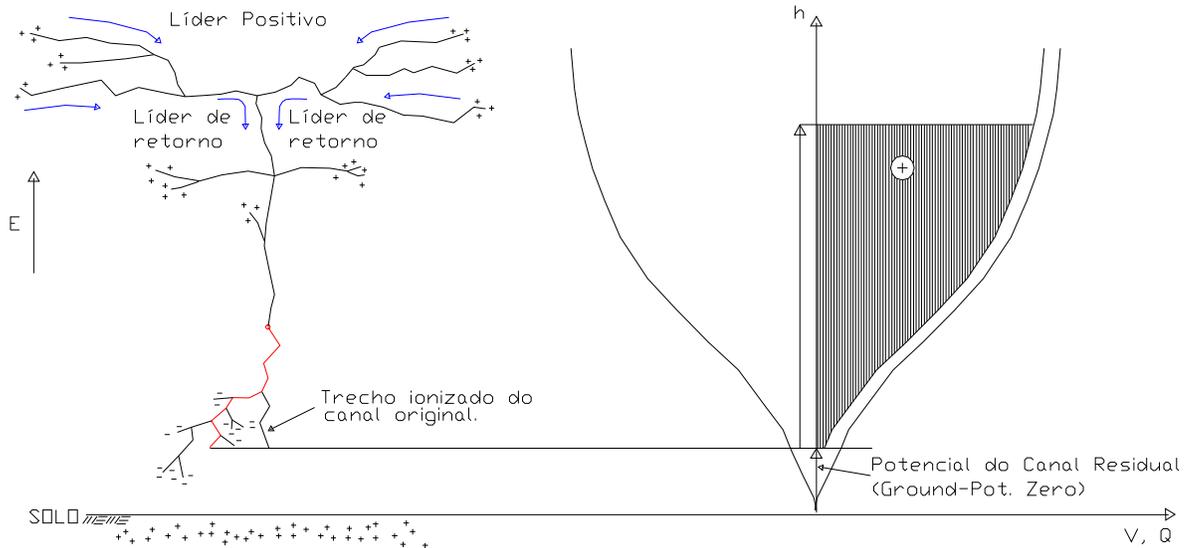


Figura 7.35 - Interrupção do novo canal. O gráfico à direita mostra a variação no potencial do canal do líder depois da interrupção pela ação do campo elétrico.

### 7.11 Deposição de carga negativa na extremidade inferior do novo canal

O novo canal passa a ser “preenchido” com carga negativa durante o processo de interrupção e pelos *recoil leaders* resultantes da progressão das extremidades superiores do líder positivo, conforme descrito no item 7.5 anterior.

A Figura 7.36 mostra, no seu lado esquerdo, a deposição de carga negativa na extremidade inferior do novo canal, próximo ao ponto de interrupção do mesmo.

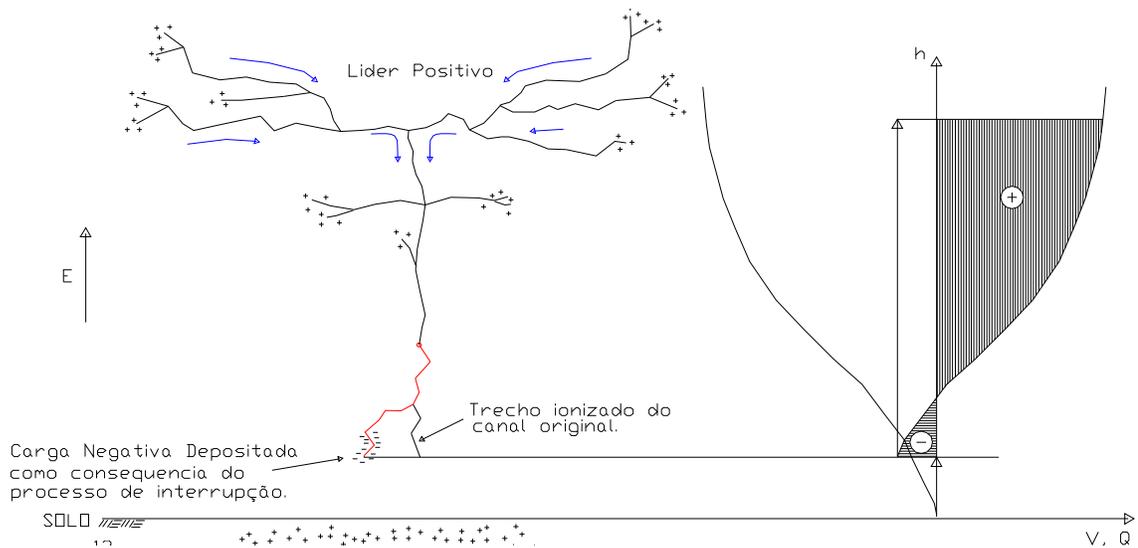


Figura 7.36 - Deposição de carga negativa na extremidade inferior do novo canal. O gráfico à direita mostra a variação no potencial do canal do líder depois da interrupção e a redistribuição de carga no mesmo.

No lado direito é mostrada a variação no potencial do líder depois da interrupção e o processo de redistribuição de carga no mesmo com a mudança de polaridade seguida do aumento da carga negativa na extremidade inferior do canal como consequência, principalmente, da atividade dos líderes de retorno (*recoil leaders*), bem como da carga negativa armazenada na bainha de corona que se forma ao redor do canal (com diâmetro de poucos metros) que, pela ação do campo, é direcionada para a extremidade mais baixa do canal.

### 7.12 Líder contínuo desviado para o canal “original”.

Novamente, a carga negativa depositada na extremidade mais baixa do novo canal causa o desvio do líder contínuo seguinte. Portanto, a partir de um determinado ponto, o líder contínuo deixa o canal existente formado pela descarga de retorno que seguiu um novo caminho para o solo.

Porém, em alguns casos, uma nova situação pode se apresentar. Conforme sugerido no item 7.9 anterior, pode-se supor que o trecho do canal “original”, compreendido entre a sua extremidade mais baixa e o ponto de desvio para o novo canal, teve sua ionização “reforçada” quando a considerável quantidade de carga nele depositada (cerca de 1 C ou mais) foi escoada em direção ao solo devido à diferença de potencial entre a extremidade desse trecho e o potencial do canal principal (que se encontra ao potencial do solo).

Uman e Voshall (1968) informam que se o resfriamento do canal for dominado pela condução térmica, não pela radiação ou convecção turbulenta, o pico da temperatura em um canal com dois centímetros de diâmetro cairia, conforme explicado no Capítulo 4, de valores iniciais na faixa de 8000°K a 14000 °K, encontrados no estágio final da descarga de retorno (efetivo término da corrente no canal), para um valor final, imediatamente anterior à ocorrência de um novo líder contínuo, de cerca de 3000°K em cerca de 15 ms e, em um canal com quatro centímetros de diâmetro, o processo de resfriamento demoraria quatro vezes mais (cerca de 60 ms).

Portanto, segundo Uman e Voshall, se a convecção for negligenciável no trecho preservado do canal original, a corrente no mesmo pode ir à zero assim que a carga negativa armazenada se esgotar, mas a ionização se mantém em um nível que favorece a passagem do próximo líder contínuo e a ocorrência da próxima descarga de retorno através desse canal.

Conforme mostrado no Capítulo 6, sub-item 6.2.3.2, a média geométrica do intervalo de tempo entre o novo canal e o retorno para o canal “original” é cerca de 2 vezes menor que a média geométrica do intervalo de tempo entre o novo canal e a descarga no canal “original” imediatamente anterior a ele, (ver Tabela 6.2).

Portanto, pode-se supor que, se o *attempted leader* ou o líder contínuo seguinte ocorrer num intervalo de tempo curto, ele encontra um nível de ionização no canal “original” favorável à sua propagação até o solo, conforme mostrado no lado esquerdo da Figura 7.37.

