



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.26.00.37-TDI

## REDESENVOLVIMENTO DO LÍDER POSITIVO NO RELÂMPAGO

Maurício Grade Ballarotti

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Osmar Pinto Junior, e Marcelo Magalhães Fares Saba, aprovada em 23 de abril de 2015.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J7Q4E8>

INPE  
São José dos Campos  
2015

**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) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO  
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

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

**Membros:**

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

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas  
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos  
(CPT)

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

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

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

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação  
(SID)

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

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.26.00.37-TDI

## REDESENVOLVIMENTO DO LÍDER POSITIVO NO RELÂMPAGO

Maurício Grade Ballarotti

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Osmar Pinto Junior, e Marcelo Magalhães Fares Saba, aprovada em 23 de abril de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J7Q4E8>>

INPE  
São José dos Campos  
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Ballarotti, Maurício Grade.

B212r      Redesenvolvimento do líder positivo no relâmpago / Maurício Grade Ballarotti. – São José dos Campos : INPE, 2015.  
xxxii + 194 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.26.00.37-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

Orientadores : Drs. Osmar Pinto Junior, e Marcelo Magalhães Fares Saba.

1. Relâmpago. 2. Líder. 3. Descarga elétrica. 4. Quebra de rigidez. I.Título.

CDU 551.594.221

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

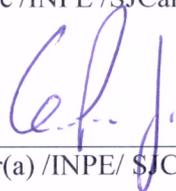
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aprovado pela Banca Examinadora em  
cumprimento a requisito exigido para a  
obtenção do Título de **Doutor(a)** em  
**Geofísica Espacial/Ciências  
Atmosféricas.**

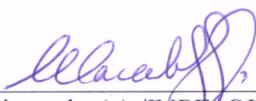
Dr. Alisson Dal Lago

  
Presidente /INPE/ SJC Campos - SP

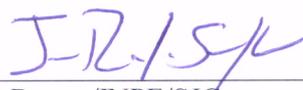
Dr. Osmar Pinto Junior

  
Orientador(a) /INPE/ SJC Campos- SP

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba

  
Orientador(a) /INPE/ SJC Campos- SP

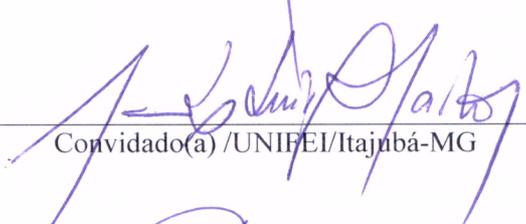
Dr. Jonas Rodrigues de Souza

  
Membro da Banca /INPE/SJC Campos- SP

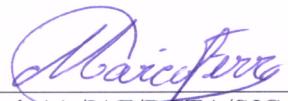
Dr. Alexandre Piantini

  
Convidado(a) /IEE/USP/São Paulo-SP

Dr. Manuel Luiz Barreira Martinez

  
Convidado(a) /UNIFEI/Itajubá-MG

Dr. Marco Antonio da Silva Ferro

  
Convidado(a) /IAE/DCTA/SJC Campos-SP

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples.

() unanimidade.

Título: "Redesenvolvimento do líder positivo no relâmpago".

Aluno (a): Mauricio Grade Ballarotti

São José dos Campos, 23 de Abril de 2015.



*“É uma doença natural no homem acreditar que ele possui a verdade”.*

Blaise Pascal

*“Todo cientista, através do estudo e da pesquisa pessoais, se aperfeiçoa a si mesmo e a própria humanidade. [...] A investigação científica constitui para vós, como para muitos, a via para o encontro pessoal com a verdade e, talvez, o lugar privilegiado para o próprio encontro com Deus, Criador do céu e da terra. Cultivada nesta perspectiva, a ciência resplandece em todo o seu valor, como um bem capaz de motivar uma existência, como uma grande experiência de liberdade para a verdade, como uma fundamental obra de serviço. Através dela, cada pesquisador sente que pode amadurecer e ajudar os outros a crescer em humanidade”.*

João Paulo II



*A Deus,  
pela natureza tão maravilhosamente misteriosa,  
e também a Nossa Senhora,  
pela generosa providência em toda a minha vida;  
aos meus pais, Cesar e Wanda,  
por todo o amor dedicado e por tudo o que me ensinaram;  
aos meus avós,  
por tudo o que conquistaram e com generosidade nos legaram.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que colaboraram para a realização deste trabalho, mas de maneira especial:

Pelo enorme apoio e afetuoso incentivo dos meus familiares, especialmente de meus pais, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram incondicionalmente.

Aos meus orientadores, por tudo o que me ensinaram e pela paciente dedicação.

Aos demais membros da banca por todas as contribuições, correções e cordial incentivo.

Ao casal Dr. Osmar e Dra. Iara Pinto, pelo generoso apoio e constante encorajamento.

A todos os colegas do grupo ELAT, pelo companheirismo no trabalho e na convivência, em especial Evandro Ferraz, Widinei Fernandes, Kleber Naccarato, Diovane Campos, Wendell Farias, Vandoir Bourscheidt, Marco A. Ferro, Antonio Saraiva, Gisele Zepka, Iara Mazzei, Cláudia Medeiros, Leandro Zanella, Anelize Condino, Amanda Romão, Jéferson Alves, Rodrigo Azambuja, Larissa Antunes e André Moraes.

Pelo serviço de todos os funcionários do INPE, especialmente todos os professores, coordenadores e representantes discentes do curso, especialmente, Alisson dal Lago, Filó, Cléo, Conceição, Carol, Lafaiete, Simone e Malu.

Pela colaboração nos trabalhos iniciais de campo: Evandro Ferraz, Rodrigo Cossalter, Dr. N. Schuch, Seu Firmino, Sr. Bonotto; e as instituições Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial e ELETROSUL.

A todos os colegas do ELAT e a Tom Warner que coletaram os dados nas campanhas no Brasil e nos EUA que utilizei. À WeatherVideoHD.tv, pela disponibilização dos vídeos para este trabalho de pesquisa.

À ALDIS, nas pessoas de Wolfgang Schulz, Gehard Diendorfer e Petra Pohl-Fakler, pela acolhida e prestativo apoio. De modo especial, W. Schulz pelo grande incentivo, inclusive para a publicação de nosso artigo, e pelo sistema de campo elétrico.

Pela amizade e especial apoio: aos amigos dos Centros Guairá e Esplanada, em especial João G. C. Racca, Osni Vicente, Levi Bonato, Oswaldo Gandin, Fernando Duarte, Alcides Goya, Paulo H. Lima, Lucas Cunha; Lee Woon Wah, Rogério Marrocos, Sirley de Souza, Eduardo Prado; Silvani C. de Sousa; Francisco Granziera Jr., Marcelo C. Tosin, Monica Selvatici, Jorge A. Correa, Aline de Lucas, José V. Bageston.

Pela generosa acolhida, Vera e Edmundo Selvatici, Da. Ivone, Franz e Andréia, Alan E. Kherani, Marco A. Barros, Francisco Granziera Jr., Marcos Scaramal, Renan Godoi, Francisco Neto, e Olympio e Ana Maria Sambatti.

Por tantas interessantes discussões, Gerson Ludwig, Moacir Lacerda, Earle Williams, Stan Heckman, Enrique Mattos, Paul Krehbiel, Ronald Thomas e Caitano da Silva.

À Faculdade Pitágoras de Londrina pelo apoio e compreensão, especialmente aos Profs. Fernando Ciriaco Dias Neto e Hans Jürgen Müller.

À Universidade Estadual de Londrina, nas pessoas do Prof. Osni Vicente pelo estágio docência, e do Prof. Marcelo C. Tosin, pelo estágio em seu laboratório.

Ao CNPq (475299/2003-5) e à CAPES por todo o apoio e fundamental suporte.

E a todos os que colaboraram ou me apoiaram para a realização deste trabalho de algum modo, meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

Neste trabalho é caracterizado o processo interno do relâmpago chamado então de “líder de recuo” (LR), responsável pelo redesenvolvimento do líder positivo através da quebra de rigidez nos diversos tipos de relâmpagos. É o processo que, de certo modo, foi menos estudado e compreendido, ao mesmo tempo em que tem sido observado indiretamente há quase um século. A revisão da literatura contemplou os seguintes tópicos: o ambiente elétrico do relâmpago na nuvem de tempestade; os processos internos do relâmpago nuvem-solo negativo (quebra de rigidez preliminar, líder escalonado, líder ascendente conectivo, descarga de retorno, líderes subsequentes, corrente contínua e componente M, e processos K e J), do nuvem-solo positivo e dos ascendentes; o líder de recuo; e o relâmpago como um líder bidirecional. Foram realizadas duas análises paralelas de registros do líder positivo, com foco no seu redesenvolvimento: uma baseada em câmera rápida com o líder exposto fora da nuvem para 18 relâmpagos nuvem-solo positivos e ascendentes negativos, e outra baseada em câmera rápida e antenas de campo elétrico com o líder dentro da nuvem para 16 relâmpagos nuvem-solo negativos. As duas análises foram discutidas em comum nos seguintes aspectos: características do líder de recuo (regime, sentido de propagação, local de iniciação e assinatura de campo elétrico); o líder de recuo na estrutura do líder positivo (propagação do ramo que sofre a ocorrência dos líderes de recuo, localização de uma série de líderes de recuo, direção de propagação do líder de recuo, funções do líder de recuo e extensão de sua propagação, taxas de geração e particularidades nos diferentes tipos de relâmpagos); interação do líder de recuo com outros processos (agrupamento, interatividade, interatividade cíclica e taxas médias de geração de líderes de recuo durante diferentes processos no nuvem-solo negativo); e sobre o mecanismo de disparo do LR. Um resultado particularmente importante desta tese trata sobre o papel de uma mínima diferença de potencial sobre o ramo decaído para o disparo do líder de recuo. Baseado em diversas evidências sintetizadas ao longo das duas análises, foi elaborado um modelo elétrico simplificado do disparo do líder de recuo, aplicável a diferentes tipos e situações observadas de relâmpagos. Tal diferença de potencial é apresentada em função da temperatura e do comprimento do ramo decaído. Sugere-se a mudança na nomenclatura de líder de recuo para líder de redesenvolvimento.



## POSITIVE LEADER REDEVOLPMENT IN LIGHTNING

### ABSTRACT

This thesis characterizes the internal lightning process called recoil leader, which is responsible for the positive leader redevelopment based on breakdown in many types of lightning discharges. This process is somehow the least analyzed and understood, at the same time that it has been indirectly observed for almost a century. The literature review treated the following subjects: thunderstorm electrical environment for lightning; internal processes of the negative cloud-to-ground lightning (preliminary breakdown, stepped-leader, upward connecting leader, return stroke, subsequent leaders, continuing current and M component, K and J processes), of the positive cloud-to-ground and the upward lightning; recoil leader; and lightning as a bidirectional leader. Two analyses of the positive leader were performed in parallel, focusing on its redevelopment: one based on high-speed camera records of exposed leader (outside the cloud) on 18 events of positive cloud-to-ground and negative upwards, and the other based on high-speed camera and electric field antennas records of hidden leader (inside the cloud) on 16 events of negative cloud-to-ground lightning. Both analyses were discussed together in the following topics: recoil leader characteristics (regime, propagation direction, initiation location and electric field signature); recoil leader in the positive leader structure (branch propagation during recoil leader, location of a recoil leader series, propagation direction and extent of the recoil leader, recoil leader roles, generation rates, particular behaviors in different lightning types); recoil leader interaction with other process (grouping, interactivity, cyclic interactivity, recoil leader generating rates during different processes of the negative cloud-to-ground lightning); and about the recoil leader triggering mechanism. A particularly important result of the present thesis shows the key role of a minimum potential difference over the decayed branch as an important condition for recoil leader triggering. Based on several evidences synthesized from both analyses, a simplified electrical model of the recoil leader triggering was developed, and applied to different lightning types and conditions. Such potential difference is presented as a function of decayed branch temperature and length. In terms of nomenclature, it is also suggested 'redevelopment leader' instead of 'recoil leader'.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tipos predominantes de relâmpagos posicionados na estrutura tripolar da nuvem de tempestade: o intranuvem, o nuvem-solo (negativo) e a descarga para o ar. ....	4
Figura 2.2 – Diagrama de classificação básica dos relâmpagos que envolvem o solo.....	5
Figura 2.3 – Fotografias de relâmpagos nuvem-solo, ou descendentes, e de um relâmpago solo-nuvem, ou ascendente, partindo de uma torre. ....	5
Figura 2.4 – Modelos rudimentares da distribuição de cargas em uma nuvem de tempestade isolada: acima, fotografia de uma nuvem de tempestade no Novo México (EUA) com indicação de como as cargas estariam distribuídas dentro e em sua superfície, como inferidas a partir de observações remotas e <i>in situ</i> ; abaixo, exemplo de um tripolo vertical representando uma estrutura idealizada e grosseira das cargas. ....	7
Figura 2.5 – Modelo conceitual da estrutura elétrica resultado da convecção em média latitude e no estágio maduro, acompanhado de perfis típicos de potencial e campo elétricos para as regiões fora do <i>updraft</i> ( <i>Non-updraft</i> ) e no <i>updraft</i> .....	9
Figura 2.6 – Vários processos de um relâmpago nuvem-solo negativo com valores típicos de intervalo de tempo entre si e originado entre os centros principal negativo (N) e positivo inferior (LP).....	11
Figura 2.7 – Fotografia de relâmpago nuvem-solo negativo de 12 descargas de retorno. Foto tirada próxima à Socorro, NM, EUA.....	13
Figura 2.8 – Ilustração (a) das características luminosas típicas de um raio nuvem-solo que seriam capturadas por uma câmara fotográfica de filme corrido e durações típicas dos processos. A escala temporal foi distorcida para facilitar a visualização. Em (b) está o mesmo raio que seria registrado por uma câmara de filme estacionário (câmera fotográfica convencional).....	13
Figura 2.9 – Diagrama mostrando a luminosidade de um raio nuvem-solo com três descargas de retorno e a corrente correspondente na base do canal: (a) imagem estática de uma fotografia convencional, (b) imagem de filme corrido ( <i>streak camera</i> ) e (c) corrente na base do canal.....	14
Figura 2.10 – Exemplos de campos elétricos devidos à primeira DR de relâmpagos NS negativos: (a) relâmpago de inverno a 25 km e (b) relâmpago de verão a uma distância desconhecida. ....	17
Figura 2.11 – Registros de campo elétrico irradiado por três relâmpagos NS a distâncias de 50-100 km. As setas indicam o mesmo evento em escalas de tempo diferentes: 2 ms (traço inferior), 0,4 ms (traço intermediário) e 40 $\mu$ s (traço superior), por divisão.....	18
Figura 2.12 – Fotografia do tipo <i>streak</i> de um relâmpago nuvem-solo negativo.....	19

Figura 2.13 – Imagens sequenciais obtidas a 4.000 qps mostrando a propagação do líder escalonado até o solo e seguido pela descarga de retorno (6,75 ms).....	20
Figura 2.14 – Curvas médias das primeiras descargas de retorno ( <i>acima</i> ) e das descargas subsequentes ( <i>abaixo</i> ), normalizadas pelo valor de pico, de relâmpagos nuvem-solo negativos. As curvas estão feitas em duas escalas de tempo, A e B.....	24
Figura 2.15 – Formas de onda típicas de intensidade de campo elétrico vertical e densidade de fluxo magnético horizontal para primeiras descargas de retorno (linha contínua) e descargas subsequentes (linha tracejada) para distâncias de 1, 2, 5, 10, 15, 50 e 200 km.....	25
Figura 2.16 – Temperatura da descarga de retorno em função do tempo obtida através da análise das emissões espectrais do nitrogênio uma vez ionizado (NII). As linhas tracejadas mostram o intervalo de tempo sobre o qual foi calculada a média dos dados. ....	26
Figura 2.17 – Fotografia de <i>streak camera</i> da segunda descarga de retorno de um relâmpago nuvem-solo que ocorreu em Gainesville, Florida, EUA em 10 de agosto de 1982. ....	28
Figura 2.18 – Registros de campo elétrico com constantes de tempo de 10 s ( <i>delta E</i> , baixas frequências) e de 100 $\mu$ s ( <i>fast delta E</i> , altas frequências), logaritmo da amplitude de radiação em RF (log RF) e mapeamento das fontes de radiação (coluna à direita) de um NS negativo múltiplo.....	31
Figura 2.19 – Registros de campo elétrico com constantes de tempo de 10 s ( <i>delta E</i> , baixas frequências) e de 100 $\mu$ s ( <i>fast delta E</i> , altas frequências) e logaritmo da amplitude de radiação em RF (log RF) para um raio negativo de sete descargas de retorno (DRs) com corrente contínua (CC) iniciada na quarta DR e de duração em torno de 120 ms. ....	34
Figura 2.20 – Fotografia de <i>streak camera</i> de uma descarga de retorno e duas componentes M associadas de um relâmpago ocorrido na Flórida (EUA) a uma distância de 4,9 km.....	35
Figura 2.21 – Registro de campo elétrico com variações em forma de gancho devido a quatro componentes M ocorridas durante a corrente contínua, iniciada pela quarta descarga de retorno (DR) de um relâmpago nuvem-solo negativo na Florida (EUA), observado a uma distância em torno de 5 km. ....	35
Figura 2.22 – Representação esquemática da corrente versus perfis de altura do canal para três modos de transferência de carga para o solo em descargas de retorno subsequentes: (a) líder-contínuo e descarga-de-retorno ( <i>dart-leader e return-stroke</i> ), (b) corrente contínua ( <i>continuing current</i> ) e (c) componente-M ( <i>M component</i> ). ....	36
Figura 2.23 – Registro de campo elétrico para um relâmpago nuvem-solo negativo ocorrido a uma distância de 2,5 km na Florida (EUA).....	39