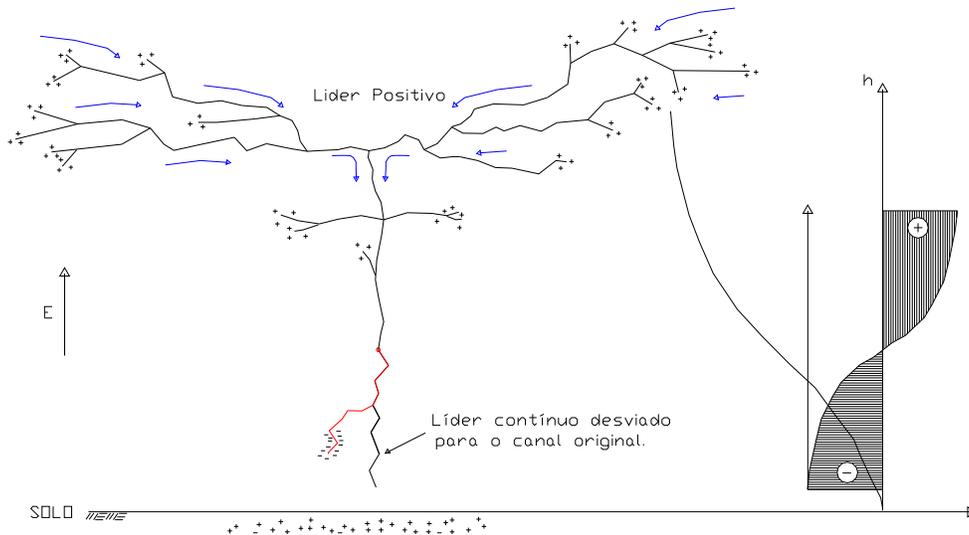


Figura 7.37 - Desvio do líder contínuo devido à carga negativa na extremidade inferior do novo canal. O gráfico à direita mostra a variação no potencial do canal do líder e a redistribuição de carga no mesmo.

### 7.13 Descarga retorna ao canal “original”.

No lado esquerdo da Figura 7.38 é mostrado o instante em que o líder contínuo toca o solo no mesmo ponto do canal “original”. Nesse instante o processo de neutralização da carga negativa do canal tem início a partir do solo, transferindo carga positiva até a extremidade superior do mesmo.

Novamente, depois do contato com o solo o relâmpago assumirá o potencial da terra e, novamente, a carga injetada pela descarga de retorno se distribuirá uniformemente ao longo do canal do relâmpago, nos mesmos moldes da carga distribuída numa linha de transmissão ao ser conectada à fonte geradora.

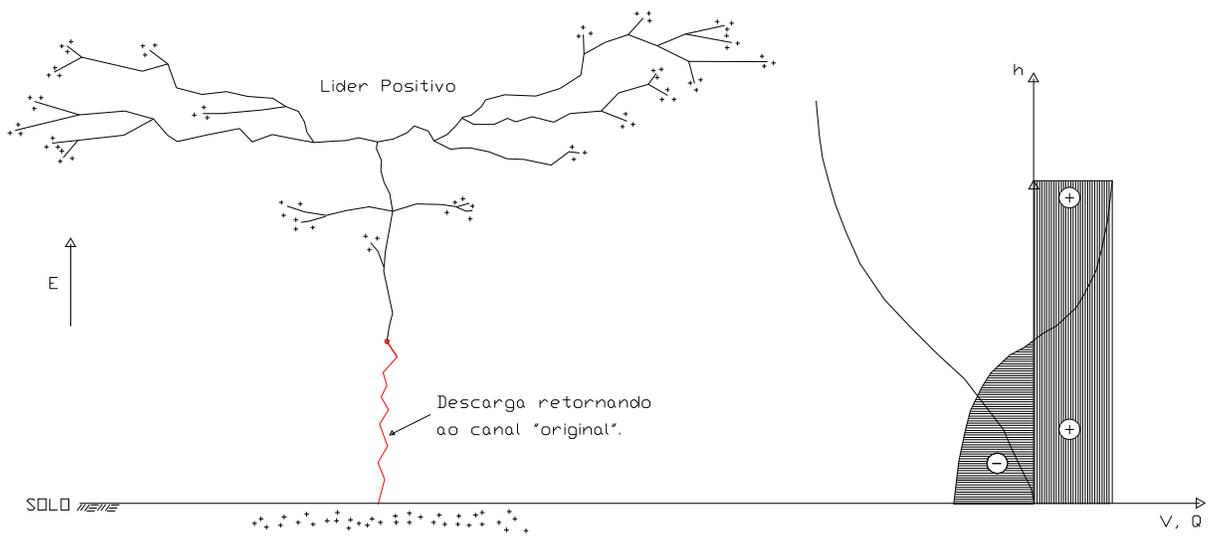


Figura 7.38 - Descarga de Retorno no canal "original". O gráfico à direita mostra o potencial no canal do líder levado a zero devido ao contato com o solo e a carga transferida ao canal pela descarga de retorno.

No lado direito da Figura 7.38 é mostrado que toda a extensão do canal (condutor) está, novamente, no mesmo potencial do solo (zero). É mostrada, também, a carga positiva transferida pela descarga de retorno, distribuída ao longo do canal.



## **8 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES**

A maioria dos estudos citados neste trabalho apresentava observações e/ou estatísticas sobre uma ou mais características das descargas que, de um modo geral, compõem um relâmpago com múltiplos canais e não tinham como foco principal a pesquisa de novos canais. As amostras de novos canais utilizadas nesses estudos eram, de modo geral, reduzidas (algumas dezenas de descargas) e os registros em vídeo utilizados apresentavam baixa resolução temporal (a maioria 33 ms entre quadros). A exceção é Saba et al. (2006a) que analisou uma amostra de 101 novos canais registrados em vídeo com resolução temporal de 1 ms.

Este trabalho foi baseado em dados extraídos de um banco obtido a partir de um grande número de registros de relâmpagos (mais de 1200 vídeos) efetuados com câmera rápida pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT). Até onde sabemos, esse é o maior banco de dados de relâmpagos registrados com câmera de alta velocidade no mundo.

A amostra utilizada de 264 novos canais registrados com resolução temporal entre 1 ms e 250  $\mu$ s - cerca de 2,5 vezes maior que a maior amostra utilizada em estudos anteriores (SABA et al., 2006a) - faz com que os dados estatísticos e observações deste trabalho apresentem grande confiabilidade.

Alguns dados estatísticos obtidos a partir dessa grande amostra permitiram corroborar observações registradas nos estudos mencionados ao longo do texto deste trabalho. Por outro lado, outros dados estatísticos e observações obtidos a partir da análise dessa amostra significativa permitiram que novas contribuições pudessem ser

dadas na busca do entendimento dos processos envolvidos com os novos canais.

## **8.1 Discussão e resultados**

### **8.1.1 Porque não temos só novos canais?**

Parece bastante lógico, no caso de relâmpagos com múltiplas descargas, que uma vez estabelecido um canal condutivo entre o centro de carga da nuvem e o solo, todas as descargas subseqüentes passem a utilizá-lo. Isso realmente acontece em cerca de 50 % dos relâmpagos nuvem-solo negativos (SABA et al., 2006a). Neste estudo, entre os relâmpagos que apresentaram criação de novos canais, 52 % aconteceram na segunda descarga e 85 % das descargas que criam um novo canal, o fazem após apenas uma descarga no canal anterior.

Caso o segundo líder não siga um novo caminho para o solo, a probabilidade do terceiro fazê-lo é menor, uma vez que o canal da primeira descarga de retorno tem sua ionização reforçada pela segunda descarga. Além disso, mesmo que ocorra uma interrupção precoce do canal da segunda descarga (condição necessária para o desvio do líder seguinte conforme a hipótese proposta neste trabalho), o depósito de carga negativa na extremidade inferior do canal terá origem apenas no canal principal do relâmpago. Não haverá, portanto, contribuição de carga das ramificações pois elas não existem em uma descarga oriunda de um líder contínuo. Seguindo o mesmo raciocínio, a probabilidade de criação de um novo canal pelo quarto líder diminui ainda mais, caso o terceiro também tenha seguido o mesmo canal das descargas anteriores, e assim sucessivamente.

Logo, a hipótese de desvio do líder seguinte devido à carga depositada na extremidade inferior do canal, cuja descarga foi interrompida precocemente, é coerente com a observação de que a probabilidade de ocorrência de novos

canais cai drasticamente com a ordem da descarga, verificada na análise estatística feita neste trabalho (ver sub-item 6.2.2.2) e apontada em estudos anteriores.

Mesmo na outra metade dos relâmpagos nuvem-solo negativos que apresentam múltiplos canais, os novos canais não são, em média, maioria.

Portanto, parece ser necessário que certas condições ou fatores estejam presentes para que um líder subsequente abandone um canal existente, a partir de um determinado ponto, e busque um novo caminho em direção ao solo. Como essas condições ou fatores não são tão freqüentes, os novos canais, apesar de relativamente comuns não são, em média, maioria entre as descargas que compõe os relâmpagos nuvem-solo negativos com múltiplas descargas.

#### **8.1.2 O que causa a interrupção precoce do canal da descarga anterior?**

Esse trabalho se baseia na convicção, que vem se formando a partir das observações feitas por Livingston e Krider (1978), Krehbiel (1979, 1981), Shao et al. (1995) e Mazur et al. (1995), de que o desvio de um líder subsequente é causado pelo depósito de carga negativa na extremidade inferior do canal da descarga de retorno que o antecede. Esse depósito está associado com a interrupção precoce da descarga de retorno que antecede o novo canal, conforme sugerido pelos autores mencionados.

As melhores condições para a criação de um novo canal parecem estar presentes na fase inicial do relâmpago. A interrupção precoce do canal, por exemplo, parece estar associada com a ordem da descarga, uma vez que a maior parte dos novos canais (52 % neste estudo) acontece na segunda descarga de retorno.

Conforme exposto no Capítulo 7, sub-item 7.4, as observações mostram que próximo à superfície do solo ocorrem as condições mais favoráveis para a interrupção do canal (taxas de recombinação maiores, maior perda de calor através dos processos de convecção turbulenta e condução térmica). Além disso, segundo a hipótese proposta neste trabalho, o processo de desenvolvimento do líder positivo no interior da nuvem parece ter um papel relevante na questão da interrupção do canal. Conforme exposto no Capítulo 4, sub-item 4.5, segundo Mazur (2002), o mais provável é que ambos os processos, isto é, o estrangulamento do campo e o alongamento do canal do relâmpago, contribuam para o aumento da constante de tempo RC, levando à instabilidade do canal principal da descarga e causando a interrupção da corrente no mesmo. Quando certas condições ou fatores atuam de forma que esses processos ocorram num intervalo de tempo curto, temos a interrupção precoce do canal do relâmpago, favorecendo o depósito de carga negativa na extremidade inferior do mesmo e criando condições para o desvio do líder seguinte.

A interrupção precoce de uma descarga de retorno provavelmente deve estar sendo influenciada por certas condições ou fatores que não estão sendo monitorados ou mensurados neste trabalho. Foi observado, por exemplo, que os novos canais ocorrem temporalmente agrupados numa tempestade (ver sub-item 6.2.1.2). O que causa esse agrupamento ainda é desconhecido.

Até o presente momento desconhecemos as condições ou fatores que levam à interrupção precoce do canal da descarga que antecede a um novo canal.

### **8.1.3 O que favorece a criação de novos canais?**

Uma característica associada com a baixa ordem da descarga e que favorece a formação do novo canal é a pobre ionização do canal depois de apenas uma descarga. Este trabalho corroborou a observação de que a probabilidade de

criação de um novo canal cai drasticamente com a consolidação do canal à medida que o número de descargas no mesmo aumenta ou quando da presença de corrente contínua longa, conforme explicado no sub-item 8.1.1 anterior.

Mas, apesar de mais raros, novos canais ocorrem em descargas de ordem alta, mesmo depois de várias descargas terem percorrido o canal anterior. Foi mostrado neste trabalho que, com o aumento da amostra, o intervalo de tempo que antecede um novo canal tende a se aproximar do intervalo médio entre todas as descargas nenhuma sem seleção, corroborando a sugestão feita por Saba et al. (2006a) de que o mecanismo que governa o intervalo entre descargas independe se o líder subsequente segue um canal previamente formado ou um novo canal. Uma característica interessante, observada neste trabalho, é que, quando há mais de uma utilização do canal ou, em raríssimos casos, após uma corrente contínua longa (ver subitem 6.2.2.2), um intervalo mais longo separando o novo canal da descarga de retorno anterior (cerca de 3 vezes maior que o intervalo médio entre as descargas que seguiram o mesmo canal) parece ser importante na criação do mesmo.

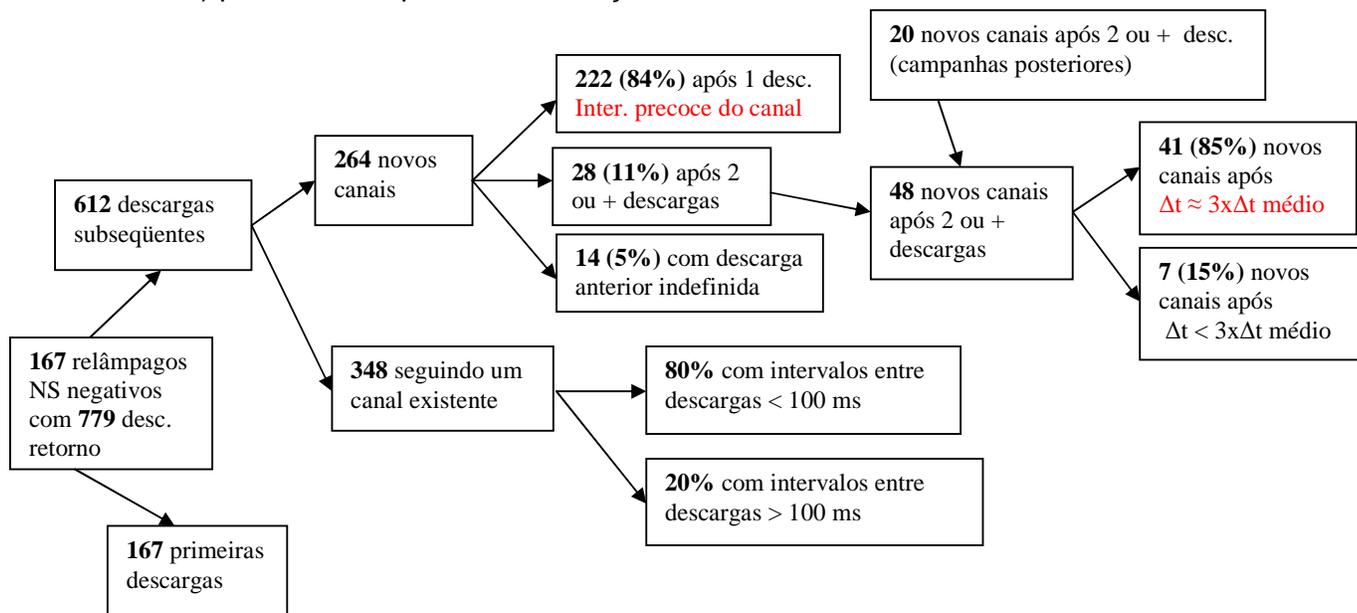


Figura 8.1 Distribuição das descargas de retorno subsequentes.

Portanto, o novo canal parece não ter influência sobre o mecanismo que governa o intervalo entre descargas, mas a duração do intervalo que antecede um novo canal, além das condições ou fatores que levam à interrupção precoce do canal anterior, parece ser importante na criação do mesmo em descargas de ordem alta.

#### **8.1.4 Uma vez criado, o novo canal se consolida?**

As observações mostram que existe uma tendência das descargas subsequentes continuarem a utilizar o novo canal consolidando-o. Porém, em determinadas circunstâncias, a consolidação do novo canal não ocorre.

Aparentemente, as condições ou fatores que favorecem a criação de um novo canal pelo segundo líder do relâmpago, podem continuar presentes durante o desenvolvimento do líder seguinte. Rakov et. al. (1994) encontraram que 37 % de todos os segundos líderes da sua amostra criaram um novo caminho para o solo e igual porcentagem (37 %) dos líderes que ocorreram em seguida ao novo canal da segunda descarga de retorno (o terceiro líder do relâmpago), também criaram um novo canal para o solo. Os autores atribuíram esse comportamento à pobre consolidação do canal. Segundo a hipótese sugerida nos estudos mencionados no item 8.2.2 e reforçada neste trabalho, a causa do desvio é a carga negativa depositada na extremidade inferior do canal. A hipótese é coerente com o comportamento encontrado por Rakov, pois, conforme já foi dito, uma das prováveis e mais influentes fontes da carga negativa são as ramificações criadas pelo líder escalonado durante seu percurso em direção ao solo. Essa fonte também está presente para criar o depósito de carga negativa no canal da segunda descarga, causando o desvio do terceiro líder, uma vez que o segundo líder, sendo um líder contínuo-escalonado, também apresentou ramificações durante o seu desenvolvimento.

Outra circunstância observada, na qual a consolidação do novo canal não ocorre, é que em uma pequena porcentagem dos relâmpagos com múltiplas descargas [2 % observado por Valine e Krider (2002); 5 % por Saba et al. (2006a) e 7 % observado neste trabalho (ver sub-item 6.2.3.2)], as descargas imediatamente seguintes ao novo canal retornaram ao canal “original” ou anterior ao novo canal. Esse trabalho mostrou que esse tipo de comportamento ocorre quando o intervalo entre a descarga que segue o novo canal e a que retorna para o canal “original” tem metade da duração do intervalo entre a descarga que segue o novo canal e a que a antecede. A hipótese proposta neste trabalho sugere que esse intervalo curto e o reforço da ionização do trecho do canal “original” compreendido entre a sua extremidade mais baixa e o ponto de desvio do novo canal, causado pelo escoamento da carga negativa nele depositada (cerca de 1 C ou mais, ver sub-item 7.9), favorecem o retorno da descarga para o canal “original”, pois ainda não houve tempo para a completa dissipação da ionização do mesmo (ver sub-item 8.2 a seguir).