Figura 2.24 – Formas de onda de campo elétrico (E, primeira parte), pulsos de campo magnético (B1 e B2, segunda e terceira partes) e emissão em VHF (quarta parte) de três variações K ocorrendo em um <i>ground flash</i> , após sua quarta descarga de retorno. ....	42
Figura 2.25 – Modelo conceitual de um relâmpago NS baseado no mapeamento em VHF de canais de relâmpagos. ....	43
Figura 2.26 – Fontes de radiação (VHF) de um relâmpago nuvem-solo negativo que ocorreu às 22:23:35 UTC, 22/jul/2000. ....	45
Figura 2.27 – Fotografias de um relâmpago nuvem-solo positivo. (a) Fotografia <i>streak</i> do último milissegundo de um líder positivo propagando em direção ao solo seguido da descarga de retorno. (b) Fotografia convencional tirada do mesmo local, a 3,3 km de distância. (c) Fotografia convencional tirada de local diferente mostrando o ponto de impacto no lago Lugano (Suíça) e o laço ( <i>loop</i> ) indicativo da conexão do líder descendente com o líder ascendente conectivo. ....	47
Figura 2.28 – Sequência de quadros de câmera rápida (a 1.000 qps) de um relâmpago nuvem-solo positivo observado a 20 km de distância. Registro obtido no Observatório Espacial do Sul (INPE), São Martinho do Sul (RS), 01/03/2006 23:29:40 UT.....	49
Figura 2.29 – Registros de LMA e campo elétrico ( <i>Potencial Grad.</i> ) de um relâmpago nuvem-solo positivo.....	51
Figura 2.30 – Diagrama esquemático mostrando a luminosidade e a correspondente corrente na base do canal de um relâmpago ascendente negativo. (a) imagem fotográfica de filme estacionário, (b) imagem fotográfica de filme corrido, e (c) registro de corrente. ....	53
Figura 2.31 – Registro completo de corrente de um relâmpago ascendente negativo iniciado a partir da torre Peissenberg na Alemanha. ....	54
Figura 2.32 – (a) Fotografia de dois relâmpagos ascendentes concorrentes originados a partir de duas torres no Monte San Salvatore (Suíça): um ascendente bipolar (torre da esquerda, T1) e um ascendente negativo (torre da direita, T2). (b) Registros de corrente medida em cada torre. A escala de tempo, que está em segundos, se aplica ao gráfico de cima. ....	55
Figura 2.33 – Oscilograma esquemático da corrente do líder positivo ( $i_L$ ) de um relâmpago ascendente (negativo) na base do canal. ....	56
Figura 2.34 – Visão tridimensional das fontes mapeadas de VHF de um relâmpago ascendente disparado por um foguete no Novo México, EUA. ....	57
Figura 2.35 – Imagens de um relâmpago nuvem-solo positivo exibindo extensos canais horizontais e ramificações ao longo do canal vertical, ocorrido em 22 de julho de 2007, South Dakota (EUA), a 16 km de distância. (a) fotografia (ISO 400, f/11). (b-f) quadros da câmera rápida de 135 $\mu$ s de exposição (7.200 quadros/s): (b) e (c) exemplos de líderes de recuo (RL) retrazendo um ramo do líder positivo fraco e ainda visível. (d-f)	

movimento retrógrado do líder de recuo em direção à origem do líder positivo. (g) imagem resultado da integração de todos os quadros durante a descida do líder positivo. ....	59
Figura 2.36 – Desenvolvimento e decaimento de um novo ramo no líder positivo ascendente ocorrido a partir de uma torre de TV em Rapid City, South Dakota, EUA. Sequência de imagens obtidas por uma câmera rápida a 7.200 quadros/s, com intervalo entre quadros de 139 $\mu$ s.....	62
Figura 2.37 – Interação de um líder de recuo, formado em um ramo decaído (mostrado na Figura 2.36), com o canal existente de um líder positivo ascendente originado em uma torre de TV. ....	63
Figura 2.38 – Desenvolvimento de um líder de recuo ao longo de um ramo decaído do líder ascendente obtido através de uma câmera rápida a 54.000 quadros/s (intervalo entre quadros de 18,52 $\mu$ s e exposição de 18,12 $\mu$ s). A seta (1-8) indica o ponto de início do líder de recuo, que se propaga de modo bidirecional. No quadro 10, o líder de recuo encontra um ramo condutor e iluminado (evento M). ....	64
Figura 2.39 – Registros de um evento M produzido pelo líder de recuo da Figura 2.38. (A) A variação de campo elétrico (dE) negativa indica a aproximação da extremidade negativa do líder de recuo, e a variação positiva indica um evento M. (B) A variação de campo magnético (H) mostra o pulso de corrente de um evento M que se seguiu a conexão do líder de recuo com o antigo ponto de ramificação. (C) Pulso de luminosidade ( <i>light</i> ) correspondente ao pulso de corrente do evento M. ....	65
Figura 2.40 – Quadros de câmera rápida (7.207 qps, exposição de 135 $\mu$ s) mostrando o ponto de iniciação ( <i>initiation point</i> ) e o desenvolvimento de dois líderes de recuo (a e b), separados entre si por 13 ms, ao longo do mesmo ramo de um líder ascendente a partir de uma torre ( <i>tower</i> ) em Rapid City, South Dakota, EUA. ....	67
Figura 2.41 – Quadros de câmera rápida (4.000 qps, exposição de 250 $\mu$ s) integrados no tempo mostrando líderes de recuo que retraçaram ramos decaídos. Relâmpago ocorrido em 15/01/2012 no Pico do Jaraguá, São Paulo, SP. ....	68
Figura 2.42 – Trecho de um vídeo de câmera rápida (7.207 qps, 134 $\mu$ s de exposição) integrado no tempo mostrando o desenvolvimento prolífico de luminosos líderes de recuo nos ramos fracamente luminosos de quatro líderes ascendentes. ....	69
Figura 2.43 – Evolução das distribuições de carga (Q) e função de potencial ( $\Phi$ ) no canal do líder-descarga de retorno antes, durante e após a conexão no solo para um relâmpago nuvem-solo negativo em função da altitude Z (os hachurados vertical e horizontal marcam cargas induzidas positivas e negativas respectivamente). ....	75

Figura 2.44 – Representação eletrostática simplificada da sequência líder contínuo e descarga de retorno em um relâmpago nuvem-solo negativo. Cargas positivas são vermelhas e as negativas azuis. ....	77
Figura 2.45 – Representação eletrostática simplificada das cargas durante a conexão de um líder de recuo e o canal de um líder ascendente. Cargas positivas são vermelhas e as negativas azuis. ....	79
Figura 2.46 – Imagens de descargas elétricas mostrando o desenvolvimento bidirecional dos líderes. ....	82
Figura 2.47 – Mapa de fontes de radiação de um relâmpago nuvem-solo negativo com quatro descargas de retorno (altitude, km <i>versus</i> tempo, s).....	84
Figura 2.48 – Desenvolvimento da árvore bidirecional e bipolar do relâmpago nuvem-solo negativo, composta do líder negativo ( <i>negative leader</i> ) e do líder positivo (acima). ....	85
Figura 2.49 – Mapa de fontes de radiação de um relâmpago nuvem-solo positivo (altitude, km <i>versus</i> tempo, s).....	86
Figura 2.50 – Desenvolvimento da árvore bidirecional e bipolar em um relâmpago nuvem-solo positivo, composta de líder positivo (abaixo) e líder negativo (acima). ....	86
Figura 3.1 – Quadro do vídeo 4387 contendo os quatro relâmpagos que ocorreram simultaneamente, um nuvem-solo positivo e três ascendentes negativos. ...	93
Figura 3.2 – Sequência descontinuada de quadros mostrando dois ramos principais supostamente de um único líder positivo do relâmpago nuvem-solo observados pela câmera rápida a 9.000 qps (exposição de 110 $\mu$ s) em South Dakota, EUA, em 17/jun/2010, 01:37:03 UTC.....	96
Figura 3.3 – Sequência descontinuada mostrando o redesenvolvimento de um ramo, através de um líder de recuo, antes do líder positivo de um relâmpago nuvem-solo tocar o solo. Evento registrado nos EUA (a 7.532 qps e tempo entre quadros de 133 $\mu$ s) em 06/jul/2012, 00:00:10 UTC. ....	98
Figura 3.4 – Líder de recuo (LR) se formando em um ramo de ponta ativa de um relâmpago nuvem-solo positivo instantes antes da conexão com o solo e da descarga de retorno, enquanto outros LRs ocorrem.....	99
Figura 3.5 – Sequência descontinuada de quadros (7.207 qps) do líder positivo de um relâmpago nuvem-solo em direção ao solo, onde se podem observar as sucessivas localizações da origem dos diversos líderes de recuo (linhas pontilhadas) acompanhar o avanço do líder positivo.....	100
Figura 3.6 – Quatro líderes de recuo distintos originados em um mesmo ramo principal de um relâmpago ascendente negativo. A torre está indicada pelo triângulo. ....	101
Figura 3.7 – Quadros sequenciais posteriores aos da Figura 3.2, onde é possível observar o ramo esquerdo em regime de corrente contínua (após a descarga de retorno) e a ocorrência de um líder de recuo no ramo	

	direito, quando esse está em propagação dificultada e menos luminoso (870,005 ms).....	103
Figura 3.8	– Sequência contínua de quadros (9.000 qps, exposição de 110 $\mu$ s) mostrando a formação e propagação de um líder de recuo após a interrupção da corrente no tronco do canal de um relâmpago ascendente negativo, ocasionando uma nova descarga de retorno (último quadro). ....	104
Figura 3.9	– Sequência descontinuada de quadros (7.207 qps, exposição de 135 $\mu$ s) mostrando um caso de múltipla interação entre ramos após a descarga de retorno de um relâmpago nuvem-solo positivo. ....	106
Figura 3.10	– Sequência descontínua de quadros (9.000 qps, exposição de 110 $\mu$ s) mostrando um caso de múltipla interação entre ramos envolvendo a quarta descarga de retorno de um relâmpago ascendente negativo.....	108
Figura 3.11	– Sequência descontinuada de quadros (9.000 qps, exposição de 110 $\mu$ s) mostrando um caso de múltipla interação entre ramos envolvendo a terceira descarga de retorno de um relâmpago ascendente negativo.....	109
Figura 3.14	– Sequência contínua de quadros (9.000 qps, exposição de 110 $\mu$ s) mostrando um caso de interação cíclica entre ramos durante a corrente contínua inicial (antes da primeira descarga de retorno) de um relâmpago ascendente negativo. ....	111
Figura 3.12	– Fluxograma da interatividade cíclica observada entre líderes de recuo e a elevação da corrente em outro ramo do líder positivo de relâmpagos nuvem-solo positivos. ....	112
Figura 3.13	– Fluxograma da interatividade cíclica observada entre líderes de recuo e outros processos em relâmpagos ascendentes negativos. ....	112
Figura 3.15	– Evolução da ocorrência de líderes de recuo em dois relâmpagos nuvem-solo positivos, calculados a partir do número de líderes de recuo (LRs) e do tempo do quadro. ....	113
Figura 3.16	– Evolução da ocorrência de líderes de recuo em dois relâmpagos ascendentes negativos, calculados a partir do número de líderes de recuo (LRs) e do tempo do quadro. ....	114
Figura 4.1	– Taxa média (azul) e quantidade total (verde) de líderes de recuo em relação à razão sinal/ruído do campo elétrico para cada um dos 16 relâmpagos nuvem-solo negativos analisados. ....	120
Figura 4.2	– Líder de recuo que ocorreu após a quarta e última descarga de retorno do relâmpago nuvem-solo negativo 4 (M12P35). ....	123
Figura 4.3	– Líderes de recuo ocorridos ao redor da terceira descarga de retorno (DR 3) do relâmpago NS negativo 2 (M12P91) mostrados na sequência descontinuada de quadros da câmera rápida (10.000 qps, exp. de 99 $\mu$ s) e no campo elétrico rápido.....	124
Figura 4.4	– Líderes de recuo ocorridos em regiões diferentes da nuvem durante a corrente contínua que se seguiu após a única descarga de retorno do	

relâmpago NS Negativo 4 (M12P35). Tempo de exposição do quadro de 99,4 $\mu$ s.....	126
Figura 4.5 – Sequência de líderes de recuo ocorrida durante a corrente contínua do relâmpago NS Negativo 4 (M12P35), originados na mesma região da nuvem (continuação da série apresentada na Figura 4.4). Tempo de exposição do quadro de 99,4 $\mu$ s.....	127
Figura 4.6 – Sequência de dois líderes de recuo ocorrida após o término da corrente contínua do relâmpago NS negativo 4 (M12P35), originados na mesma região da nuvem. Tempo de exposição do quadro de 99,4 $\mu$ s.....	128
Figura 4.7 – Dois líderes de recuo formados em ramos próximos e distintos no relâmpago NS negativo 2 (M12P91). .....	129
Figura 4.8 – Fluxograma dos processos observados na interatividade cíclica entre de líderes de recuo em alguns relâmpagos nuvem-solo negativos. ....	130
Figura 4.9 – Sequência de quatro líderes de recuo (LRa-LRd) intercalados por componentes M (Ma-Md) após a sétima descarga de retorno (DR7) do relâmpago NS negativo 15 (M10P14). (Continua).....	132
Figura 4.10 – Sequência de seis líderes de recuo (LRa-LRf, defletindo para cima) intercalados por componentes M (Ma-Mf, defletindo para baixo) após a décima descarga de retorno (DR10) do relâmpago NS negativo 11 (M10P18). (Continua).....	134
Figura 4.11 – Quantidade cumulativa de líderes de recuo ao longo da vida dos 16 relâmpagos nuvem-solo negativos analisados, separada em dois grupos de acordo com o valor de multiplicidade de descargas de retorno (M).....	136
Figura 4.12 – Quantidade cumulativa de líderes de recuo (azul), descargas de retorno (preto), presença de corrente contínua (vermelho) observados através da câmera rápida e do campo elétrico rápido e campo elétrico lento do relâmpago nuvem-solo negativo 1 (M12P95). ....	137
Figura 4.13 – Relâmpago nuvem-solo negativo 2 (M12P91) com três descargas de retorno e corrente contínua longa após a segunda. Detalhes na Figura 4.12. ....	137
Figura 4.14 – Relâmpago nuvem-solo negativo 3 (M12P90) com oito descargas de retorno e corrente contínua longa após a sétima. Detalhes na Figura 4.12. ....	138
Figura 4.15 – Relâmpago nuvem-solo negativo 4 (M12P35) com uma descarga de retorno seguida por uma corrente contínua longa. Detalhes na Figura 4.12. ....	138
Figura 4.16 – Relâmpago nuvem-solo negativo 5 (M10P32) com quatro descargas de retorno. Detalhes na Figura 4.12.....	139
Figura 4.17 – Relâmpago nuvem-solo negativo 6 (M10P31) com duas descargas de retorno. Detalhes na Figura 4.12.....	139