#### **8.1.5 Corrente contínua versus novo canal – qual processo tem maior influência sobre as características do relâmpago?**

A primeira descarga de retorno usualmente transfere uma grande quantidade de carga que foi armazenada no canal durante o processo do líder escalonado através do ar virgem (RAKOV e UMAN, 2003). Como o líder contínuo-escalonado que precede um novo canal se propaga, apenas durante a parte escalonada, através do ar virgem, é esperado um pico de corrente ( $I_p$ ) para o novo canal menor que o da primeira descarga de retorno mas maior que o  $I_p$  de uma descarga de retorno que siga o canal já ionizado da primeira descarga. O resultado da análise realizada neste trabalho mostrou que a criação de um novo canal influencia de fato a relação entre os picos de corrente da maneira esperada. De modo a verificar a influência da presença de corrente contínua na relação esperada entre os picos de corrente, as descargas

nuvem-solo negativas do nosso banco de dados foram divididas em 3 grupos: (a) aquelas sem qualquer CC; (b) aquelas seguidas por CC curta ou muito curta (CCCMC) e (c) aquelas seguidas por CC longa (CCL).

Foi mostrado que essa relação é válida para descargas seguidas ou não por corrente contínua seja ela muito curta, curta ou longa, ou seja:

$$I_{p_{primeira}} > I_{p_{novo\ canal}} > I_{p_{mesmo\ canal}}$$

Portanto, os resultados mostram que o efeito do novo canal se faz sentir da maneira como era esperado em todos os subgrupos, independente da presença de corrente contínua longa ou não.

Outra análise realizada neste estudo corroborou o resultado encontrado por Ferro et al. (2008) de que novos canais seguidos por CC também obedecem à zona de exclusão proposta por Saba et al. (2006b), mostrando que a relação entre a duração da CC longa e o pico de corrente da descarga que a inicia é a mesma, independente dessa descarga seguir ou não um novo canal. Isso mostra que, apesar dos novos canais tenderem a ter picos de corrente mais intensos, quando seguidos de CC longa os picos são sempre abaixo de 20 kA. Isso era de se esperar visto que também as primeiras descargas de retorno, quando seguidas de CC longa, tem pico de corrente inferior a 20 kA.

Foi mostrado também, neste trabalho, que o padrão na iniciação de corrente continua longa sugerido por Rakov e Uman (2003) também é válido para as correntes contínuas longas iniciadas por descargas que seguem um novo canal. Ou seja, assim como para a zona de exclusão de Saba, o padrão de iniciação de CC longa proposto por Rakov é válido independente de a descarga seguir ou não um novo canal.

Portanto, a contribuição mais interessante das análises realizadas neste trabalho foi mostrar que, apesar do efeito do novo canal se fazer sentir na relação entre os valores dos picos de corrente das descargas, quando analisados separadamente em grupos com e sem a presença de CC, os processos envolvidos na criação da CC longa predominam sobre os processos envolvidos na criação de um novo canal.

#### **8.1.6 Exceções**

Encontramos 73 casos em 348 (21 %) de descargas que foram antecedidas por intervalos com duração superior a 100 ms sem que um novo canal fosse criado. Proporção muito semelhante aos 19 % encontrados por Rakov e Uman (1990). Uma hipótese possível é não ter ocorrido interrupção precoce do canal anterior a essas descargas e, conseqüentemente, não ter havido depósito de carga negativa que causasse o desvio do líder seguinte, apesar do longo intervalo entre descargas.

Foram encontrados, na nossa amostra, vários casos de formação de novos canais depois de descargas seguidas por CCL (duração: 150, 212, 220, 234, 266, 272, 368 e 370 ms). Esse fato sugere que, mesmo com a presença de CCL reforçando a ionização do canal, o condicionamento do canal parece não ter sido suficiente para impedir a criação de um novo canal. Nesses casos, foi observado que o intervalo que antecede o novo canal, suprimida a duração da CCL, também se apresentou maior que 3 vezes o intervalo médio entre as descargas que seguiram o mesmo canal (critério que prevalece para novos canais criados após repetidas utilizações do canal anterior - ver subitem 8.1.3).

## **8.2 A hipótese do retorno ao canal “original”.**

Neste trabalho foi apresentada uma hipótese, baseada nos conceitos do líder bi-direcional e de carga líquida zero, que busca explicar os processos físicos envolvidos quando, em um relâmpago nuvem-solo negativo, uma determinada descarga subsequente abandona o caminho percorrido pela(s) descarga(s) anterior(es) e cria um novo caminho em direção ao solo. O conceito do líder bi-direcional, além de fornecer uma explicação física para todos os processos que ocorrem durante o desenvolvimento do relâmpago, permite uma explicação coerente para a seqüência de ocorrência dos mesmos, como a apresentada nesse trabalho. Na hipótese apresentada foi mantida a proposição feita por Krehbiel, Shao e Mazur de que a carga negativa depositada na extremidade inferior do canal (cerca de 1 C ou mais) é a causadora do desvio do próximo líder contínuo do canal “original”.

Foi sugerido, de forma inédita, como extensão desta hipótese, o processo que leva à reutilização do canal “original” pela descarga seguinte à que seguiu um novo canal. Para que ocorra a reutilização do canal “original” é sugerido que a carga negativa depositada, ao ser escoada através do novo canal em direção ao solo devido à diferença de potencial entre a extremidade inferior do canal “original” e o novo canal (que se encontra ao potencial do solo), reforça a ionização nesse trecho. Seguindo o raciocínio da hipótese apresentada nesse trabalho, admite-se que o mesmo processo de deposição de carga negativa também ocorre durante a interrupção do novo canal, e que a carga depositada neste canal poderá provocar o desvio do próximo líder. A hipótese sugere que, se o líder contínuo seguinte ocorrer num intervalo de tempo cerca de metade do intervalo entre a descarga original e o novo canal (Capítulo 6, item 6.2.3), ele encontrará um nível de

ionização no canal “original” favorável à sua propagação até o solo, e o reutilizará.

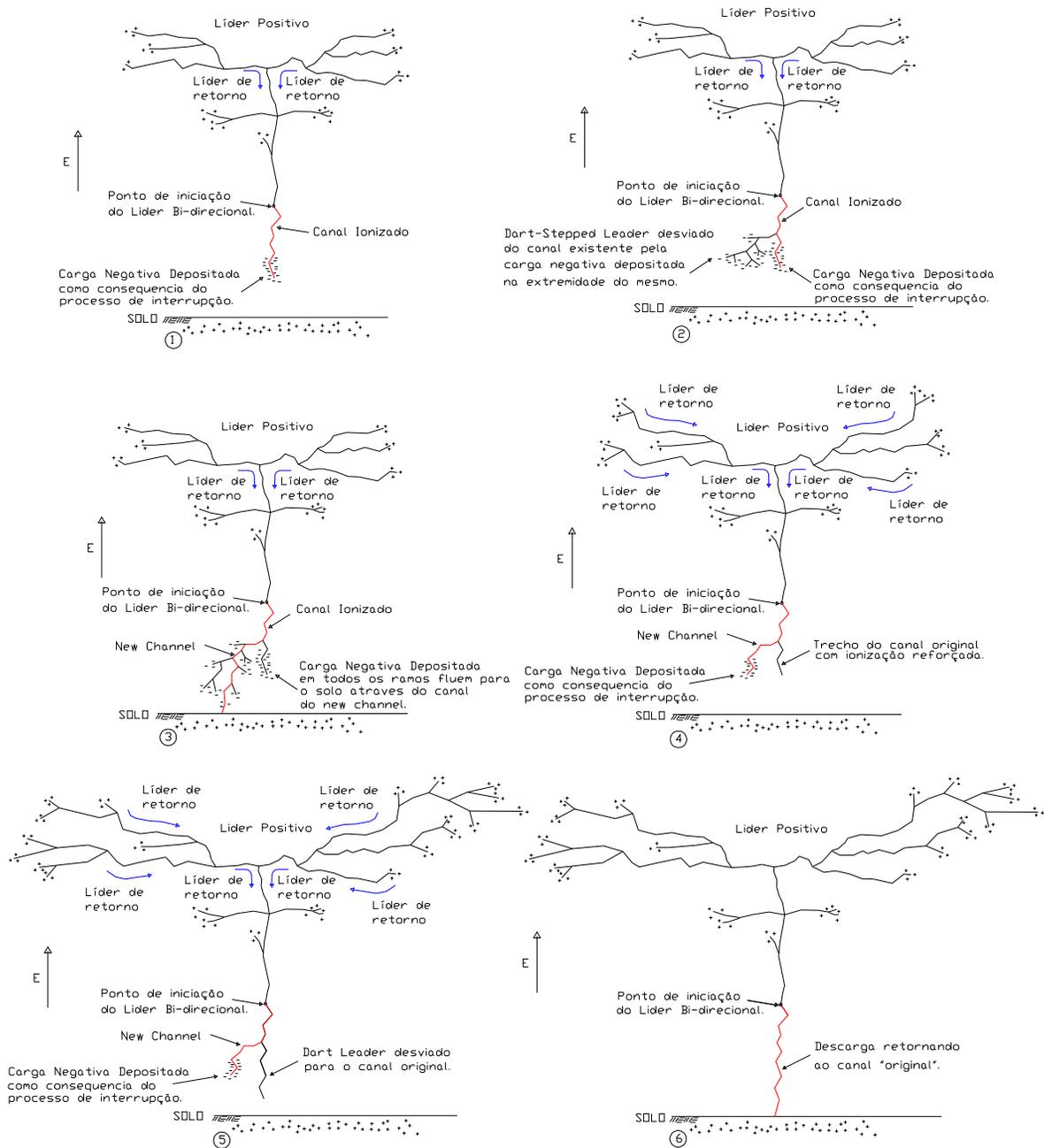


Figura 8.2 - Processo de retorno ao canal “original”. O intervalo de tempo entre os instantes 4 e 6 deve ser metade do intervalo gasto entre os instantes 1 e 3 para que o canal “original” possa ser reutilizado.

### **8.3 Análise do registro em vídeo do desenvolvimento da “árvore” de dupla terminação para um relâmpago nuvem-solo negativo natural.**

Nesse trabalho foi analisado o registro em vídeo, feito a uma velocidade de 4000 quadros por segundo, de um relâmpago nuvem-solo negativo registrado durante o verão de 2007 em Tucson, Arizona. O relâmpago apresentou 12 descargas de retorno que percorreram 3 canais distintos. A alta resolução temporal (250  $\mu$ s entre quadros) permitiu acompanhar os processos que ocorreram durante o desenvolvimento do relâmpago com bastante detalhe.

Utilizando-se uma técnica de superposição de imagens, foi possível a reconstrução, de forma inédita para um relâmpago natural, da “árvore” com dupla terminação, citada por Mazur (1989, 1993, 2002) e Williams (2006). As observações de árvores com dupla terminação mencionadas na literatura se referem a relâmpagos iniciados artificialmente por aeronaves (MAZUR, 1989) ou por foguete (MAZUR, 1993). Portanto, até onde sabemos, o caso analisado é o primeiro registro em vídeo do desenvolvimento de uma árvore de dupla terminação para um relâmpago natural.

Foram analisados os diversos processos ocorridos durante o desenvolvimento do relâmpago, procurando-se associar cada um deles às etapas citadas na hipótese proposta para explicar os processos físicos envolvidos na criação de novos canais. Dessa forma, foi possível identificar: (1) a região de iniciação do relâmpago; (2) a região de desvio dos líderes criando um novo canal; (3) a propagação do líder positivo; (4) a estrutura em camadas que leva ao processo de interrupção da corrente no canal; (5) a energização do líder positivo pela descarga de retorno e (6) a ocorrência dos líderes de retorno – *recoil leaders*.

A propagação de líderes de retorno percorrendo, a partir das extremidades superiores, os canais criados pelo líder positivo em direção à região de

iniciação do relâmpago foi encontrada nos registros em vídeo do relâmpago analisado. Em alguns casos as imagens mostram o *recoil leader* percorrendo o trecho do canal principal e, ao alcançar o solo, dando origem a uma nova descarga de retorno. Em outros, quando falhou em alcançar o solo, as imagens mostram o *attempted leader* resultante. De maneira geral, os *recoil leaders* estão associados com a maioria dos processos que ocorrem durante o desenvolvimento de um relâmpago.

- 1) A região de iniciação do relâmpago foi identificada no desenho esquemático do desenvolvimento do líder bi-direcional obtido a partir das imagens de vídeo. Na fase inicial de desenvolvimento do líder bi-direcional não foi possível identificar, no registro em vídeo, a progressão do líder positivo. Os canais percorridos pelo líder positivo só surgiram nas imagens de vídeo após a terceira descarga de retorno. Aparentemente dois fatores dificultam o registro em vídeo da propagação do líder positivo na fase inicial de desenvolvimento do líder bi-direcional: i) os trechos de canal percorridos nessa fase são curtos e ii) a intensidade luminosa no canal do líder positivo é baixa. O primeiro fator é consequência de um comportamento presumido a partir de observações relatadas por Krehbiel (1981): a) o líder bi-direcional inicia-se, provavelmente, numa região abaixo do centro de cargas negativas onde o campo é mais intenso, o que sugere que a iniciação se dá próximo a uma região com alta concentração de carga negativa; b) o líder positivo progride no interior do centro de cargas; c) enquanto a progressão ocorrer numa região com alta densidade de cargas, o desenvolvimento do líder positivo será curto durante o intervalo em que o líder negativo (*stepped leader*) gasta para alcançar o solo e d) a alta densidade de carga da região pode, eventualmente, suportar o desenvolvimento da segunda descarga de retorno. O segundo fator foi constatado por Saba et al. (2008) que, em observações recentes de líderes positivos em raios naturais,

confirmou sua baixa luminosidade. Também pode ser deduzido a partir das seguintes observações obtidas em experimentos de laboratório: 1) a intensidade da corrente do líder positivo é cerca de 10 vezes menor que a do líder negativo; 2) o processo de propagação do líder positivo é suave e contínuo em oposição ao processo ruidoso (emissão em VHF) e escalonado (em passos) do líder negativo. Porém, os canais do líder positivo são passíveis de registro em vídeo quando sua luminosidade é intensificada ao serem percorridos por *recoil leaders* (SABA et al., 2008), ou quando da ocorrência da forte intensificação do processo de quebra de rigidez nas extremidades superiores dos líderes positivos devido à “energização” causada por uma descarga de retorno (MAZUR, 2002). Conforme já foi dito, a partir da terceira descarga de retorno, foi possível identificar imagens da propagação do líder positivo e estimar a altura do ponto de iniciação do relâmpago (cerca de 3,5 km) que se apresentou coerente com as estimativas feitas por Proctor (1991) em seus estudos na África do Sul.

- 2) Ambos os casos de criação de novo canal, para o relâmpago em estudo, foram precedidos por *attempted leaders* que já apresentaram desvio do canal existente em busca do novo trajeto a ser percorrido pela descarga de retorno seguinte. No desenho esquemático do desenvolvimento do líder bi-direcional obtido a partir das imagens de vídeo, os três canais apresentaram um trecho comum a partir da região de iniciação do relâmpago com o desvio da trajetória ocorrendo numa mesma região logo abaixo da inicialização do relâmpago. Isso sugere que, em ambos os casos de criação de um novo canal, após a interrupção, o canal existente foi “preenchido” com carga negativa logo abaixo da região onde os desvios ocorreram (MAZUR et al., 1995). Como a região de iniciação foi estimado estar a cerca de 3,5 km de altura, pode-se supor que a região do desvio

encontre-se entre 2 e 3 km. Portanto, o depósito de carga negativa deve encontrar-se abaixo de 2 km, o que está de acordo com os resultados obtidos por Livingston e Krider (1978).