Figura 4.18 – Relâmpago nuvem-solo negativo 7 (M10P30) com seis descargas de retorno e corrente contínua longa após a quinta. Detalhes na Figura 4.12. ....	140
Figura 4.19 – Relâmpago nuvem-solo negativo 8 (M10P26) com 14 descargas de retorno e corrente contínua longa após a quinta. Detalhes na Figura 4.12. ....	140
Figura 4.20 – Relâmpago nuvem-solo negativo 9 (M10P20) com nove descargas de retorno e corrente contínua longa após a quinta. Detalhes na Figura 4.12. ....	141
Figura 4.21 – Relâmpago nuvem-solo negativo 10 (M10P19) com três descargas de retorno. Detalhes na Figura 4.12. ....	141
Figura 4.22 – Relâmpago nuvem-solo negativo 11 (M10P18) com 10 descargas de retorno e corrente contínua longa após a décima. Detalhes na Figura 4.12. ....	142
Figura 4.23 – Relâmpago nuvem-solo negativo 12 (M10P17) com sete descargas de retorno. Detalhes na Figura 4.12. ....	142
Figura 4.24 – Relâmpago nuvem-solo negativo 13 (M10P16) com nove descargas de retorno e corrente contínua longa após a terceira. Detalhes na Figura 4.12. ....	143
Figura 4.25 – Relâmpago nuvem-solo negativo 14 (M10P15) com oito descargas de retorno e corrente contínua longa após a quinta. Detalhes na Figura 4.12. ....	143
Figura 4.26 – Relâmpago nuvem-solo negativo 15 (M10P14) com oito descargas de retorno e corrente contínua longa após a sétima. Detalhes na Figura 4.12. ....	144
Figura 4.27 – Relâmpago nuvem-solo negativo 16 (M10P11) com uma descarga de retorno. Detalhes na Figura 4.12. ....	144
Figura 4.28 – Exemplo de caso (M12P95) mostrando a quantidade acumulada de líderes de recuo com as taxas médias de líderes de recuo $((\text{ms})^{-1})$ indicadas para os três períodos: 3 ms pós descarga de retorno (preto), com (vermelho) e sem corrente contínua (verde). ....	147
Figura 4.29 – Histogramas das taxas médias de líderes de recuo durante os 3 ms pós descarga de retorno (DR) para todas as ordens, somente subsequentes e somente primeiras. ....	148
Figura 4.30 – Histogramas das taxas médias de líderes de recuo durante eventos de corrente contínua mais longa que 10 ms excluindo-se os primeiros 3 ms, para todas as ordens, somente subsequentes e somente primeiras. ....	148
Figura 4.31 – Histogramas das taxas médias de líderes de recuo nos intervalos sem corrente contínua para todas as ordens, somente subsequentes e somente primeiras. ....	149
Figura 4.32 – Histogramas das taxas médias de líderes de recuo para os três períodos: 3 ms após a descarga de retorno (DR), na ausência de corrente	

contínua (“sem CC”, equivalente à taxa de Ks), e durante a ocorrência de corrente contínua mais longa que 10 ms excluindo o período inicial de 3 ms.....	150
Figura 4.33 – Resultado do teste Kruskal-Wallis para as taxas médias de líderes de recuo incluindo eventos de todas as ordens de descarga de retorno (DR), para os três períodos: 3 ms após a descarga de retorno (DR), na ausência de corrente contínua (“sem CC”, equivalente à taxa de Ks), e durante a ocorrência de corrente contínua mais longa que 10 ms excluindo o período inicial de 3 ms.....	150
Figura 4.34 - Resultado do teste Kruskal-Wallis para as taxas médias de líderes de recuo durante os períodos de 3 ms após a descarga de retorno (DR) e os períodos de corrente contínua (CC) mais longas que 10 ms excluindo-se os primeiros 3 ms, para eventos de todas as ordens de descarga de retorno.....	151
Figura 4.35 - Resultado do teste Kruskal-Wallis para as taxas médias de líderes de recuo durante os períodos de 3 ms após a descarga de retorno (DR) e os períodos sem corrente contínua (CC), para eventos de todas as ordens de descarga de retorno. ....	151
Figura 4.36 - Resultado do teste Kruskal-Wallis para as taxas médias de líderes de recuo durante os períodos de corrente contínua (CC) mais longas que 10 ms excluindo-se os primeiros 3 ms e os períodos sem CC, para eventos de todas as ordens de descarga de retorno. ....	152
Figura 4.37 – Histogramas das taxas médias de líderes de recuo para os três períodos: 3 ms após a descarga de retorno (DR), na ausência de corrente contínua (“sem CC”, equivalente à taxa de Ks), e durante a ocorrência de corrente contínua mais longa que 10 ms excluindo o período inicial de 3 ms.....	153
Figura 4.38 – Resultado do teste Kruskal-Wallis para as taxas médias de líderes de recuo incluindo eventos somente de descargas de retorno (DR) subsequentes, para os três períodos: 3 ms após a descarga de retorno (DR), na ausência de corrente contínua (“sem CC”, equivalente à taxa de Ks), e durante a ocorrência de corrente contínua mais longa que 10 ms excluindo o período inicial de 3 ms. ....	153
Figura 4.39 – Resultado do teste Kruskal-Wallis para as taxas médias de líderes de recuo durante os períodos de 3 ms após a descarga de retorno (DR) e os períodos de corrente contínua (CC) mais longas que 10 ms excluindo-se os primeiros 3 ms, somente para eventos de descarga de retorno subsequente.....	154
Figura 4.40 – Resultado do teste Kruskal-Wallis para as taxas médias de líderes de recuo durante os períodos de 3 ms após a descarga de retorno (DR) e os períodos sem corrente contínua (CC), somente para eventos de descarga de retorno subsequente. ....	154

Figura 4.41 – Resultado do teste Kruskal-Wallis para as taxas médias de líderes de recuo durante os períodos de corrente contínua (CC) mais longas que 10 ms excluindo-se os primeiros 3 ms e os períodos sem CC, somente para eventos de descarga de retorno subsequente. ....	155
Figura 5.1 – Diagrama dos ciclos de interatividade cíclica entre líderes de recuo e outros processos que promovem a elevação da corrente no entroncamento comum ao ramo que sofreu ou sofrerá a ocorrência do líder de recuo. ....	164
Figura 5.2 – Modelagem do regime de potencial em ramos decaídos do líder positivo para as diferentes situações analisadas. ....	167
Figura 5.3 – Modelo elétrico generalizado de disparo do líder de recuo no trecho decaído de um ramo do líder positivo.....	169
Figura A.1 – Distribuição de probabilidade do número de descargas por relâmpago observado no Vale do Paraíba (“this study” se refere a Ballarotti et al., 2012b) comparado com Berger (1967), a função aproximada $P(x)$ e a distribuição da norma IEEE 1410/2010 (IEEE, 2011). ....	190
Figura A.2 – Distribuição de probabilidades do intervalo de tempo entre descargas de retorno observado no Vale do Paraíba (“this study” se refere a Ballarotti et al., 2012b), sua função aproximada $P(x)$ e seu ajuste para uma distribuição lognormal comparados com Berger et al. (1975).....	191
Figura A.3 – Distribuição de probabilidades da duração da corrente contínua observada no Vale do Paraíba (“this study” se refere a Ballarotti et al., 2012b), sua função aproximada $P(x)$ e seu ajuste para uma distribuição lognormal. ....	193
Figura A.4 – Distribuição de probabilidade da duração total dos relâmpagos com múltiplas descargas de retorno observada no Vale do Paraíba (“this study” se refere a Ballarotti et al., 2012b), sua função aproximada $P(x)$ e seu ajuste para uma distribuição lognormal comparados com Berger et al. (1975).....	194
Figura A.5 – Duração total média dos relâmpagos versus o número de descargas por relâmpago para 724 raios múltiplos observados no Vale do Paraíba (SP). A quantidade de casos para cada multiplicidade e as informações do ajuste linear estão indicados. ....	194

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características estimadas do canal do relâmpago antes, durante e depois da descarga de retorno.....	26
Tabela 3.1 – Os 18 vídeos de câmera de alta velocidade contendo líderes de recuo analisados neste trabalho de relâmpagos nuvem-solo positivos (descendentes) e ascendentes negativos. ....	92
Tabela 3.2 – Estatística de ocorrência dos líderes de recuo observados nos relâmpagos nuvem-solo positivos analisados.....	114
Tabela 3.3 – Estatística de ocorrência dos líderes de recuo observados nos relâmpagos ascendentes negativos analisados.....	115
Tabela 4.1 – Conjunto dos 16 relâmpagos nuvem-solo negativos analisados neste estudo.....	119
Tabela 4.2 – Estatística geral do grupo de relâmpagos nuvem-solo negativos analisados em termos de líderes de recuo.....	145
Tabela 4.3 – Estatística básica das taxas médias de líderes de recuo (em $(\text{ms})^{-1}$ ) durante os três processos ou estados do canal conectado ao solo: imediatamente após a descarga de retorno (DR), durante qualquer corrente contínua (CC) mais longa que 10 ms desconsiderando os primeiros 3 ms, e na ausência de CC.....	147
Tabela 5.1 – Mediana das taxas médias de líderes de recuo dos processos ou regimes do relâmpago nuvem-solo negativo relacionadas com seus respectivos níveis de corrente.....	165
Tabela A.1 – Valores típicos dos principais processos do relâmpago nuvem-solo negativo.....	188
Tabela A.2 – Distribuições estatísticas de quatro parâmetros do relâmpago nuvem-solo negativo baseadas em estudos de contagem acurada de descargas de retorno.....	189



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BrasilDat	Sistema Brasileiro de Detecção de Descargas Atmosféricas
CC	Corrente contínua, <i>continuing current</i> (processo interno do relâmpago)
CG	<i>Cloud-to-ground</i> (nuvem-solo)
DL	<i>Dart leader</i> (líder contínuo)
DR	Descarga de retorno
DRs	Descargas de retorno
DSL	<i>Dart-stepped leader</i> (líder escalonado-contínuo)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
HF	<i>High Frequency</i> , frequência alta (3-30 MHz)
IC	<i>Intracloud</i> (intranuvem)
IN	Relâmpago do tipo intranuvem
LR	Líder de recuo ( <i>recoil leader</i> )
LRs	Líderes de recuo
LMA	<i>Lightning Mapping Array</i> (Arranjo de Mapeamento de Relâmpagos)
NS	Relâmpago do tipo nuvem-solo
PB	<i>Preliminary breakdown</i> (quebra de rigidez preliminar)
qps	Quadros por segundo (taxa de amostragem de vídeo de alta velocidade)
QRP	Quebra de rigidez preliminar ( <i>initial breakdown</i> ou <i>preliminary breakdown</i> )
RF	<i>Radio Frequency</i> (radiofrequência)
RS	<i>Return stroke</i> (descarga de retorno)
SL	<i>Stepped leader</i> (líder escalonado)
SN	Relâmpago do tipo solo-nuvem
UHF	<i>Ultra High Frequency</i> , frequência ultra-alta (300-3.000 MHz)
ULF	<i>Ultra Low Frequency</i> , frequência ultrabaixa (0,3-3 kHz)
VHF	<i>Very High Frequency</i> , frequência muito alta (30-300 MHz)
VLF	<i>Very Low Frequency</i> , frequência muito baixa (3-30 kHz)



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta U_{RD}$	Diferença de potencial sobre trecho decaído do ramo (V)
$\Delta U_{LR}$	Diferença de potencial sobre trecho decaído do ramo suficiente para o disparo do líder de recuo (V)
E	Campo elétrico (V/m)
$E_{QR}$	Campo elétrico de quebra de rigidez (V/m)
$L_{RD}$	Comprimento equivalente do trecho decaído do ramo (m)
T	Temperatura do canal do relâmpago (K)
$T_{RD}$	Temperatura do trecho decaído do ramo (K)
U	Potencial elétrico (V)
$U_E$	Potencial do entroncamento do líder positivo (V)
$U_{gnd}$	Potencial de terra (V)
$U_{ponta}$	Potencial da ponta do ramo do líder positivo (V)



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1.	Delimitação do assunto tratado.....	1
1.2.	Estrutura deste trabalho .....	2
2	O RELÂMPAGO .....	3
2.1.	O ambiente elétrico do relâmpago .....	6
2.2.	O relâmpago nuvem-solo negativo.....	9
2.2.1.	Visão geral dos processos do relâmpago nuvem-solo negativo .....	9
2.2.2.	Processos físicos envolvidos no relâmpago nuvem-solo negativo.....	14
2.2.2.1.	Iniciação do relâmpago na nuvem de tempestade .....	15
2.2.2.2.	Quebra de rigidez preliminar .....	16
2.2.2.3.	Líder escalonado.....	18
2.2.2.4.	Descarga de retorno .....	22
2.2.2.5.	Líderes subsequentes .....	27
2.2.2.6.	Corrente contínua e Componente M.....	32
2.2.2.7.	Processos J e K .....	37
2.3.	O relâmpago nuvem-solo positivo.....	45
2.4.	O relâmpago ascendente .....	52
2.5.	O líder de recuo .....	58
2.5.1.	Observações e características do líder de recuo .....	58
2.5.2.	Associação do líder de recuo com outros processos conhecidos.....	70
2.5.3.	Modelos e hipóteses sobre a formação o líder de recuo .....	72
2.6.	O relâmpago como líder bidirecional e seus processos essenciais .....	81
2.6.1.	O desenvolvimento do relâmpago nuvem-solo .....	83
2.6.2.	Corrente contínua como indicador do desenvolvimento do líder dentro da nuvem.....	87
2.6.3.	Correspondência entre os principais processos observados e os processos essenciais do relâmpago .....	88
3	ANÁLISE DE REGISTROS DO LÍDER DE RECUO EM LÍDER POSITIVO FORA DA NUVEM .....	91
3.1.	Metodologia.....	91
3.1.1.	Limitações da técnica utilizada.....	93
3.2.	Características observadas do líder de recuo .....	94
3.2.1.	Regime de funcionamento .....	95
3.2.2.	Localização da região de iniciação .....	96
3.2.2.1.	Líderes de recuo separados .....	97
3.2.2.2.	Sequência de líderes de recuo.....	100
3.2.3.	Propagação do líder de recuo.....	102
3.2.4.	Registro de grupos de líderes de recuo simultâneos .....	105

3.2.5.	Interatividade do líder de recuo com outros processos.....	105
3.2.5.1.	Desenvolvimento progressivo do líder positivo .....	105
3.2.5.2.	Geração de descarga de retorno .....	106
3.2.5.3.	Geração de componente M .....	107
3.2.5.4.	Interatividade cíclica entre líderes de recuo e outros processos .....	110
3.3.	Estatísticas de ocorrência.....	112
4	<b>ANÁLISE DE REGISTROS DO LÍDER DE RECUO EM LÍDER POSITIVO DENTRO NA NUVEM</b> .....	117
4.1.	Metodologia.....	117
4.1.1.	Limitações da técnica utilizada.....	120
4.2.	Características observadas do líder de recuo .....	121
4.2.1.	Assinaturas dos líderes de recuo .....	121
4.2.2.	Agrupamento de líderes de recuo .....	125
4.2.3.	Interatividade cíclica entre líderes de recuo .....	130
4.3.	Evolução cumulativa e temporal dos líderes de recuo.....	135
4.3.1.	Casos individuais .....	136
4.4.	Estatísticas de ocorrência.....	144
4.4.1.	Taxas médias de líderes de recuo durante os três regimes .....	145
4.4.1.1.	Comparação das taxas médias de líderes de recuo entre os três regimes ...	149
5	<b>DISCUSSÃO</b> .....	157
5.1.	Características do líder de recuo.....	157
5.2.	O líder de recuo na árvore do relâmpago.....	158
5.3.	Interação do líder de recuo com outros processos .....	163
5.3.1.	Agrupamento, interatividade e interatividade cíclica entre os líderes de recuo .....	163
5.3.2.	Taxa de líderes de recuo dos diferentes processos do nuvem-solo negativo.....	164
5.4.	Sobre o mecanismo de disparo do líder de recuo .....	166
6	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	171
6.1.	Contribuições desta tese .....	171
6.2.	Sugestões para trabalhos futuros .....	173
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	175
	<b>APÊNDICE A – ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DO RELÂMPAGO NUVEM-SOLO NEGATIVO</b> .....	187
A.1	Multiplicidade de descargas de retorno .....	190
A.2	Intervalo de tempo entre descargas de retorno .....	191
A.3	Ocorrência e duração da corrente contínua .....	192
A.4	Duração total do relâmpago.....	193

# 1 INTRODUÇÃO

O relâmpago é um fenômeno de escala quilométrica, de curta duração e de extrema potência, muito danoso aos mais diversos sistemas (*e.g.*, sistemas de transmissão e distribuição de energia, instalações elétricas, equipamentos elétricos e eletrônicos, edificações, etc.) e que rotineiramente deixa sequelas e causa mortes de pessoas e animais, de modo particularmente expressivo no Brasil. É também um fenômeno muito complexo e pouco compreendido, tanto em seu próprio funcionamento quanto na sua interação com os sistemas em geral.

De fato, o relâmpago envolve diversos processos e tipos de descargas elétricas, sendo basicamente uma evolução de *streamer*, que é constituído de plasma frio (de temperatura próxima a do ambiente) e formado a partir da avalanche de elétrons, até líder de escala quilométrica, este constituído de plasma quente com alta densidade de corrente. É praticamente um encadeamento de quase todos os tipos de descargas elétricas conhecidas.

A pesquisa sobre os relâmpagos, e em Eletricidade Atmosférica em geral, ainda é predominantemente observacional e analítica, focando em descrever, nomear e comparar os diferentes processos (MAZUR; RUHNKE, 1993). Há, portanto, relativamente pouca teoria quando comparado ao montante de observações e medições já realizadas até os dias de hoje. Não diferente, o conteúdo desta tese é basicamente observacional.

## 1.1. Delimitação do assunto tratado

O líder positivo, diferentemente do negativo, apresenta um comportamento particular em seu desenvolvimento. Quando um ramo tem sua progressão dificultada, ocorre por vezes a sua reativação de modo retrógrado. Neste trabalho, é estudado esse redesenvolvimento do líder positivo ou seu processo responsável, que não foi identificado com clareza há muito tempo e nem possui uma nomenclatura muito definida. O frequentemente chamado “líder de recuo” vem sendo interpretado como o fenômeno por trás de outras nomenclaturas definidas no século passado (líder contínuo,

evento K, evento M, etc.), que seriam variações ou formas diferentes de um mesmo processo.

O líder de recuo, além de já ter sido observado em diversos tipos de relâmpagos, parece desempenhar papéis ou funções importantes no relâmpago como um todo, que poderiam implicar diretamente em *e.g.*, sua duração total, multiplicidade e intervalo entre descargas de retorno. Sobre o líder contínuo, que seria uma forma bastante expressiva do líder de recuo, Bazelyan e Raizer (2000, p. 10) afirmam que “não há nem teoria nem análogo em laboratório para este tipo de descarga em gás”.

Assim surge uma especial motivação para compreender melhor o líder de recuo e como é sua interação com os outros processos do relâmpago. Especificamente neste trabalho, a pergunta central é: quais são as condições que propiciam a ocorrência do líder de recuo?