- 3) Ao propagar-se no interior do centro de carga negativa da nuvem, o líder positivo mostrou um desenvolvimento predominantemente horizontal, estratificado em camadas progressivamente mais altas. Esse comportamento é coerente com a proposta de Mazur et al. (1995) de que o líder se propaga na direção da maior diferença de potencial entre a sua extremidade e o ambiente ao seu redor. A partir dos dados de sondagem fornecidos pela Universidade de Tucson, foi estimado que o centro principal de cargas negativas encontrava-se entre 4,7 e 7,4 km (faixa de altitude compreendida entre as isotermas de 0 °C e -15 °C). A estimativa de 3,5 km para o ponto de iniciação do relâmpago mostrou-se coerente com a idéia de que a iniciação do líder bi-direcional nos relâmpagos nuvem-solo negativos ocorre na periferia inferior do centro de cargas negativas da nuvem (conforme ilustrado na Figura 8.4) e, portanto, para o caso em estudo, abaixo dos 4,7 km. Conforme exposto no item 1) anterior, a ausência de imagens do desenvolvimento do líder positivo, no registro em vídeo, durante o intervalo entre a primeira e a terceira descargas de retorno, sugere que a sua propagação nesse período foi curta, numa região com alta densidade de carga, como o observado por Krehbiel (1981). Uma curta propagação não favorece a visualização dos *recoil leaders* viajando através dos canais do líder positivo. Durante esse intervalo, os *recoil leaders*, gerados a partir da atividade de quebra de rigidez nas extremidades do líder positivo, foram registrados ao se propagarem através do canal principal, sendo identificados como os *attempted leader* que ocorreram antes da criação do segundo e terceiro canais e dos líderes contínuo-escalonados que deram origem aos novos canais. Um valor de cerca de 5,8 km foi estimado para a

altura do ponto mais alto do líder positivo. Nessa estimativa foram utilizadas imagens simultâneas de duas câmeras visando eliminar erros devido à imagem planificada das ramificações da árvore do relâmpago. Portanto, o desenvolvimento do líder positivo, ou a parte superior da árvore de dupla terminação, ocorreu dentro da região do centro principal de cargas negativas da nuvem, como esperado.

- 4) A estrutura do líder positivo estratificada em camadas horizontais sucessivamente mais altas mencionada no item 3) anterior, se ajusta perfeitamente ao mecanismo proposto por Mazur (2002) de “estrangulamento” do campo elétrico que, por sua vez, leva à diminuição da corrente, à instabilidade do canal e à interrupção do mesmo. Nas imagens de vídeo analisadas foram identificados *recoil leaders* propagando-se a partir de ramos da camada superior da “árvore” em direção à extremidade de ramos de camadas inferiores ao invés de percorrer o canal principal em direção ao solo, numa evidência de que o processo de “estrangulamento” do campo, que afeta a distribuição do potencial da nuvem na região do canal principal e dos ramos mais baixos, estava ocorrendo. É importante notar também que, mesmo utilizando um equipamento com excelente resolução temporal, muitas ramificações do líder positivo que eventualmente se propagaram por sobre as camadas inferiores podem não ter sido registradas em vídeo por apresentarem intensidade de brilho muito baixa, estarem obscurecidas pela nuvem ou ambos.
- 5) Nas imagens em vídeo do relâmpago analisado foram encontrados registros do líder positivo se propagando em novos trechos criados imediatamente depois de uma descarga de retorno. Isso corrobora a afirmação feita por Mazur (2002) de que o processo de quebra de rigidez é intensificado quando o potencial do solo é transportado até

as extremidades superiores do líder positivo, “energizando”, assim, a propagação deste, uma vez que a diferença de potencial das extremidades do líder para o ambiente onde se encontram imersas aumenta.

## **8.4 Contribuições**

### **8.4.1 Comprovação da teoria do líder bi-direcional**

Utilizando de forma inédita o registro em vídeo de um relâmpago nuvem-solo natural, foi possível comprovar que vários processos que ocorrem durante o desenvolvimento de um relâmpago se comportam de acordo com o proposto pela teoria do líder bi-direcional.

### **8.4.2 Hipótese explicando o retorno para o canal “original”**

Foi sugerida, de forma inédita, uma hipótese explicando o processo físico que leva à reutilização do canal “original” pela descarga seguinte à que utilizou um novo canal.

### **8.4.3 Análise da influência sobre o pico de corrente das descargas que, simultaneamente, seguem um novo canal e dão origem à uma corrente contínua**

Foi mostrado neste trabalho que, apesar do efeito do novo canal se fazer sentir na relação entre os valores dos picos de corrente das descargas, quando analisados separadamente em grupos com e sem a presença de corrente contínua, os processos envolvidos na criação da corrente contínua predominam sobre os processos envolvidos na criação de um novo canal.

### **8.4.4 Identificação do processo predominante na criação de um novo canal**

Foi identificado neste trabalho que o processo predominante na criação de um novo canal está relacionado com o número de utilizações do canal anterior. A maioria dos novos canais (84%) ocorrem após um canal inicial (aquele que utiliza pela primeira vez um determinado canal) e, nestes casos, o processo que leva à criação de um novo caminho para o solo está relacionado com a interrupção precoce do canal anterior. Nos casos em que o novo canal é criado depois de duas ou mais utilizações do canal anterior, o processo que leva à criação do novo canal está relacionado com um intervalo de tempo mais longo separando-o da descarga que o antecede.

## **8.5 Questões restantes**

Conforme já foi dito, uma convicção vem se formando, na comunidade científica, a respeito dos conceitos sobre os quais este trabalho se embasa (líder bi-direcional, carga líquida zero, etc.). Essa convicção é decorrente dos resultados obtidos graças à tecnologia disponível nas últimas duas ou três décadas.

A despeito de esses resultados permitirem um melhor entendimento dos processos que ocorrem durante o desenvolvimento do relâmpago, várias questões ainda permanecem sem respostas ou sem um claro entendimento. Algumas desses questões que, no mínimo, instigam a nossa curiosidade são levantadas a seguir.

### **8.5.1 Quais são as condições ou fatores que levam ou favorecem a interrupção precoce do canal do relâmpago?**

Segundo a sugestão de diversos autores, a interrupção do canal é consequência do processo de “estrangulamento” do campo e do alongamento do canal, ambos, provavelmente, agindo conjuntamente e ambos sendo decorrência do desenvolvimento do líder positivo no

interior da nuvem. A interrupção precoce pode ser consequência da atuação desses processos num intervalo de tempo curto. Quais condições ou fatores levariam ou favoreceriam a atuação desses processos num intervalo de tempo curto? Talvez o desenvolvimento acelerado do líder positivo no interior da nuvem?

### **8.5.2 Por que os novos canais ocorrem temporalmente agrupados em determinadas tempestades?**

Encontramos exemplos, dentro do banco de dados utilizado neste estudo, de ocorrência relâmpagos com múltiplos canais para o solo ocorrendo temporalmente agrupados, em seqüência dentro da mesma tempestade. Outros trabalhos, tais como Krehbiel (1981) e Mazur et al. (1995) já apontavam essa característica. Essa observação parecer indicar que outros fatores são importantes na determinação da multiplicidade dos canais.

### **8.5.3 Quais são os processos físicos envolvidos na inicialização do *recoil leader*?**

Parece bastante claro que os recoil leaders são a origem comum da maioria dos processos que ocorrem nos intervalos entre descargas, sendo as únicas exceções, talvez, a corrente contínua e a componente M. Sabe-se que o recoil leader é um líder negativo, auto-propagante, que percorre os canais criados pelo líder positivo em direção à origem do relâmpago. Mas quais são os processos físicos envolvidos na inicialização do recoil leader? O campo elétrico no interior do canal do relâmpago é intensificado à medida que o líder positivo se propaga no interior da nuvem. Pode-se supor que uma frente de onda ionizante (*recoil leader*) é lançada quando o campo elétrico no interior do canal alcança uma determinada intensidade?

#### **8.5.4 Os processos físicos de criação de um novo canal em relâmpagos nuvem-solo positivos diferem dos negativos?**

A maioria dos relâmpagos nuvem-solo positivos é composta por uma descarga simples ou única, freqüentemente seguida por corrente contínua. Nos casos de relâmpagos nuvem-solo positivos com múltiplas descargas, ao contrário dos relâmpagos nuvem-solo negativos, todas as suas descargas seguem novos canais. O líder positivo, de intensidade de brilho mais tênue, é às vezes visível nos relâmpagos nuvem-solo positivos naturais, pois se desenvolve abaixo da base da nuvem, descendo em direção ao solo (SABA et al., 2008). Por sua vez, o líder negativo que se encontra em desenvolvimento no interior da nuvem, tem uma intensidade de brilho normalmente maior, o que pode facilitar o seu registro em vídeo. A análise desses registros pode ajudar a identificar os processos que levam à criação de um novo canal nos relâmpagos nuvem-solo positivos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BALLAROTTI, M. G.; SABA, M. M. F.; PINTO JÚNIOR, O. A new performance evaluation of the Brazilian Lightning Location System (RINDAT) based on high-speed camera observations of natural negative ground flashes. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 19. (ILDC), , Tucson, Arizona. **Proceedings...** 2006. On-line. (INPE-14369-PRE/9456).

BAZELYAN, E. M.; GORIN, B. N.; LEVITOV, V. I. **Physical and engineering foundations of lightning protection**. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1978, 223 p.

BAZELYAN, E. M., RAIZER, Yu P. **Lightning physics and lightning protection**. London, UK: The Institute of Physics, 2000. 325 p.