## **1.2. Estrutura deste trabalho**

Este trabalho contém uma revisão da literatura (cap. 2) sobre o relâmpago em geral (ambiente elétrico da nuvem, tipos, processos internos), mas com especial ênfase no relâmpago nuvem-solo negativo e no líder de recuo. Foram realizadas duas análises com metodologias diferentes sobre o líder de recuo no líder positivo: a primeira onde o líder positivo se desenvolve fora da nuvem expressivamente, *i.e.*, em relâmpagos nuvem-solo positivos e ascendentes negativos (cap. 3); e a segunda onde o líder fica oculto na nuvem, *i.e.*, em nuvem-solo negativos (cap. 4). Os resultados encontrados são discutidos no cap. 5 e as considerações finais apresentadas no cap. 6. O Apêndice A contém uma publicação do autor e colegas sobre distribuições estatísticas dos principais parâmetros do relâmpago nuvem-solo negativo. Demais publicações do autor e colegas estão citadas na revisão da literatura.

## 2 O RELÂMPAGO

O relâmpago, também chamado de descarga atmosférica<sup>1</sup>, pode ser definido de uma maneira simples e descritiva como sendo uma “descarga transitória de alta corrente cujo comprimento percorrido tem dimensão de quilômetros” (UMAN; KRIDER, 1989), embora seja um fenômeno complexo e de grande variabilidade. Esta definição distingue o relâmpago de outras descargas elétricas atmosféricas ou de laboratório em gases como, por exemplo, *streamers*, descarga corona (RAKOV; UMAN, 2003, p. 5), arco elétrico ou ainda descargas longas em laboratórios de alta tensão (*long sparks*). De fato, o relâmpago envolve diversos processos e tipos de descargas elétricas, sendo basicamente uma evolução de *streamer* até líder de escala quilométrica. Uman (1971) compara o relâmpago com uma descarga longa em laboratório.

Os relâmpagos podem ser divididos basicamente em dois grupos: aqueles que envolvem o solo (*ground flashes*) e aqueles que não envolvem o solo (*cloud flashes*). De acordo com Pinto e Pinto (2000) e Rakov e Uman (2003), dentre os *cloud flashes*, o relâmpago pode ocorrer dentro da própria nuvem, sendo chamado “intranuvem” (*intracloud*, sendo o mais frequente dentre todos os relâmpagos, cerca de 70-80%); pode ocorrer a descarga aérea, também chamada “nuvem para o ar” ou “nuvem-ar” (*cloud-to-air* ou *air discharge*); o “relâmpago aranha” (*spider lightning*); o relâmpago “entre nuvens” (*intercloud* ou *cloud-to-cloud*); a “descarga compacta” (*compact discharge*); a “descarga da nuvem para cima”, etc. Outras formas de relâmpagos são ainda possíveis e.g., o relâmpago induzido artificialmente por torre, foguete, aeronave ou outra estrutura; o enigmático relâmpago bola (*ball lightning*); o relâmpago conta (*bead lightning*); dentre outras formas menos usuais (PINTO; PINTO, 2000, p. 107-29; RAKOV; UMAN, 2003, cap. 20). A Figura 2.1 mostra os principais e mais frequentes tipos de relâmpagos.

---

<sup>1</sup> Na Engenharia, é usual a denominação “descarga atmosférica” para o relâmpago. A norma NBR 5419 “Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001) define: descarga atmosférica é a “descarga elétrica de origem atmosférica entre uma nuvem e a terra ou entre nuvens, consistindo em um ou mais impulsos de vários quiloampères”; e raio é “um dos impulsos elétricos de uma descarga atmosférica para a terra”. O livro Visacro (2005) é um exemplo de referência nesta abordagem.

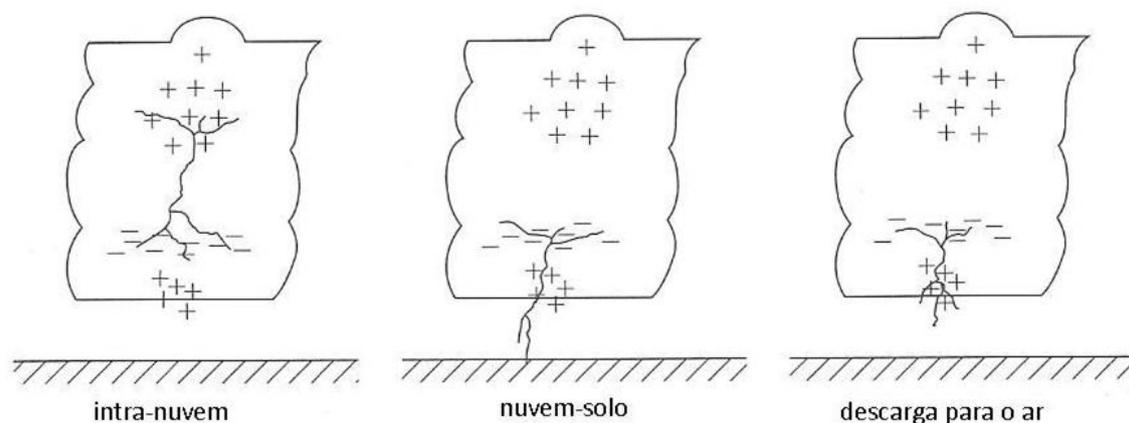


Figura 2.1 – Tipos predominantes de relâmpagos posicionados na estrutura tripolar da nuvem de tempestade: o intranuvem, o nuvem-solo (negativo) e a descarga para o ar.  
 Fonte: adaptado de Cooray (2003, p. 4).

De acordo com Rakov e Uman (2003, p. 321,323), o termo *cloud discharges* (*cloud flashes*) é usado para denotar três tipos de relâmpagos: (i) relâmpago “intranuvem” (*intracloud discharge*), que ocorrem confinados dentro da nuvem de tempestade, (ii) relâmpago “entrenuvens” (*intercloud discharge*), que ocorrem entre nuvens de tempestade, e (iii) “descarga aérea”, “nuvem para o ar” ou relâmpago “nuvem-ar” (*air discharge*), que ocorrem entre a nuvem de tempestade e o ar limpo. Em termos globais, aproximadamente três quartos dos relâmpagos são *cloud flashes*, sendo o intranuvem o mais comum. Os *cloud flashes* exibem maior variabilidade do que os *ground flashes* pelo fato de que os últimos “envolvem um ‘eletrodo’ aterrado relativamente bom condutor”, enquanto que os primeiros são sem “eletrodo” (“*electrodeless*”).

Os *ground flashes* (em português, chamados usualmente de raios) foram os mais estudados até hoje principalmente por causa da necessidade de proteção contra seus efeitos deletérios, mas também pela maior facilidade de observação e medição (PINTO; PINTO, 2000, p. 78; RAKOV; UMAN, 2003). Dentre os *ground flashes*, podem ser classificados quatro tipos básicos de relâmpagos, conforme o diagrama da Figura 2.2. A direção de propagação da descarga (morfologia) e sua polaridade são os critérios de classificação dos *ground flashes*. A polaridade da descarga é definida pela carga líquida deixada no solo. Os raios bipolares, tanto descendentes quanto ascendentes, não são contemplados neste diagrama simplificado por serem raros e pouco compreendidos. A

Figura 2.3 mostra fotografias de *ground flashes*. É possível distinguir os descendentes (nuvem-solo) dos ascendentes pela direção preferencial de suas ramificações.

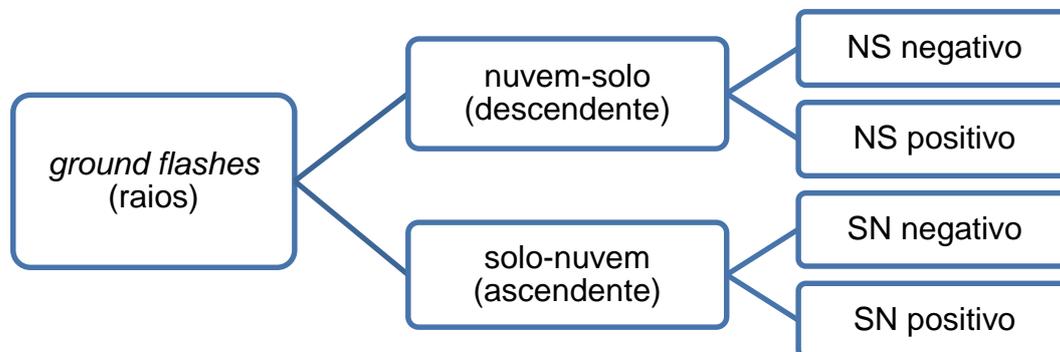


Figura 2.2 – Diagrama de classificação básica dos relâmpagos que envolvem o solo.



Figura 2.3 – Fotografias de relâmpagos nuvem-solo, ou descendentes, e de um relâmpago solo-nuvem, ou ascendente, partindo de uma torre.

Fonte: Pinto (1996) e Paiva et al. (2014).

O relâmpago “nuvem-solo” (NS), também chamado *cloud-to-ground* (CG), raio descendente ou *downward flash*, é de longe o mais frequente dentre os *ground flashes*. O relâmpago “solo-nuvem” (SN), também chamado raio ascendente, *upward flash* ou ainda *ground-to-cloud*, necessita de algum objeto alto (ao menos uns 100 m) ou de moderada altura alocado no topo de montanhas (RAKOV; UMAN, 2003, p. 4), o que o torna relativamente raro dentre os *ground flashes*.

Sobre a polaridade da descarga, é a carga líquida deixada no solo que a define. Ou seja, de algum modo os raios negativos transferem elétrons da nuvem para o solo, enquanto

que os positivos retiram elétrons do solo. Dentre os nuvem-solo em termos globais, cerca de 90% ou mais são negativos e 10% ou menos são positivos. Isto se dá principalmente pelo fato do centro de cargas negativo da nuvem de tempestade estar normalmente mais próximo do solo do que o centro positivo. Há também raios nuvem-solo e ascendentes bipolares, que contém processos que transferem cargas negativas e positivas para o solo. Esses são menos frequentes e foram menos observados. Rakov e Uman (2003), Baranski e Bodzak (2006), Schumann (2012), Saba et al. (2013) e Saraiva et al. (2014b) comentam e apresentam algumas observações dos bipolares.

Existem ainda relâmpagos chamados de “compostos” ou “híbridos”, que são *ground flashes* que se desenvolvem em seguida como *cloud flashes*, ou vice-versa. Lu et al. (2012) e Van der Velde e Montanyà (2013) apresentam análises de registros deste grupo de relâmpagos.

## **2.1. O ambiente elétrico do relâmpago**

Apesar de também ocorrer em tempestades de areia e de neve, erupções vulcânicas, etc., os relâmpagos acontecem principalmente envolvendo uma nuvem de tempestade (*thundercloud*), chamada de *cumulonimbus*. A estrutura elétrica da nuvem de tempestade foi estudada e revisada por Krehbiel (1986), MacGorman e Rust (1998), Rakov e Uman (2003, cap. 3), Williams (2003), dentre outros. Sua estrutura elétrica, no caso de uma nuvem isolada, pode ser vista basicamente como um tripolo de centros de cargas. A chamada “estrutura tripolar clássica” é comumente observada e possui um centro negativo principal, um centro positivo principal acima e outro positivo menor abaixo, como está exemplificado na Figura 2.4.  $Q_P$ ,  $Q_N$  e  $Q_{LP}$  referem-se às cargas totais do centro principal positivo, do centro principal negativo e do centro positivo menor, respectivamente.  $H_P$ ,  $H_N$  e  $H_{LP}$  referem-se às alturas dos respectivos centros em relação ao solo. Uma camada de blindagem superior negativa está indicada na fotografia.

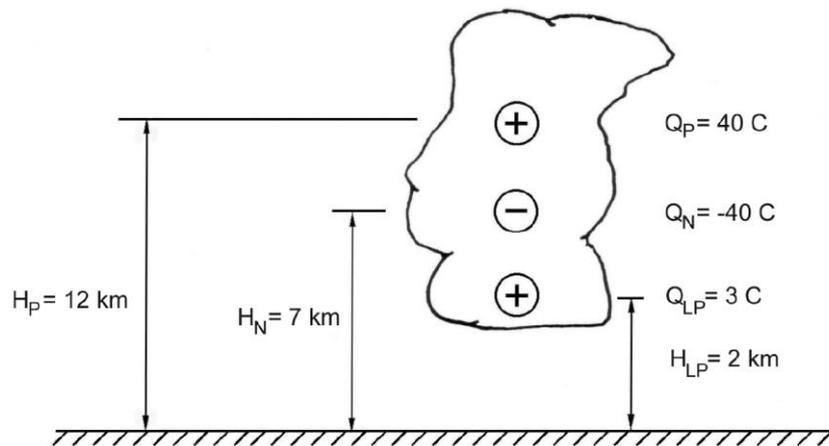


Figura 2.4 – Modelos rudimentares da distribuição de cargas em uma nuvem de tempestade isolada: acima, fotografia de uma nuvem de tempestade no Novo México (EUA) com indicação de como as cargas estariam distribuídas dentro e em sua superfície, como inferidas a partir de observações remotas e *in situ*; abaixo, exemplo de um tripolo vertical representando uma estrutura idealizada e grosseira das cargas.

Fonte: Krehbiel (1986, p. 91) e Rakov e Uman (2003, p. 69), respectivamente.

Segundo Rakov e Uman (2003, p. 74), debaixo de uma nuvem de tempestade o campo elétrico no nível do solo e em terreno relativamente plano produz um campo elétrico com magnitude de 1-10 kV/m. Esse valor atinge amplitudes ainda maiores nas regiões

dos centros de carga, frequentemente várias dezenas de kV/m. Os máximos valores já medidos estão na faixa de  $1,1-4,0 \times 10^2$  kV/m, mas em pequenos volumes da nuvem (PINTO; PINTO, 2000, p. 81; RAKOV; UMAN, 2003; WILLIAMS, 2006).

Stolzenburg e Marshall (2009) elaboraram um modelo conceitual da estrutura de cargas de uma tempestade isolada e madura a partir de 49 sondagens com balões e dados de LMA<sup>2</sup> (Figura 2.5). Perfis representativos de campo elétrico (E) e potencial eletrostático (V) no *updraft* (corrente ascensional) e fora deste (*non-updraft*) em regiões convectivas são mostrados (as altitudes mostradas não correspondem exatamente ao modelo conceitual). É possível identificar na região de *updrafts* a estrutura tripolar clássica abaixo de uma camada de blindagem negativa superior. Na região fora dos *updrafts*, a estrutura contém cinco regiões de cargas excetuando a camada de blindagem. Os autores mostram neste modelo uma ligação entre os centros de carga positiva e negativa, sugerindo que de algum modo as cargas produzidas nas regiões de *updrafts* vão sendo espalhadas para fora destas e acomodando-se em níveis diferentes. As partes posterior e anterior da bigorna (*anvil*) tipicamente contém carga positiva e são blindadas com camadas carregadas negativamente. São mostradas também representações esquemáticas de relâmpagos intranuvem (verde) e nuvem-solo negativo (roxo) baseadas em dados de mapeamento de relâmpagos.

---

<sup>2</sup> Os registros de mapeamento em três dimensões dos canais do relâmpago utilizados no referido trabalho são gerados pelos chamados *Lightning Mapping Arrays* (LMA) ou Arranjos de Mapeamento de Relâmpagos. São sistemas compostos de um arranjo de sensores que recebem impulsos de radiação na faixa de VHF produzidos pelos relâmpagos e localizam as fontes pelo método do tempo de chegada em cada sensor, sendo que todos estão sincronizados por GPS. Mais detalhes sobre esta tecnologia em Rison et al. (1999).

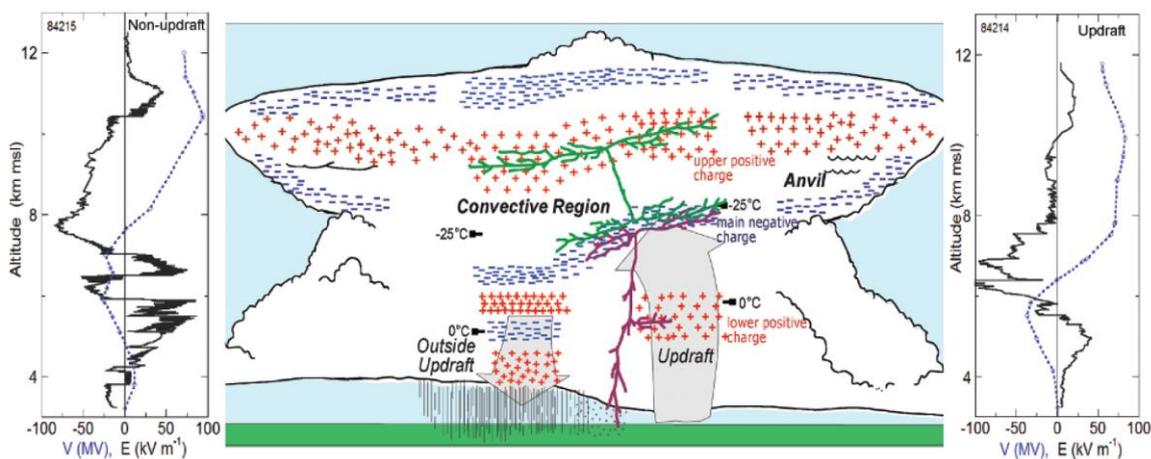


Figura 2.5 – Modelo conceitual da estrutura elétrica resultado da convecção em média latitude e no estágio maduro, acompanhado de perfis típicos de potencial e campo elétricos para as regiões fora do *updraft* (*Non-updraft*) e no *updraft*.  
Fonte: adaptado de Stolzenburg e Marshall (2009).