BEASLEY, W.; UMAN, M. A.; RUSTAN Jr. P.L. Electric fields preceding cloud-to-ground lightning flashes. **Journal of Geophysical Research**. v. 87, n. C7, p. 4883-4902, June 20, 1982.

BRUCE, C. E. R.; GOLDE, R. H., The lightning discharge. **Journal of the Institution of Electrical Engineers**. v. 88, n. 487, 1941.

BRUCE, C. E. R., The initiation of long electrical discharges. **Proceedings of the Royal Society of London**, Serial A, v. 183, n. 993, p. 228-242, 1944.

CAMPOS, L. Z. S.; SABA, M. M. F.; PINTO Jr., O.; BALLAROTTI, M. G. Waveshapes of continuing currents and properties of M-components in natural negative cloud-to-ground lightning from high-speed video observations. **Atmospheric Research**, v. 84, p. 302-310, 2007.

CAMPOS, L. Z. S.; SABA, M. M. F.; PINTO Jr., O.; BALLAROTTI, M. G. Waveshapes of continuing currents and properties of M-components in natural positive cloud-to-ground lightning. **Atmospheric Research**, 2008. doi:10.1016/j.atmosres.2008.02.020.

COORAY, V.; LUNDQUIST, S. On the characteristics of some radiation fields from lightning and their possible origin in positive ground flashes. **Journal of Geophysical Research**. v. 87, p. 11.203–11.214, 1982.

COORAY, G. V. **The lightning flash**. London, UK: The Institution of Electrical Engineers, 2003. 574 p.

CRAIB, J. A.; LATHAM, J. Corona from colliding water drops as a possible mechanism for triggering of lightning. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 100, p. 191-202, 1974

DIENDORFER, G.; SCHULZ, W.; RAKOV, V. A. Lightning characteristics based on data from the Austrian lightning location system. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**. v. 40, n. 4, p. 452-464, November 1998.

FERRO, M. A. S.; SABA, M. M. F.; PINTO JR, O. Continuing current in multiple channel cloud-to-ground lightning. **Atmospheric Research**, (2008) doi:10.1016/j.atmosres.2008.04.011.

FISHER, R. J.; SCHNETZER, G. R.; THOTTAPPILLIL, R.; RAKOV, V. A.; UMAN, M. A.; GOLDBERG, J. D. Parameters of triggered-lightning flashes in Florida and Alabama. **Journal of Geophysical Research**. v.98, p. 22887-22902, 1993.

FOWLER, R. G. Lightning. **Appl. At. Collision Phys.**, v. 5, p. 31-67, 1982.

FRIND, G., Über das Ablingen von Lichtbogen, **Zeitschrift Angew, Physik**, v.12, p. 515-521, 1960.

GRIFFITHS, R. F.; PHELPS, C. T., The effect of air pressure and water vapor content on propagation of positive corona streamers, and the implications for lightning initiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 102, p. 419-426, 1976

GUO, C.; KRIDER, E. P., The optical and radiation field signatures produced by lightning return strokes. **Journal of Geophysical Research**. v. 87, p. 8913-8922, 1982.

GUREVICH, A. V.; MILIKH, G. M.; ROUSSEL-DUPRE, R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. **Physics Letters A**. v. 165, p. 463–468, 1992.

GUREVICH, A. V.; MILIKH, G. M.; VALDIVIA, J. A. Model of x-ray emission and fast preconditioning during a thunderstorm. **Physics Letters A**. v. 231, p. 402–408, 1997.

GUREVICH, A. V.; ZYBIN, K. P.; ROUSSEL-DUPRE, R. Lightning initiation by simultaneous effect of runaway breakdown and cosmic ray showers. **Physics Letters A**. v. 254, p. 79–87, 1999.

GUREVICH, A. V.; ZYBIN, K. P. Runaway breakdown and electric discharges in thunderstorms. **Physics - Uspekhi**. v. 44, n. 11, p. 1119–1140, 2001.

GUREVICH, A. V.; DUNCAN, L. M.; KARASHTIN, A. N.; ZYBIN, K. P. Radio emission of lightning initiation. **Physics Letters A**. v. 312, p. 228–237, 2003.

IRIBARNE, J. V.; CHO, H.-R. **Atmospheric physics**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1980. 212 p.

KASEMIR, H. W., Qualitative Übersicht über Potential- Feld und Ladungsverhältnisse bei einer Blitzentladung in der bewitterten Wolke. In: Hans, I. (ed.). **Das Gewitter**, Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Ges. Geest und Portig K. -G, 1950, p. 112-125.

KASEMIR, H. W., A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge, **Journal of Geophysical Research**. v. 65, p. 1873-1878, 1960.

KAWASAKI, Z. I.; MATSUURA, K.; MATSUI, T.; ADACHI, M. Is the bi-leader progression concept true? In: INTERNATIONAL CONFERENCE IN ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 10, 1996, Osaka, Japan. **Proceedings**. Osaka, 1996. p. 596-598.

KING, L. A. **The voltage gradient of free-burning arc in air or nitrogen**, Leatherhead, Surrey, England: British Electrical and Allied Industries Research Association, 1961. (Report G/XT172).

KITAGAWA, N.; BROOK, M.; WORKMAN, E. J. Continuing currents in cloud-to-ground discharges. **Journal of Geophysical Research**. v. 67, p. 637-647, 1962.

KREHBIEL, P. R., BROOK, M., Mc CRORY. An analysis of the charge structure of lightning discharges to the ground. **Journal of Geophysical Research**. v. 84, p. 2432-2456, 1979.

KREHBIEL, P. R., **An analysis of the electric field change produced by lightning**. 1981, Ph.D. dissertation, University of Manchester, Institute of Science and Technology, Manchester, UK, 1981.

LACERDA, M. et al. 3D simulation of lightning channel. In: International Symposium on Lightning Protection, 9, 2007, Foz do Iguaçu, Brazil. **Proceedings**. Paraná, Institute of Electrotechnics and Energy of University of São Paulo, 2007, p. 51-56.

LARIGALDIE, S., ROUSSAUD, A., JECKO, B. Mechanisms of high-current pulses in lightning and long-spark. **Journal of Applied Physics**. v. 72, p. 1729-1739, 1992.

LIVINGSTON, j. M.; KRIDER, E. P. Electric fields produced by Florida thunderstorms. **Journal of Geophysical Research**. v. 83, p. 385-401, 1978.

MALAN, D. J.; SCHONLAND, B. F. J. Progressive lightning, VII, Directly correlated photographic and electrical studies of lightning from near thunderstorms. **Proceedings of the Royal Society of London**, Series A, v. 191, n. 1027, p. 485-503, 1947.

MALAN, D. J.; SCHONLAND, B. F. J. The distribution of electricity in thunderclouds. **Proceedings of the Royal Society of London**, Series A, v. 209, n. 1097, p. 158-177, 1951a.

MALAN, D. J.; SCHONLAND, B. F. J. The electrical processes in the intervals between the strokes of a lightning discharge. **Proceedings of the Royal Society of London**, Series A, v. 206, n. 1085, p. 145-163, 1951b.

MALAN, D. J. Les décharges orageuses intermittentes et continues de la colonne de charge négative. **Annales Geophysicae**. v. 10, p. 271-281, 1954.

MASTER, M.J.; UMAN, M.A.; BEASLEY, W.H.; DARVENIZA, M. Lightning induced voltages on power lines. **IEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. v. PAS-103, p. 2519-2529, 1984.

MAZUR, V., A physical model of lightning initiation on aircraft in thunderstorms, **Journal of Geophysical Research**. v. 94, p. 3326-3340, 1989.

MAZUR, V., RUHNKE, L. H. Common physical processes in natural and artificially triggered lightning, **Journal of Geophysical Research**. v. 98, D7, p. 12913-12930, 1993.

MAZUR, V., KRIHBIEL, P. R.; SHAO, X. M. Correlated high-speed video and radio interferometric observations of a cloud-to-ground lightning flash, **Journal of Geophysical Research**. v. 100, p. 25731-25753, 1995.

MAZUR, V., RUHNKE, L. H. Model of electric charges in thunderstorms and associated lightning, **Journal of Geophysical Research**. v. 103, D18, p. 23299-23308, 1998.

MAZUR, V., RUHNKE, L. H. Determining leader potential in cloud-to-ground flashes, **Geophysical Research Letters**. v.29, n. 12, 10.1029/2001GL014159, 2002.

MAZUR, V., Physical processes during the development of lightning flashes, **C. R. Physique**, v. 3, n. 10, p. 1393-1409, 2002.