## 2.2. O relâmpago nuvem-solo negativo

Esta seção se volta para o relâmpago mais frequente e mais estudado dentre os quatro tipos de *ground flashes*: o relâmpago nuvem-solo (NS) negativo. São apresentados os principais processos macrofísicos envolvidos neste fenômeno, basicamente na ordem em que ocorrem. Tais processos estão associados com o movimento de cargas elétricas e, assim, foram principalmente estudados através da medição dos campos elétricos e magnéticos gerados. As observações de seus processos que ocorrem fora da nuvem foram também complementadas por medidas óticas ao longo do tempo (*e.g.*, fotografia estacionária e *streak*, vídeo padrão e rápido e espectroscopia) (RAKOV; UMAN, 2003).

### 2.2.1. Visão geral dos processos do relâmpago nuvem-solo negativo

O relâmpago NS negativo possui processos internos que ocorrem basicamente de modo concatenado (RAKOV; UMAN, 2003, p. 108-116; COORAY, 2003, cap.4). Podem ser resumidos nas seguintes etapas: (a) quebra de rigidez, (b) líder escalonado, (c) líder ascendente conectivo, (d) descarga de retorno, (e) líder contínuo e (f) descarga de retorno subsequente:

- a) Ocorre a **quebra de rigidez preliminar** dentro da nuvem de tempestade, também chamada *initial* ou *preliminary breakdown*;

- b) Uma fraca descarga luminosa (geralmente não visível a olho nu) se propaga em direção ao solo, criando um canal ionizado e condutor. Essa descarga, denominada **líder escalonado** (*stepped leader*), progride passo a passo e ramifica-se adquirindo o formato de uma raiz de árvore;
- c) Um **líder ascendente conectivo** (*upward connecting leader*) surge com a intensificação do campo elétrico entre a parte frontal do líder escalonado e o solo. Tal descarga geralmente parte de objetos pontiagudos existentes na superfície, como árvores e edifícios, e desloca-se em direção à extremidade de algum ramo do líder escalonado;
- d) Quando ocorre o encontro entre o líder escalonado e o líder ascendente conectivo (*attachment process*), dá-se início a uma descarga de intensa e abrupta corrente, luminosidade, radiação em geral e geradora do trovão. A chamada **descarga de retorno** pode ser considerada o principal processo do relâmpago em vários aspectos. Esta etapa fecha o ciclo básico de um relâmpago;
- e) Quando descarga de retorno cessou e, após um intervalo de tempo sem corrente no canal e havendo condições propícias, um **líder contínuo** (*dart leader*) pode percorrer o canal ainda ionizado de modo a torná-lo mais condutivo. Ou pode haver a formação de um **líder contínuo-escalonado**, que consiste de um líder contínuo que, nos últimos segmentos do canal até o solo encontrando grande resistência, forma novos ramos como o escalonado e aproxima-se do solo em um ponto diferente do anterior;
- f) Havendo ainda condições suficientes, uma nova descarga de retorno pode ocorrer, a chamada **descarga de retorno subsequente** (*subsequent return stroke*). Esta descarga caracteriza um relâmpago chamado “múltiplo”. Estas duas últimas etapas podem se repetir inúmeras vezes, sendo que em média ocorrem de três a cinco descargas de retorno por relâmpago nuvem-solo negativo.

A Figura 2.6 ilustra tais etapas. Neste caso, o relâmpago possui duas descargas de retorno e a corrente contínua não está representada.

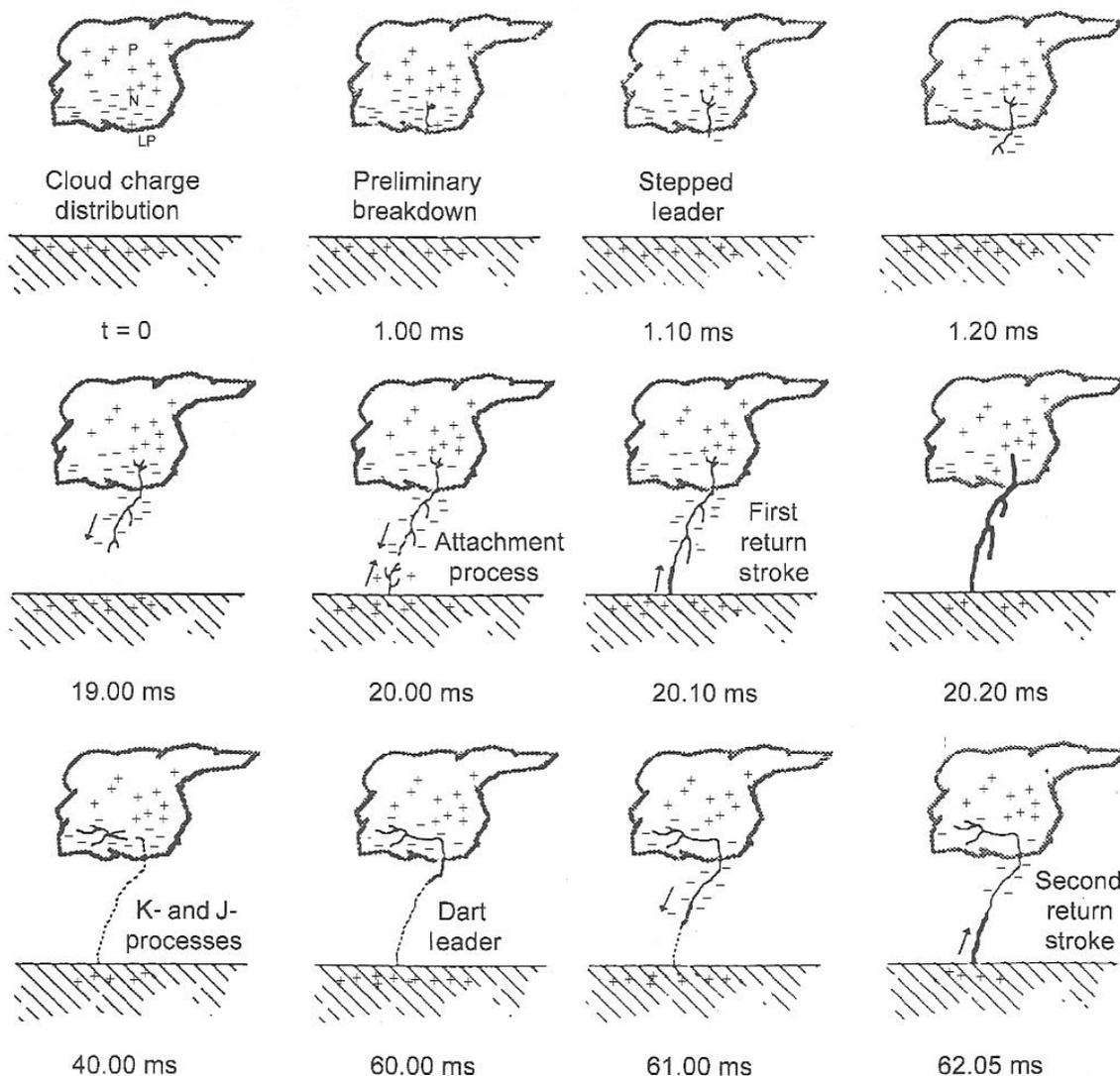


Figura 2.6 – Vários processos de um relâmpago nuvem-solo negativo com valores típicos de intervalo de tempo entre si e originado entre os centros principal negativo (N) e positivo inferior (LP).

Fonte: adaptado de Uman (1987, 2001 apud RAKOV; UMAN, 2003, p. 110).

A descarga de retorno pode ser seguida por uma corrente de baixa intensidade chamada **corrente contínua** (*continuing current, CC*). A CC é um processo que pode ser entendido como sendo “um arco quase estacionário entre a fonte de carga na nuvem e o solo”, que segue eventual e imediatamente uma descarga de retorno. “Valores típicos de

CC são dezenas ou centenas de ampères, e de duração de até centenas de milissegundos” (RAKOV; UMAN, 2003; FERRAZ, 2009).

A Figura 2.7 mostra uma fotografia tirada por uma câmera de filme corrido (*streak camera* ou *Boys camera*) de um relâmpago nuvem-solo com 12 descargas de retorno, *i.e.*, com multiplicidade igual a 12. A primeira está na esquerda e é a única com ramificações. O tempo aumenta para a direita. A décima primeira descarga apresenta uma iluminação continuada, que é evidência do processo de corrente contínua. É possível notar a intermitência da corrente dada por intervalos de tempo sem corrente (luz).

A Figura 2.8 ilustra as características luminosas típicas de um raio que seriam capturadas por uma câmara fotográfica de filme corrido e por uma câmera convencional (filme estacionário, *still photograph*). Nesta ilustração, é possível ter uma perspectiva temporal das principais etapas (ou processos) do relâmpago. Os acrônimos significam: SL (*stepped leader*, líder escalonado), RS (*return stroke*, descarga de retorno) e DL (*dart leader*, líder contínuo). A corrente contínua está indicada pela área cinza após a última descarga de retorno. A Figura 2.9 mostra os mesmos processos relacionando-os com a corrente na base do canal junto ao solo.

Valores típicos dos principais processos e uma revisão estatística dos parâmetros do relâmpago nuvem-solo negativo (*e.g.* multiplicidade e intervalo entre descargas de retorno, duração da corrente contínua e total do relâmpago) são apresentados no APÊNDICE A.

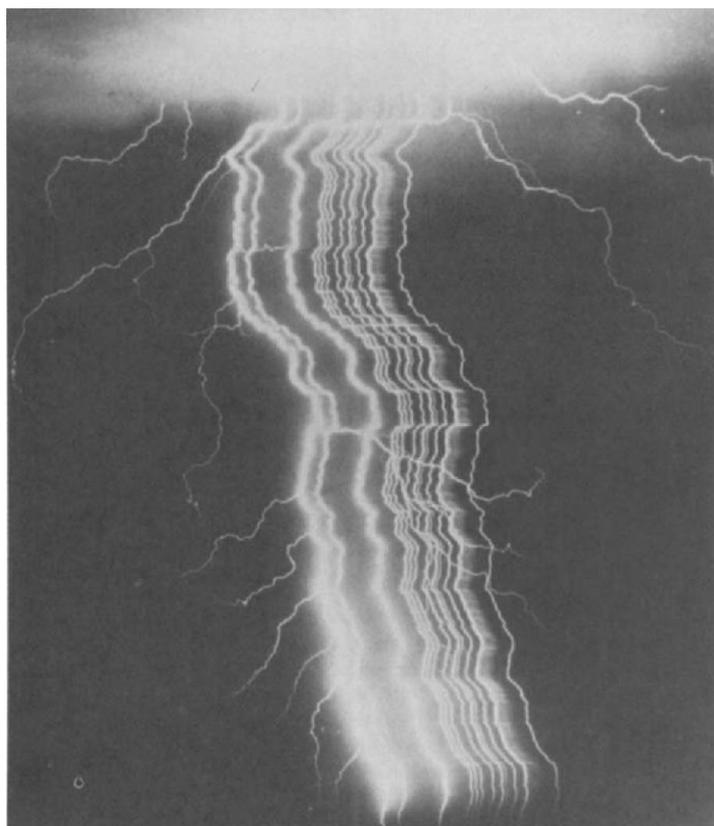


Figura 2.7 – Fotografia de relâmpago nuvem-solo negativo de 12 descargas de retorno. Foto tirada próxima à Socorro, NM, EUA.  
 Fonte: UMAN (1987, p. 15).

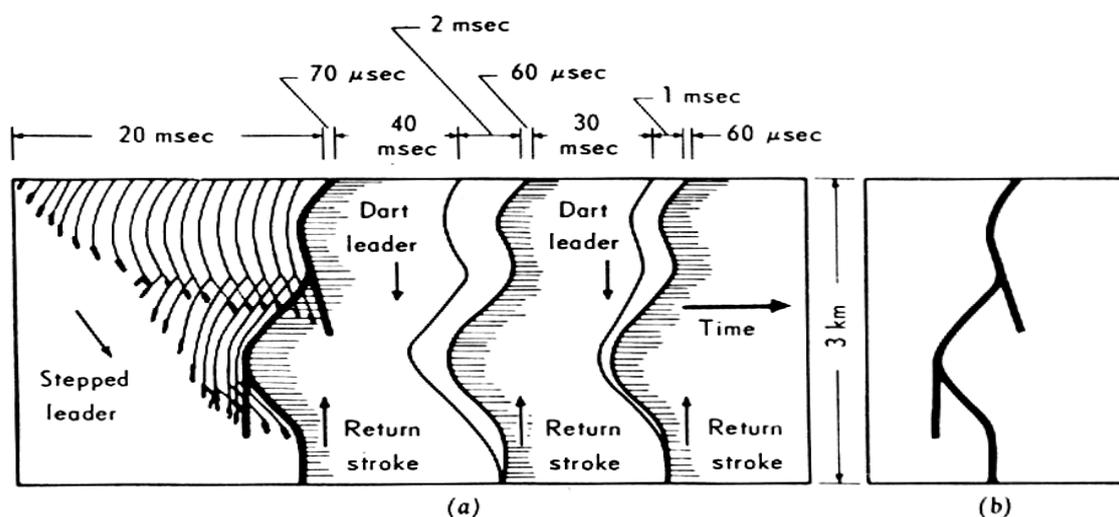


Figura 2.8 – Ilustração (a) das características luminosas típicas de um raio nuvem-solo que seriam capturadas por uma câmara fotográfica de filme corrido e durações típicas dos processos. A escala temporal foi distorcida para facilitar a visualização. Em (b) está o mesmo raio que seria registrado por uma câmara de filme estacionário (câmera fotográfica convencional).  
 Fonte: Uman (1987, p. 14).

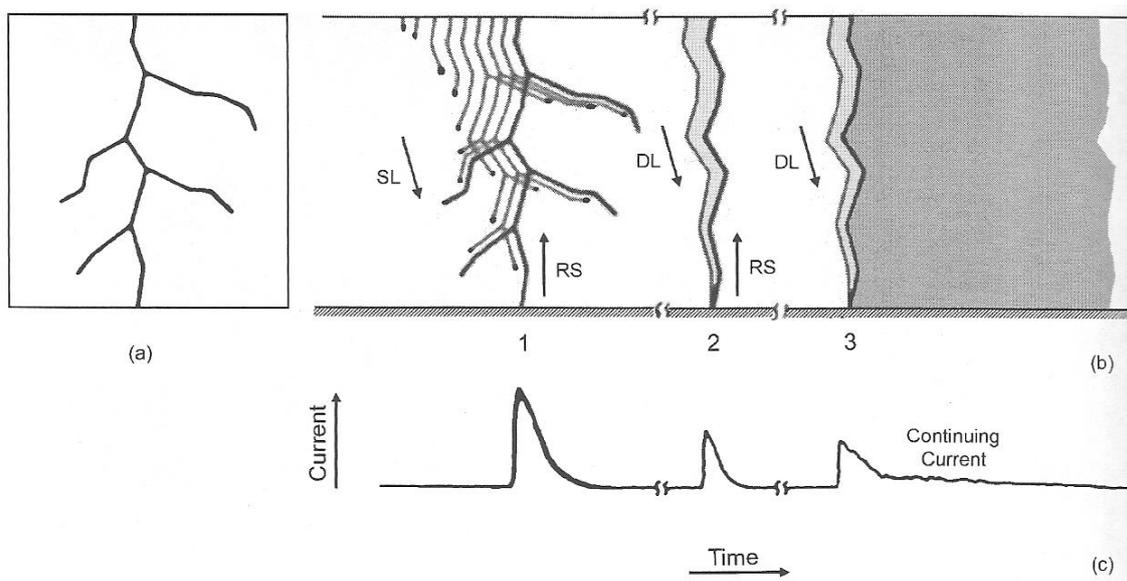


Figura 2.9 – Diagrama mostrando a luminosidade de um raio nuvem-solo com três descargas de retorno e a corrente correspondente na base do canal: (a) imagem estática de uma fotografia convencional, (b) imagem de filme corrido (*streak camera*) e (c) corrente na base do canal.

Fonte: adaptado de Rakov e Uman (2003, p. 110).

### 2.2.2. Processos físicos envolvidos no relâmpago nuvem-solo negativo

São descritos nesta seção em mais detalhes os processos físicos envolvidos no relâmpago nuvem-solo (NS), que são basicamente os mesmos tanto do NS negativo quanto do NS positivo. Os processos são também referidos como etapas ou componentes do relâmpago. O NS negativo por ser muito mais frequente em geral (~90%) do que o positivo (~10%) foi muito mais observado e estudado e, por isso, esta seção apresenta a literatura relacionada ao primeiro. Bazelyan e Raizer (2000), Pinto e Pinto (2000), Cooray (2003) e Rakov e Uman (2003) revisam em detalhes tais processos físicos. Para a correta leitura dos registros de campo elétrico utilizados nesta seção, o vetor campo elétrico é positivo quando apontado para baixo, conforme a convenção de sinal da eletricidade atmosférica<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> A referência para esta convenção é o vetor campo elétrico próximo ao solo na condição chamada “tempo bom” (*fair-weather*), sem nuvens, que aponta para baixo, possui magnitude de aprox. 100 V/m e sinal positivo. Outra usual convenção, chamada “física”, possui sentido oposto, apontando do centro da Terra para fora (RAKOV; UMAN, 2003, p. 8).

### 2.2.2.1. Iniciação do relâmpago na nuvem de tempestade

Segundo Cooray (2003, p. 133),

Os relâmpagos se iniciam na região de fase mista<sup>4</sup> da nuvem. Desvendar os processos físicos nos quais estas diversas fases da água interagem com os campos elétricos para iniciar o relâmpago é um dos principais desafios na Eletricidade Atmosférica.

Os processos microfísicos da iniciação do relâmpago ainda não foram observados ou medidos e são desconhecidos de maneira geral, havendo somente algumas teorias e hipóteses. Bazelyan e Raizer (2000, p. 158-159), Cooray (2003, p. 133-140) e Rakov e Uman (2003, p. 82-84, 121-122) discutem os principais processos entendidos como responsáveis da iniciação do relâmpago.

Conforme Rakov e Uman (2003, p. 121), “parece que os valores máximos de campo elétrico de larga escala gerados na nuvem de tempestade são de magnitude insuficientes para explicar a iniciação do relâmpago” ( $\sim 1-4 \times 10^5$  V/m em comparação a  $\sim 1 \times 10^6$  V/m referente à quebra de rigidez dielétrica do ar na altura da nuvem, de acordo com Pinto e Pinto, 2000, p. 81-82). “Campo em larga escala” refere-se à limitação de medição através das sondas nas nuvens, incapazes que medir volumes pequenos ( $\lesssim 1$  m<sup>3</sup>), que poderiam conter campos de maior magnitude mais pontualmente.

Sejam quais forem os processos envolvidos na iniciação do relâmpago, é possível que o início de sua formação envolva algum hidrometeoro e seja bidirecional, ou seja, *streamers* positivos surgindo em uma direção e *streamers* negativos na direção oposta. Os *streamers* positivos se desenvolveriam antes dos negativos por exigir um menor campo ambiente para sua propagação (RAKOV; UMAN, 2003, p. 121). Tais *streamers* positivos e negativos evoluiriam para líderes caso houvesse condições propícias de mínimo campo ou, caso contrário, seriam abortados. Mais recentemente, Krehbiel e Wang (2011), através do mapeamento das fontes de radiação eletromagnética de relâmpagos na nuvem, relataram eventos (fontes) isolados e repetitivos começando vários segundos antes e no mesmo local que relâmpagos intranuvens. Tal evidência

---

<sup>4</sup> A condição de fase mista se dá quando há água nas três fases: vapor, líquida e sólida (WILLIAMS, 2003, p. 2).

sugere a ocorrência de *streamers*/líderes abortados ou tentativas sem sucesso de se iniciar um relâmpago.

#### **2.2.2.2. Quebra de rigidez preliminar**

Cooray (2003, p. 140-144) e Rakov e Uman (2003, p. 116-122) revisam o processo da quebra de rigidez preliminar (QRP). Também referida como *preliminary breakdown* (PB) ou *initial breakdown* (IB), é “o processo interno à nuvem que inicia ou leva à iniciação do líder escalonado em direção ao solo”. Estudos recentes (baseados no mapeamento do canal em VHF-UHF) apontam que este processo pode ser visto como uma sequência de canais se estendendo em direções aparentemente aleatórias da fonte de carga na nuvem. Uma destas ramificações daria origem ao líder escalonado (RAKOV; UMAN, 2003, p. 116). As Figuras 2.10 e 2.11 mostram assinaturas típicas em campo elétrico deste processo (PB significa quebra de rigidez preliminar; SL, *stepped leader* ou líder escalonado; e RS, *return stroke* ou descarga de retorno).

Os pulsos deste processo são usualmente bipolares, sendo a polaridade inicial a mesma da descarga de retorno seguinte. A amplitude da QRP pode ser comparável à da DR; entretanto, em alguns registros, os pulsos de QRP podem não ser detectados ou mesmo ter amplitude insignificante comparada a da DR (RAKOV; UMAN, 2003, p. 119). Segundo Cooray (2003, p. 142), “a duração total da quebra de rigidez preliminar pode ser definida como o intervalo de tempo entre a primeira variação de campo estática detectável e a descarga de retorno”. Apesar da dificuldade de se identificar a primeira variação e decorrentes incertezas nas medições, medidas de diferentes autores indicam durações entre várias dezenas e várias centenas de milissegundos (COORAY, 2003, p. 142).

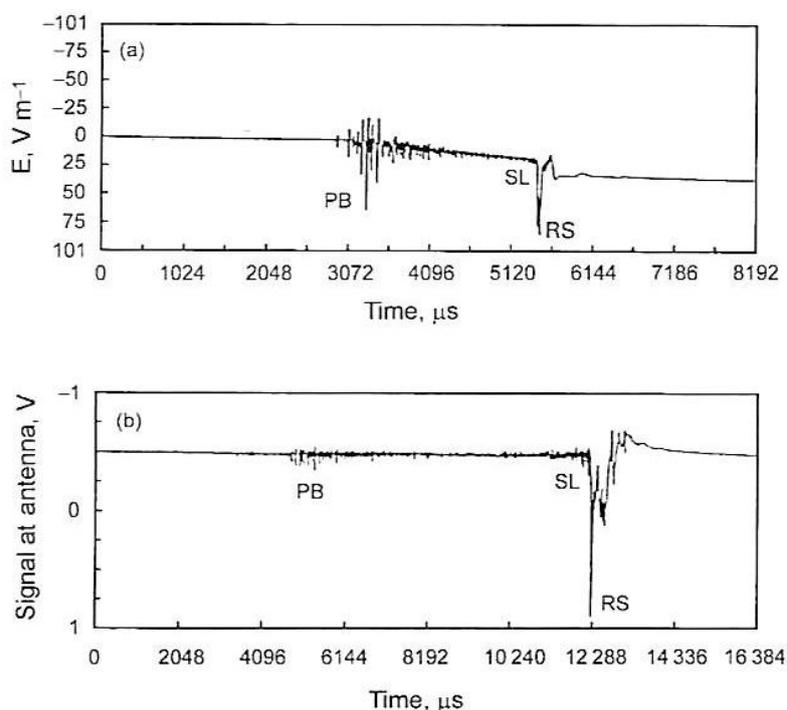


Figura 2.10 – Exemplos de campos elétricos devidos à primeira DR de relâmpagos NS negativos: (a) relâmpago de inverno a 25 km e (b) relâmpago de verão a uma distância desconhecida.

Fonte: adaptado de Rakov e Uman (2003, p.119).

Três exemplos típicos de pulsos de QRP, como aparecem em registros de campo elétrico obtidos a 50-100 km do relâmpago, são mostrados na Figura 2.11. Rakov e Uman (2003, p. 120) comentam que os pulsos individuais são caracterizados por uma duração total de 20-40  $\mu\text{s}$ , o número médio de pulsos por trem é em torno de 10 e o tempo de subida é tipicamente 10  $\mu\text{s}$ .

Campos et al. (2006) analisaram registros de campo elétrico e câmera rápida de 75 descargas de retorno que utilizaram um mesmo canal, ainda ionizado, e não observaram nenhuma assinatura de quebra de rigidez preliminar (QRP). Os autores encontraram também uma relação inversa aproximadamente linear entre a duração da quebra da rigidez e a amplitude do pico de campo elétrico de 29 descargas de retorno que ocorrem em seguida. Para os 16 casos de descargas de retorno subsequentes que formaram novas terminações no solo (onde parte do canal era comum à descarga anterior e parte foi formada em ar virgem), foram observadas assinaturas de QRP no campo elétrico, mas sem uma relação de proporcionalidade com o pico da descarga de retorno.

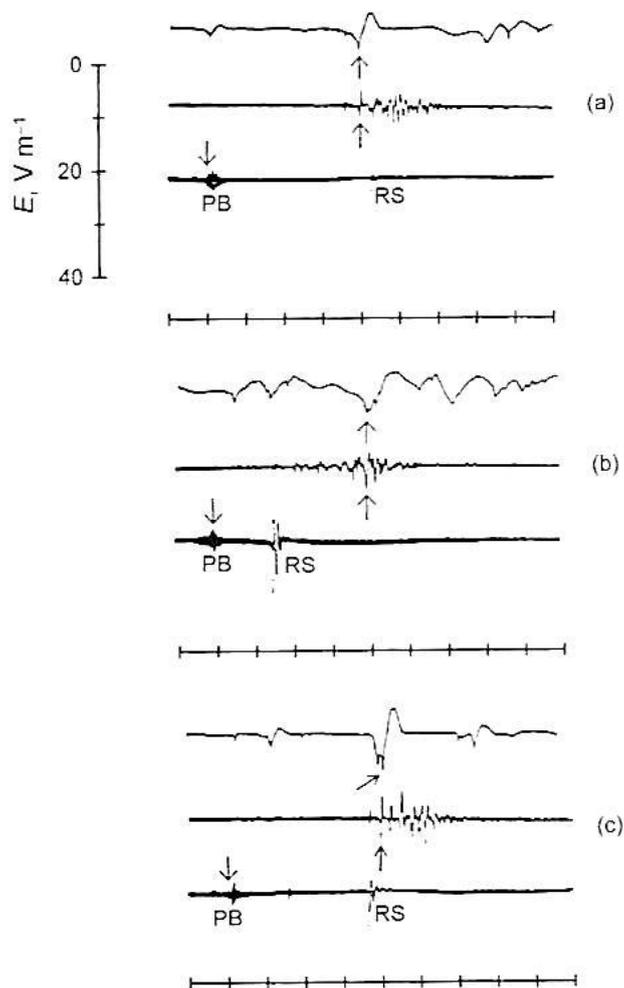


Figura 2.11 – Registros de campo elétrico irradiado por três relâmpagos NS a distâncias de 50-100 km. As setas indicam o mesmo evento em escalas de tempo diferentes: 2 ms (traço inferior), 0,4 ms (traço intermediário) e 40  $\mu$ s (traço superior), por divisão.

Fonte: adaptado de Weidman e Krider (1979 apud RAKOV; UMAN, 2003, p. 120).

### 2.2.2.3. Líder escalonado

Bazelyan e Raizer (2000, p. 94-98, 197-202), Cooray (2003, p. 144-159), Rakov e Uman (2003, p. 122-143) revisam mais extensamente este processo. O líder escalonado (LE), ou *stepped leader*, pode ser entendido como uma natural continuação de algum ramo criado na quebra de rigidez preliminar. No caso do relâmpago NS, o líder escalonado move-se em direção ao solo (UMAN, 1987, p. 10; RAKOV; UMAN, 2003, p. 116). O líder escalonado se ramifica e propaga em passos de cerca de 50 m

intercalados por pausas de  $\sim 20\text{-}50\ \mu\text{s}$  (RAKOV; UMAN, 2003, p. 7). O líder escalonado necessariamente precede a primeira descarga de retorno.

A Figura 2.12 mostra uma fotografia de filme corrido de um líder escalonado seguido pela descarga de retorno. A fotografia corresponde a uma altura de 360 metros, o solo se situa em sua margem inferior e o tempo avança da esquerda para a direita, perfazendo um total de aprox. 2 ms. Uma faixa de 1 ms da fotografia sobre o líder escalonado (esq.) teve sua luminosidade amplificada no processo de reprodução. Comparada à luminosidade da descarga de retorno (dir.), o líder é muito menos luminoso, o que é possível notar numa faixa intermediária praticamente escura. A Figura 2.13 mostra quadros de uma câmera rápida para um registro semelhante.

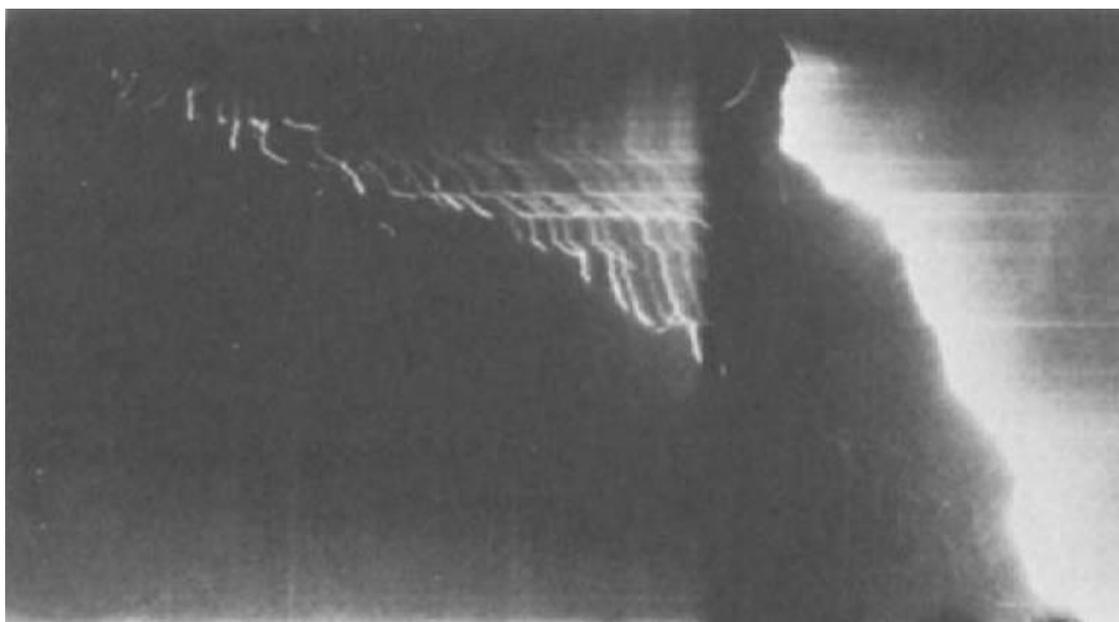


Figura 2.12 – Fotografia do tipo *streak* de um relâmpago nuvem-solo negativo.

Fonte: adaptado de Berger e Vogelsanger (1966) apud Uman (1987, p. 16).

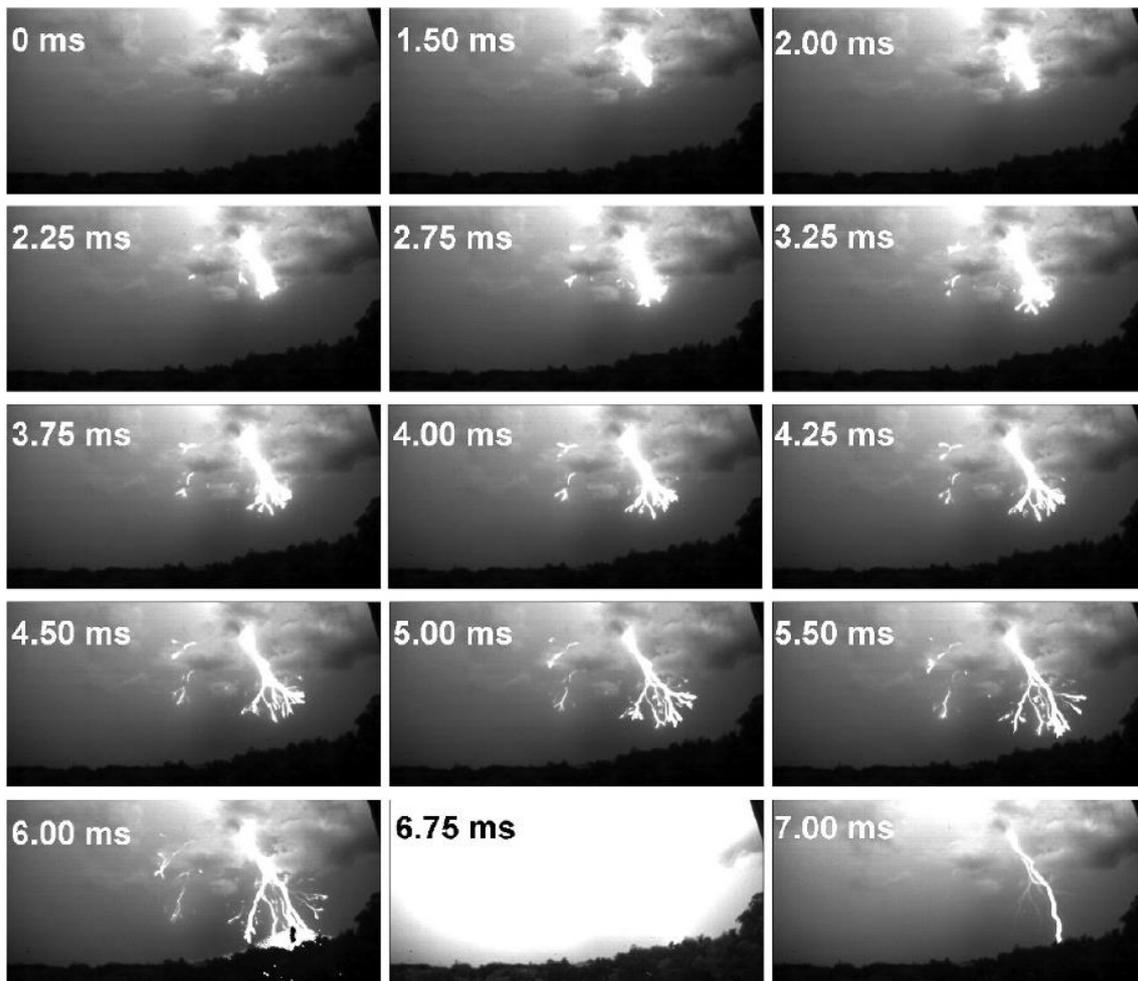


Figura 2.13 – Imagens sequenciais obtidas a 4.000 qps<sup>5</sup> mostrando a propagação do líder escalonado até o solo e seguido pela descarga de retorno (6,75 ms).  
 Fonte: Pinto et al. (2009).