MAZUR, V., (National Oceanic and Atmospheric Administration/National Severe Storm Laboratory, Norman, Oklahoma, USA), 2007. **Comunicação pessoal**.

OGAWA, T., BROOK, M. The mechanism of the intracloud lightning discharge, **Journal of Geophysical Research**. v. 69, p. 514-519, 1964.

OGAWA, T. Lightning currents. In: Volland, H. (ed.) **Handbook of atmospheric electrodynamic**s. Bonn: Radioastronomical Institute, University of Bonn, CRC Press, v. 1, cap. 4, p. 93-136, 1995.

ORVILLE, R. E.; WEISMAN, R. A.; PYLE, R. B.; HENDERSON, R. W.; ORVILLE Jr., R. E. Cloud to ground lightning characteristics from June 1984 through May 1985, **Journal of Geophysical Research**. v. 92, p. 5640-5644, 1987.

PINTO Jr., O.; PINTO, I. R. C. A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: INPE, 2000, 196 p.

PINTO Jr., O. **A arte da guerra contra os raios**. São José dos Campos: Oficina de Textos, 2005. 79 p.

PROCTOR, D. E Regions where lightning flashes began. **Journal of Geophysical Research**. v. 96, p. 5099-5112, 1991.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Some properties of negative cloud-to-ground lightning flashes versus stroke order, **Journal of Geophysical Research**. v. 95, p. 5447-5453, 1990a.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Long continuing currents in negative lightning ground flashes, **Journal of Geophysical Research**. v. 95, p. 5455-5470, 1990b.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Waveforms of first and subsequent leaders in negative lightning flashes, **Journal of Geophysical Research**. v. 95, p. 16561-16577, 1990c.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A.; JORDAN, D. M.; PRIORE III, C. A. Ratio of leader to return stroke electric field change for first and subsequent lightning stroke. **Journal of Geophysical Research**. v. 95, n. D10, p. 16579-16587, September 20, 1990d.

RAKOV, V. A., UMAN, M. A. Long continuing currents in negative cloud-to-ground lightning flashes: occurrence statistics and hypothetical mechanism. **Proceedings**. USSR Academy of Science (Izvestiya an SSSR, ser. Fizika Atmosfery I Okeana), v. 27, p. 376-390, 1991.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Origin of lightning electric field signatures showing two return-stroke waveforms separated in time by a millisecond or less, **Journal of Geophysical Research**. v. 99, p. 8157-8165, 1994.

RAKOV, V. A., UMAN, M. A.; THOTTAPPILLIL, R., Review of lightning properties from electric field and TV observations, **Journal of Geophysical Research**. v. 99, p. 10745-10750, 1994.

RAKOV, V. A. Lightning electric and magnetic fields. In: INTERNATIONAL ZURICH SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 13, 1999, Zurich, Switzerland. **Proceedings**. Zurich, 1999. p. 561-566.

RAKOV, V. A. Lightning return stroke modeling: recent developments. In: International Conference on Ground and Earthing, (GROUND'2002) & Brazilian Workshop on Atmospheric Electricity, 3. (WAE), 2002, Rio de Janeiro, Brazil. **Proceedings**. Rio de Janeiro: SB-RAI:Brazilian Society for Electrical Protection Lightning, Earthing and EMC, 2002, p. 85-96.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning physics and effects**. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2003, 697 p.

RAKOV, V.A., **Initiation of lightning in thunderclouds**, In: Recent Res. Devel. Geophysics, vol. 6, p. 1-35, Research Signpost, India, 2004.

SABA, M. M. F.; BALLAROTTI, M. G.; PINTO Jr., O. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. **Journal of Geophysical Research**. v. 111, D03101, doi:10.1029/2005JD006415, 2006a.

SABA, M. M. F.; PINTO Jr., O; BALLAROTTI, M. G. Relation between lightning return stroke peak current and following continuing current. **Geophysical Research Letters**. v. 33, L23807, doi:10.1029/2006GL027455, 2006b.

SABA, M. M. F. et al. Positive leader characteristics from high-speed video observations. **Geophysical Research Letters**. v. 35, L07802, doi:10.1029/2007GL033000, 2008.

SCHONLAND, B. F. J.; MALAN, D. J.; COLLENS, H. Progressive lightning II, The discharge mechanism. **Proceedings of the Royal Society of London**, Series A, v. 152, n. 877, p. 595-625, 1935.

SCHONLAND, B. F. J. Progressive lightning IV, The discharge mechanism. **Proceedings of the Royal Society of London**, Series A, v. 164, n. 916, p. 132-150, 1938.

SCHONLAND, B. F. J.; MALAN, D. J.; COLLENS, H. Progressive lightning VI, **Proceedings of the Royal Society of London**, Series A, v. 168, n. 935, p. 455-469, 1938.

SCHONLAND, B. F. J. The lightning discharge, in **Handbuch der Physik**, New York: Springer-Verlag, v. 22, p. 576-628, 1956.

SCHULZ, W.; DIENDORFER, G. Flash multiplicity and interstroke interval in Austria In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 28, 2006, Kanazawa, Japan. **Proceedings**. Kanazawa, 2006. p. 402-406.

SENTMAN, D. D.; CHRISTIAN, H. J. Electrical Breakdown inside a thundercloud-Cosmic ray versus hydrometeor effects, **AGU abstract**, Fall Meeting, San Francisco, CA, December, 2005.

SHAO, X. M., KREHBIEL, P. R., THOMAS, R. J.; RISON, W., Radio interferometric observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida, **Journal of Geophysical Research**. v. 100, p. 2749-2783, 1995.

SOLOMON, R., SCHROEDER, V.; BAKER, M. B. Lightning initiation – conventional and runaway-breakdown hypotheses. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 127, p. 2683-2704, 2001.

SOLOMON, R., ADAMO, C., BAKER, M., A lightning initiation mechanism: application to a thunderstorm electrification model, **C. R. Physique**, v. 3, p. 1325-1333, 2002.

SOLÓRZANO, N. N. **Primeiras medidas de relâmpagos induzidos no Brasil**. 2003. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

STRATTON, J. A. **Electromagnetic Theory**, New York: McGraw-Hill, 1941, 615 p.

THOTTAPPILLIL, R.; RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. K and M changes in close lightning ground flashes in Florida. **Journal of Geophysical Research**. v. 95, p. 18631-18640, 1990.

THOTTAPPILLIL, R.; RAKOV, V. A.; UMAN, M. A.; BEASLEY, W. H.; MASTER, M. J.; SHELUKHIN, D. V. Lightning subsequent-stroke electric field peak greater than the first stroke peak and multiple ground terminations. **Journal of Geophysical Research**. v. 97, n. D7, p. 7503-7509, May 20, 1992.

THOMSON, E. M., GALIB, M. A., UMAN, M. A., BEASLEY, W. H.; MASTER, M. J. Some features of strokes occurrences in Florida lightning flashes. **Journal of Geophysical Research**. v. 89, p. 4910-4916, 1984.

UMAN, M. A.; VOSHALL, R. E. Time interval entre lightning strokes and the initiation of dart leaders. **Journal of Geophysical Research**. v. 73, p. 497-506, 1968.

UMAN, M. A. **The lightning discharge**. New York, USA: Academic Press Inc., 1987. 377 p.

UMAN, M. A. Natural lightning. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 30, n. 3, may/june 1994.

VALINE, W.; KRIDER, E. P. Statistics and characteristics of cloud-to-ground lightning with multiple ground contacts. **Journal of Geophysical Research**. v. 107, n. D20, 4441, doi:10.1029/2001JD001360, 2002.

YASHUNIN, S. A.; MAREEV, E. A.; RAKOV, V. A. Are lightning M components capable of initiating sprites and sprites halos? **Journal of Geophysical Research**. v. 112, n. D10109, doi:10.1029/2006JD007631, 2007.

WEIDMAN, C.D.; KRIDER, E.P. The fine structure of lightning return stroke wave forms, **Journal of Geophysical Research**. v. 83, p. 6239–6347, 1978. (Correction, 1982, v. 87; 7351).

WILLETT, J. C.; LE VINE, D. M.; IDONE, V. P. Lightning-channel morphology revealed by return-stroke radiation field waveforms. **Journal of Geophysical Research**. v. 100, n. D2, p. 2727-2738, February 20, 1995.

WILLIAMS, E. R. Problem in lightning physics – The role of polarity asymmetry. **Plasma Sources Science and Technology**. v. 15, p. S091-S108, 2006.

WINN, W. P., ALDRIDGE, T. V.; MORSE, C. B. Video tape recording of lightning flashes. **Journal of Geophysical Research**. v. 78, p. 4515-4519, 1973.

## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.