A Figura 2.10 mostrou duas discretas assinaturas do líder escalonado, onde se pode notar o componente estático em um formato de rampa em (a) (devido à quantidade considerável de carga sendo aproximada do solo) e o componente de radiação em um trem de pulsos (devido aos passos do líder e suas inerentes variações de corrente). Os pulsos do líder escalonado de NS negativos são distintos daqueles de QRP (RAKOV; UMAN, 2003, p. 120): (a) estes são bipolares e de fina estrutura, enquanto aqueles são essencialmente unipolares e de formato suavizado; (b) os pulsos destes possuem uma duração total de 20-40  $\mu$ s e daqueles de 1-2  $\mu$ s; e (c) o intervalo entre pulsos destes é de 70-130  $\mu$ s e daqueles de 15-25  $\mu$ s.

---

<sup>5</sup> qps: quadros por segundo.

Bazelyan e Raizer (2000, p. 97), Cooray (2003, p. 146) e Rakov e Uman (2003, p. 123) relatam valores médios da velocidade média (do percurso exposto do líder) de propagação de líderes escalonados entre  $10^5$ - $10^6$  m/s. Além da variação de velocidade do ramo à dianteira inerente ao passo, este ocorre frequentemente variação conforme a altura. Recentemente, Campos et al. (2014) recolhendo estatísticas de diferentes trabalhos e também próprias (medidas de câmeras digitais de alta velocidade), relatam valores médios de velocidade do líder escalonado projetada em duas dimensões da ordem de  $10^5$  m/s. A média geométrica das velocidades médias de 62 líderes escalonados observados é de  $2,7 \times 10^5$  m/s.

Como será visto no processo da descarga de retorno, a carga trazida pelo líder (escalonado) será basicamente transferida para o solo e pode ser estimada aproximadamente integrando-se a corrente impulsiva da descarga de retorno. Assim, estimativas da carga total do líder escalonado mostraram variação de unidades a dezenas de coulombs e valor médio em torno de 5 C (COORAY, 2003, p. 150; cf. RAKOV; UMAN, 2003, p. 7).

Quanto à densidade linear de carga dos líderes escalonados (negativos), Thomson et al. (1985) estimaram através de medidas valores entre 0,7 e 32 mC/m, com média geométrica de 3,4 mC/m. Rakov e Uman (2003, p. 124-125, 327, 330-331), reunindo medidas de diversos trabalhos, apresentam valores médios da ordem de  $10^{-3}$  C/m ( $\sim 1$  C/km) para líderes de *cloud* e *ground flashes*. Cooray (2003, p. 149) ressalta que tais valores medidos através de campos eletrostáticos representam um valor efetivo de todos os diversos ramos do líder, não significando uma densidade linear média de cada ramo ou canal.

Conforme Cooray (2003, p. 151-2) e Rakov e Uman (2003, p. 125-6), a corrente associada ao líder escalonado possui duas componentes: (i) uma corrente média somada a (ii) impulsos de corrente devido à formação dos passos. A componente (i) pode ser estimada através de uma abordagem eletrostática quase estacionária, dividindo a carga total do líder ( $\sim 20$  C sendo um valor típico) pela duração do líder ( $\sim 20$  ms sendo um valor típico). Através desta simplificação, esperam-se valores médios desta corrente

média no tronco principal do líder escalonado da ordem de  $10^3$  A, valor que se encontra dentro daqueles observados (0,05-5 kA) e bastante próximo do valor médio relatado por Thomson et al. (1985) de 1,3 kA (e com média geométrica de 1,0 kA para 62 casos). De acordo com Cooray (2003, p. 152), os picos da componente (ii) podem ser grosseiramente estimados pelas amplitudes dos pulsos eletromagnéticos usando o modelo de linha de transmissão. Krider et al. (1977 apud COORAY, 2003, p. 152) encontraram valores de pico na faixa de 2-8 kA e da carga transportada na formação do passo na faixa de  $1-4 \times 10^{-3}$  C/m.

#### **2.2.2.4. Descarga de retorno**

Bazelyan e Raizer (2000, p. 115-129; 171-195), Cooray (2003, p. 159-186; 191-2) e Rakov e Uman (2003, p. 137-164) revisam extensamente este processo. Segundo Cooray (2003, p. 159), quando o sistema de *streamers* (zona de *streamers*) do líder escalonado encontra o solo ou os *streamers* do líder conectivo, que surge de algum objeto no solo ao encontro do líder, dá-se o processo de conexão (*attachment process*) entre os dois e inicia-se o da descarga de retorno (*return stroke*). Bazelyan e Raizer (2000, p. 169-70) comentam que o líder descendente não se conecta diretamente ao solo ou a algum objeto, mas sempre através de um líder conectivo. Estes autores a chamam de *counterleader*, mas ainda podem ser encontradas outras referências na literatura ao líder ascendente conectivo como *connecting leader* e *connecting discharge*. Segundo Bazelyan e Raizer (2000, p. 171), o *gap* entre a nuvem e o solo é fechado pelo líder descendente. O líder, trazendo o alto potencial da nuvem, adquire o potencial zero (considerando a capacitância da terra infinita) trazido pelo líder conectivo. Disso decorre uma dramática redistribuição de carga ao longo de todo o comprimento do canal.

Segundo Rakov e Uman (2003, p. 143), a descarga de retorno (DR) foi o processo do relâmpago mais estudado até então devido a duas razões práticas: por ser considerado o processo mais danoso entre todos do relâmpago, e por ser aquele de mais fácil observação e medição. A DR é o processo visivelmente mais brilhante fora da nuvem, e produz a assinatura eletromagnética mais fácil de ser identificada.

As descargas de retorno subsequentes são as descargas de retorno que eventualmente ocorrem após a primeira DR. Estas são precedidas pelos líderes subsequentes, revisados na seção 2.2.2.5. A primeira descarga de retorno pode ser chamada de ordem 1, a segunda DR de ordem 2, e assim por diante. Estão separadas entre si por intervalos de tempo chamados intervalo de tempo entre descargas de retorno, ou simplesmente intervalo entre descargas de retorno (*interstroke interval* ou *interstroke time interval*). Assim, o primeiro intervalo entre DRs envolve está entre a DR de ordem um e a de ordem dois.

Segundo Rakov e Uman (2003, p. 143-4), a caracterização mais completa da descarga de retorno de relâmpagos nuvem-solo negativos (especialmente em termos de sua forma de onda de corrente) foi feita por K. Berger e coautores<sup>6</sup> através de oscilogramas de corrente diretamente medida com resistores *shunt* em duas torres no Monte San Salvatore, Lugano, Suíça. Tais resultados “são ainda hoje amplamente usados como referência primária na proteção contra raios e na pesquisa sobre relâmpagos”.

A Figura 2.14 mostra curvas médias de tais oscilogramas de corrente das descargas de retorno de relâmpagos nuvem-solo negativos. O valor típico da corrente de pico das primeiras descargas de retorno é cerca de 30 kA, e das subsequentes cerca de 12 kA. A carga impulsiva típica é cerca de 4,5 e 0,95 C, respectivamente. É possível notar a maior duração das primeiras DRs em comparação com as subsequentes. Considerando a duração da corrente até a metade do pico, o valor médio para as primeiras é cerca de 120  $\mu$ s e para as subsequentes cerca de 40  $\mu$ s. Chowdhuri et al. (2005) revisaram os parâmetros das descargas de retorno.

---

<sup>6</sup> Cf. Berger et al. (1975).

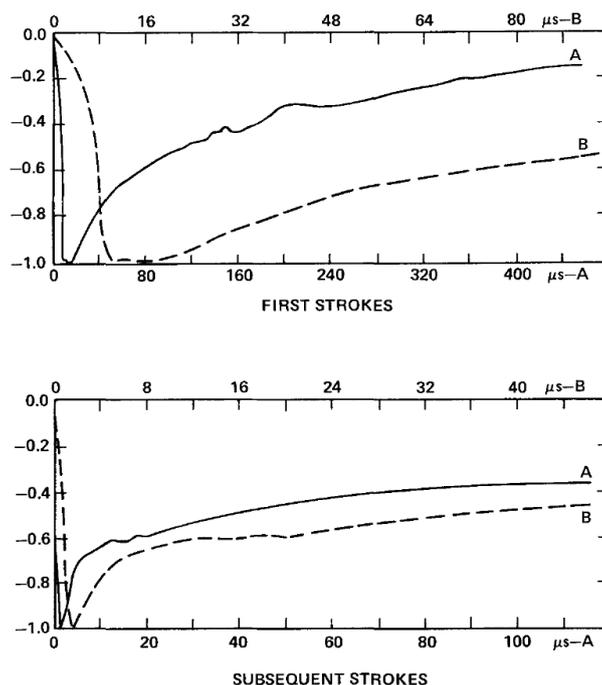


Figura 2.14 – Curvas médias das primeiras descargas de retorno (*acima*) e das descargas subsequentes (*abaixo*), normalizadas pelo valor de pico, de relâmpagos nuvem-solo negativos. As curvas estão feitas em duas escalas de tempo, A e B.  
 Fonte: adaptado de Berger et al. (1975) apud Uman (1987, p. 122).

A Figura 2.15 mostra registros de campo elétrico e magnético para descargas de retorno (DRs) em diversas distâncias de observação, mostrando a variação da predominância de cada uma das componentes (estática, indutiva e radiativa<sup>7</sup>). É possível notar a diminuição de predomínio do termo estático no campo elétrico com o aumento da distância, que pode ser identificado como uma rampa nos registros. Pode-se notar também a crescente expressividade do termo de radiação na assinatura em ambos os campos com o aumento da distância, que pode ser identificado pelo instante que cruza o zero. No campo magnético, pelo fato de não existir o termo estático, é mais fácil observar a troca de predomínio entre os termos indutivo e de radiação com a variação da distância. Para distâncias maiores do que algumas dezenas de quilômetros, como o termo de radiação é muito predominante, os campos elétrico e magnético possuem assinaturas com formatos muito semelhantes. Em outras palavras, os campos magnético

<sup>7</sup> Os campos eletromagnéticos podem ser decompostos em três componentes: (i) estático, relativo à presença de carga (somente a parte elétrica); (ii) indutivo, relativo à carga com uma determinada velocidade ou corrente (pode ser chamado de magnetostático); e (iii) de radiação, relativo à carga com uma determinada aceleração ou corrente variante no tempo (RAKOV; UMAN, 2003, p. 159-61).

e elétrico distantes têm essencialmente formas de onda idênticas e são usualmente bipolares (RAKOV; UMAN, 2003, p. 152).

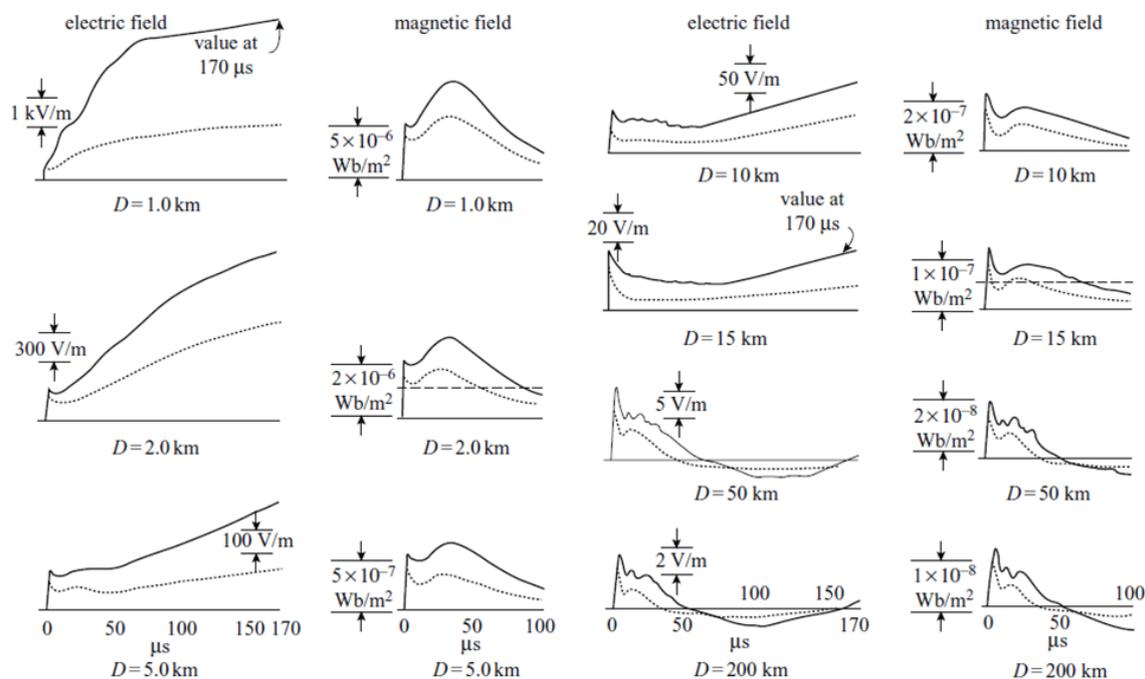


Figura 2.15 – Formas de onda típicas de intensidade de campo elétrico vertical e densidade de fluxo magnético horizontal para primeiras descargas de retorno (linha contínua) e descargas subsequentes (linha tracejada) para distâncias de 1, 2, 5, 10, 15, 50 e 200 km.

Fonte: adaptado de Lin et al. (1979) apud Cooray (2003, p. 171).

Pode-se notar nos registros da Figura 2.15 para as distâncias de 50 e 200 km, onde o termo de radiação domina que, após o pico inicial, existe uma estrutura fina composta de outros picos menores do que o inicial. Weidman e Krider (1978 apud RAKOV; UMAN, 2003, p. 158) comentam sobre a origem de tal estrutura: atribui-se a maior parte desta estrutura aos ramos do líder pelo fato desta aparecer mais nas primeiras DRs do que nas subsequentes; quanto aos pequenos picos secundários que ocorrem em até dois  $\mu\text{s}$  após o pico inicial, atribui-se à reflexão da corrente no solo, devido à diferença das impedâncias do canal e do solo; e também é devida à tortuosidade do canal, que consequentemente aumenta o conteúdo de frequências acima de cerca de 100 kHz.

Rakov e Uman (2003) apresentam valores estimados para algumas características do canal antes, durante e depois da descarga de retorno, que são mostrados na Tabela 2.1.

Segundo Cooray (2003, p. 163-5), a temperatura do canal durante a descarga de retorno (DR) foi estimada por Orville (1968) e pode ser observada na Figura 2.16. Cooray (2003, p. 165) comenta também que a temperatura do canal varia radialmente, tendo o valor máximo no centro do canal e decaindo até região de *streamers* ao redor (capa de cargas), que possui temperatura ambiente. “Assim, é mais razoável discutir o raio do canal do relâmpago acima de certa temperatura”, que corresponderia ao núcleo de alta temperatura do canal.

Tabela 2.1 – Características estimadas do canal do relâmpago antes, durante e depois da descarga de retorno.

Característica do canal	Canal pré-líder-contínuo (adiante da frente do líder contínuo)	Canal pré-descarga-de-retorno (atrás da frente do líder contínuo e à frente da descarga de retorno)	Canal da descarga de retorno (atrás da frente da descarga de retorno)
Temperatura (K)	~3.000	$\geq 20.000$	$\geq 30.000$
Condutividade (S/m)	~0,02	$\sim 10^4$	$\sim 10^4$
Raio (cm)	~3	~0,3	~3
Resistência por comprimento ( $\Omega/m$ )	~18.000	~3,5	~0,035

Fonte: adaptado de Rakov (1998) apud Rakov e Uman (2003, p. 164).

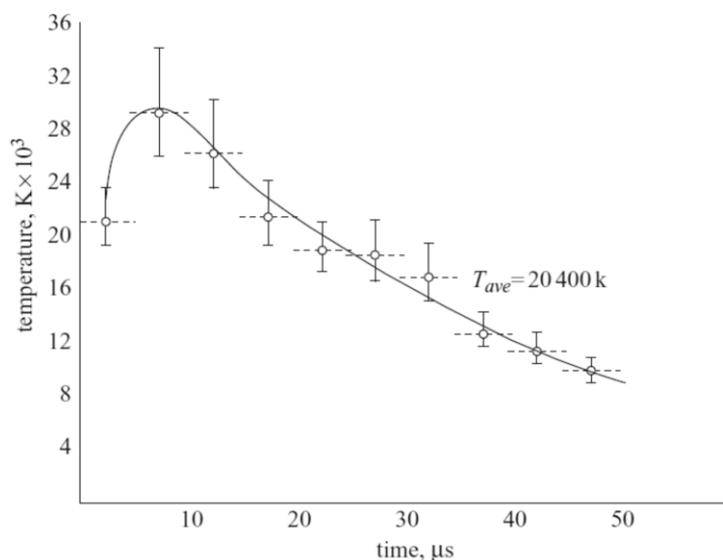


Figura 2.16 – Temperatura da descarga de retorno em função do tempo obtida através da análise das emissões espectrais do nitrogênio uma vez ionizado (NII). As linhas tracejadas mostram o intervalo de tempo sobre o qual foi calculada a média dos dados.

Fonte: adaptado de Orville (1968) apud Cooray (2003, p. 164).

Existe a possibilidade de um líder, na fase final de propagação em direção ao solo, ter mais de uma de suas pontas encontrando líderes conectivos, originando duas ou mais conexões simultâneas no solo. Este é o caso de uma descarga de retorno bifurcada (*forked stroke*). Evidências de descargas de retorno bifurcadas foram publicadas por diferentes autores, *e.g.* Schonland et al. (1935), Guo e Krider (1982), Rakov e Uman (1994), Willett et al. (1995), Wang et al. (2000), Qie et al. (2005), Ballarotti et al. (2005, 2007) e Qie e Kong (2007).

#### **2.2.2.5. Líderes subsequentes**

Bazelyan e Raizer (2000, p. 98-100, 207-221), Cooray (2003, p. 193-201) e Rakov e Uman (2003, p. 164-173) revisam extensamente estes processos. Após a propagação do líder escalonado até o solo, ocorre imediatamente a descarga de retorno (DR). Nos relâmpagos nuvem-solo negativos, é muito comum que ocorram múltiplas DRs espaçadas por intervalos sem corrente e luminosidade no canal até o solo. Antes de cada uma das descargas de retorno subsequentes, é necessário que algum líder chamado subsequente percorra o trajeto imediatamente antes (RAKOV; UMAN, 2003, p. 164).

O primeiro tipo de líder subsequente é o líder contínuo (LC), ou *dart leader*, que recondiciona o canal utilizado pela DR anterior de modo a aumentar suficientemente seu nível de ionização e condutividade para a DR seguinte. A Figura 2.8 e a Figura 2.9 ilustram em seus diagramas como líderes contínuos seriam registrados em *streak cameras*. A Figura 2.17 mostra uma fotografia de *streak camera* de um líder contínuo. O traço luminoso inclinado e à esquerda é o líder contínuo, e a região clara à direita é a descarga de retorno. O tempo aumenta para a direita e a duração total desta imagem é de aprox. 100  $\mu$ s. As alturas visíveis do canal estão indicadas, sendo 0 m a extremidade inferior do canal, próxima do solo. Em geral, estes são menos ramificados do que o líder escalonado inicial, pelo fato de já estar estabelecido um caminho condutor.

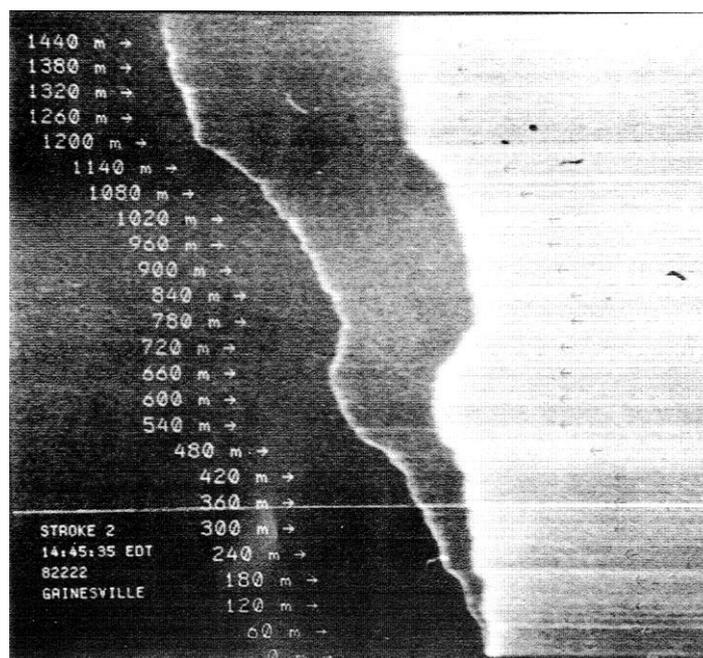


Figura 2.17 – Fotografia de *streak camera* da segunda descarga de retorno de um relâmpago nuvem-solo que ocorreu em Gainesville, Florida, EUA em 10 de agosto de 1982.

Fonte: Jordan et al. (1997).

Pode ocorrer também que um líder contínuo encontre resistência em um dado trecho do canal utilizado pela descarga de retorno anterior e, a partir dali até o solo, crie uma nova terminação (novo canal). Este é o chamado líder contínuo-escalonado (*dart-stepped leader*). Este tipo de líder ocorre em todo o relâmpago com mais de um ponto de contato ou terminação no solo, chamado de “relâmpago bifurcado” (*forked lightning* ou *forked flash*). Um líder contínuo-escalonado pode ainda em sua fase escalonada encontrar e usar um canal já utilizado por uma descarga de retorno anterior. Neste caso, o líder pode ser chamado de líder escalonado-contínuo (*stepped-to-dart leaders*), que parecem ser raros nos registros óticos, como afirmam Stolzenburg et al. (2013) analisando casos como este em três relâmpagos nuvem-solo negativos.

Ferro (2008) e Ferro et al. (2012) revisam o assunto da formação de novas terminações (canais) no solo em relâmpagos nuvem-solo através de líderes contínuo-escalonados. Ele apresenta diversas tendências encontradas na literatura e em seus dados para a ocorrência deste tipo, como por exemplo: a probabilidade da formação de novas terminações é menor conforme aumenta a ordem da DR e conforme aumenta o número

de DRs ou pela presença de CC em uma mesma terminação (dando a ideia de consolidação do canal); aumenta a probabilidade após longos intervalos entre DRs. Ferro (2008, p. 230), em suas conclusões, afirma que o fator predominante na criação de um novo canal é o número de utilizações do canal anterior, e destaca os principais processos relacionados: interrupção precoce do canal anterior (no caso de uma única utilização do canal anterior, 84% das vezes); e um intervalo de tempo mais longo da descarga anterior (no caso de duas ou mais utilizações do canal anterior).

Rakov e Uman (2003, p. 165-168) e Cooray (2003, p. 193-195), comentando várias medições já publicadas, apresentam valores médios da velocidade em duas dimensões do líder contínuo da ordem de  $10^7$  m/s. Campos et al. (2014) comentando estatísticas de diferentes autores em sua revisão, relatam também seus valores medidos das velocidades médias de cada líder contínuo observado. A média geométrica das velocidades em duas dimensões de 76 casos é de  $2,8 \times 10^6$  m/s. É uma ordem de grandeza menor do que  $10^7$  m/s e estes autores argumentam que a limitada resolução temporal de seus registros (4.000 e 8.000 quadros/s) poderia ter induzido a distribuição para valores menores. Todos estes autores comentam também sobre as eventuais variações da velocidade com a altura.

Diferentes estudos, *e.g.*, Jordan et al. (1992 apud RAKOV; UMAN, 2003, p. 167) e Campos et al. (2014), encontram uma tendência entre a velocidade de líderes contínuos e o intervalo de tempo precedente até a descarga de retorno anterior. Campos et al. (2014) relatam para um conjunto de 76 líderes contínuos (e eventuais escalonado-contínuos) de relâmpagos naturais que, após intervalos de tempo maiores do que 150 ms, sua velocidade possui um limite superior de  $\sim 5 \times 10^6$  m/s. Rakov e Uman (2003, p. 167) e Campos et al. (2014) comentam sobre a forte preponderância da variável tempo (“idade” do canal) nos parâmetros do canal, onde se dariam o esfriamento e a redução da condutividade do plasma do canal e conseqüentemente uma tendência de diminuição da velocidade de propagação do líder contínuo.

Cooray (2003, p. 196) sugere que a densidade linear de carga do líder contínuo próximo ao solo seria 7-12  $\mu\text{C}/\text{m}$  para cada kA de pico de corrente da correspondente descarga

de retorno na base do canal. Utilizando um valor médio de  $10 \mu\text{C}/\text{m}$  e supondo uma variação no pico de corrente de 10 a 50 kA, resultaria em uma densidade linear na faixa de 100 a  $500 \mu\text{C}/\text{m}$ .

A Figura 2.18 mostra registros de campo elétrico (“*delta E*”, enfatizando as baixas frequências, e “*fast delta E*”, as altas frequências), de radiação em radiofrequência (RF) centrada em 274 MHz e de mapeamento das fontes de radiação (de líderes e DRs) de um relâmpago NS negativo. Os processos identificados foram: primeiro líder escalonado (L1), três líderes falhos (AL1, AL2 e AL3) e possivelmente um líder escalonado-contínuo (L2), que teria criado uma nova terminação no solo. Para o líder L1 é possível identificar, além de seu campo eletrostático e dos pulsos de radiação (como na Figura 11), o aumento na amplitude da radiação (log RF) conforme o líder escalonado se aproxima do solo até o momento da DR (pico positivo entre L1 e AL1), pois as extremidades do líder são fontes da radiação se aproximando. Além do aumento da amplitude, pode-se notar a oscilação sobreposta a este aumento, o que revela a natureza intermitente de um líder escalonado. O acréscimo abrupto na radiação em L2, segundo Shao et al. (1995), seria explicado pela parte escalonada de um provável líder escalonado-contínuo.

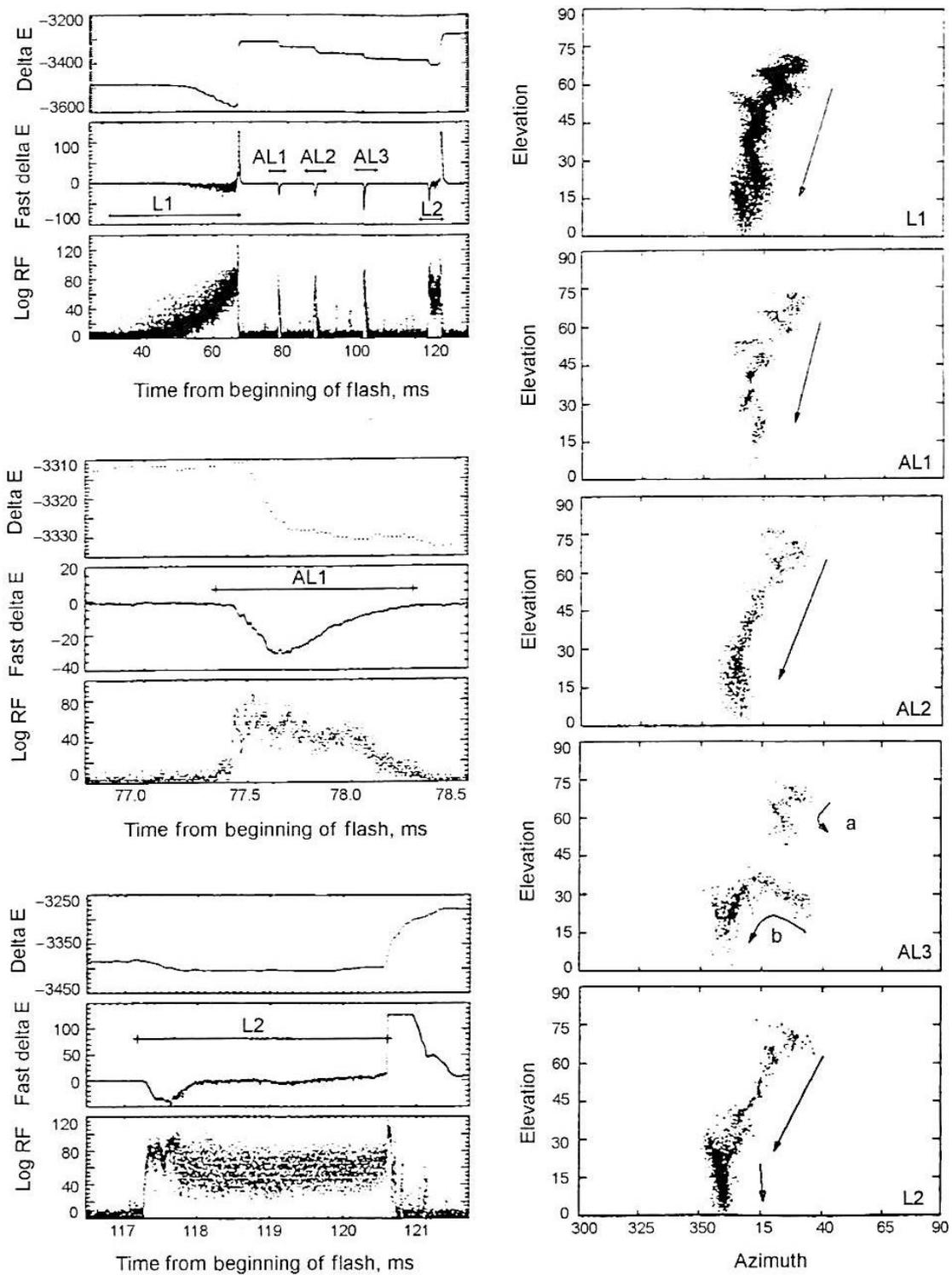


Figura 2.18 – Registros de campo elétrico com constantes de tempo de 10 s ( $\Delta E$ , baixas frequências) e de 100  $\mu$ s ( $\text{fast } \Delta E$ , altas frequências), logaritmo da amplitude de radiação em RF (log RF) e mapeamento das fontes de radiação (coluna à direita) de um NS negativo múltiplo.  
 Fonte: adaptado de Shao et al. (1995, p. 2751).

### 2.2.2.6. Corrente contínua e Componente M

Corrente contínua (*continuing current*) e componente M (*M-component*) são revisados extensamente por Bazelyan e Raizer (2000, p. 129-31; 202-6), Cooray (2003, p. 186-189), Rakov e Uman (2003, p. 173-182) e Cooray (2010, p. 84-88). Bazelyan e Raizer (2000, p. 129) usam a terminologia *continuous current* para qualquer tipo de corrente contínua, que, segundo Rakov e Uman (2003, p. 173), usualmente refere-se à corrente contínua dos relâmpagos ascendentes (na literatura inglesa).

Rakov e Uman (2003, p. 173) apresentam a definição usual da corrente contínua (CC) como sendo “uma corrente de relativa baixa intensidade de tipicamente dezenas a centenas de amperes que imediatamente segue uma descarga de retorno, no mesmo canal até o solo, e que dura tipicamente de dezenas a centenas de milissegundos”. Os autores comentam que “esta corrente pode ser vista como um arco quase estacionário entre a fonte de carga na nuvem e o solo ao longo do caminho criado pela(s) sequência(s) líder-descarga-de-retorno”. Os autores comentam que, devido à relativa grande transferência de carga, a corrente contínua é responsável pelos danos mais sérios associados ao relâmpago relativos aos efeitos térmicos (*e.g.*, buracos em cabos OPGW<sup>8</sup> de linhas de energia e no revestimento metálico de aeronaves, incêndios florestais, queima de fusíveis de transformadores de distribuição de energia).

Rakov e Uman (2003, p. 176) comentam que aparentemente a distinção entre os processos da descarga de retorno e da corrente contínua está na origem das cargas transportadas para o solo: na primeira, seriam aquelas depositadas no canal pelo líder precedente; na segunda, seriam aquelas capturadas e transportadas até o solo oriundas de regiões da nuvem.

Classifica-se a duração da corrente contínua em três faixas de valores: (i) maior do que 40 ms, é chamada corrente contínua longa (*long continuing current*) (KITAGAWA et al., 1962; BROOK et al., 1962), por ser o valor do intervalo típico entre DRs aceito na

---

<sup>8</sup> OPGW (*Optical Ground Wire*) é um tipo de cabo usado em redes de transmissão e distribuição de energia com a dupla função de comunicação (parte interna) e de proteção (camada externa) através de seu aterramento.

época; (ii) maior do que 10 ms e menor do que 40 ms, é chamada corrente contínua curta (*short continuing current*) (SHINDO; UMAN, 1989); e (iii) menor do que 10 ms, antes chamada de “corrente contínua questionável” (*questionable continuing current*) (SHINDO; UMAN, 1989), foi então chamada de corrente contínua muito curta (*very short continuing current*) (BALLAROTTI et al., 2005). O valor de 10 ms possui uma base física, visto que uma corrente contínua com amplitude típica (~100 A) e duração igual ou maior a 10 ms transporta carga total igual ou maior que 1 C que, por sua vez, é comparável à carga total de uma descarga de retorno. O processo da corrente contínua, entretanto, seria o mesmo nos três casos (*i-iii*), segundo Cooray (2003).

Como a corrente contínua (CC) possui um regime quase estacionário, os termos predominantes do campo são o estático e o indutivo. A Figura 2.19 mostra um registro de CC longa após a quarta DR de um raio. O registro de CC no campo elétrico (*delta E*) é caracterizado por uma grande variação contínua, suave e de mesma polaridade da DR. Tal assinatura, porém, pode se dar também devido a processos dentro da nuvem e não necessariamente à CC. Como a origem da carga da CC está de algum modo dentro da nuvem, líderes de polaridade oposta caminham procurando por regiões de carga (oposta) através de processos de quebra de rigidez do meio. Tais processos parecem ser um dos responsáveis pela emissão em RF durante a CC, embora a origem desta emissão ainda não seja bem conhecida (MAZUR et al., 1995).

Outros trabalhos, *e.g.* Rakov e Uman (1990a), Valine e Krider (2002) e Saba et al., (2006), também reportam estatísticas de ocorrência da corrente contínua em relâmpagos nuvem-solo negativos. Fisher et al. (1993) reportam formas de onda de corrente contínua de relâmpagos induzidos por foguete levando um fio condutor (medidas diretas), e Campos (2007) e Ferraz (2009) para relâmpagos naturais (medidas indiretas através da luminosidade e do campo elétrico, respectivamente).

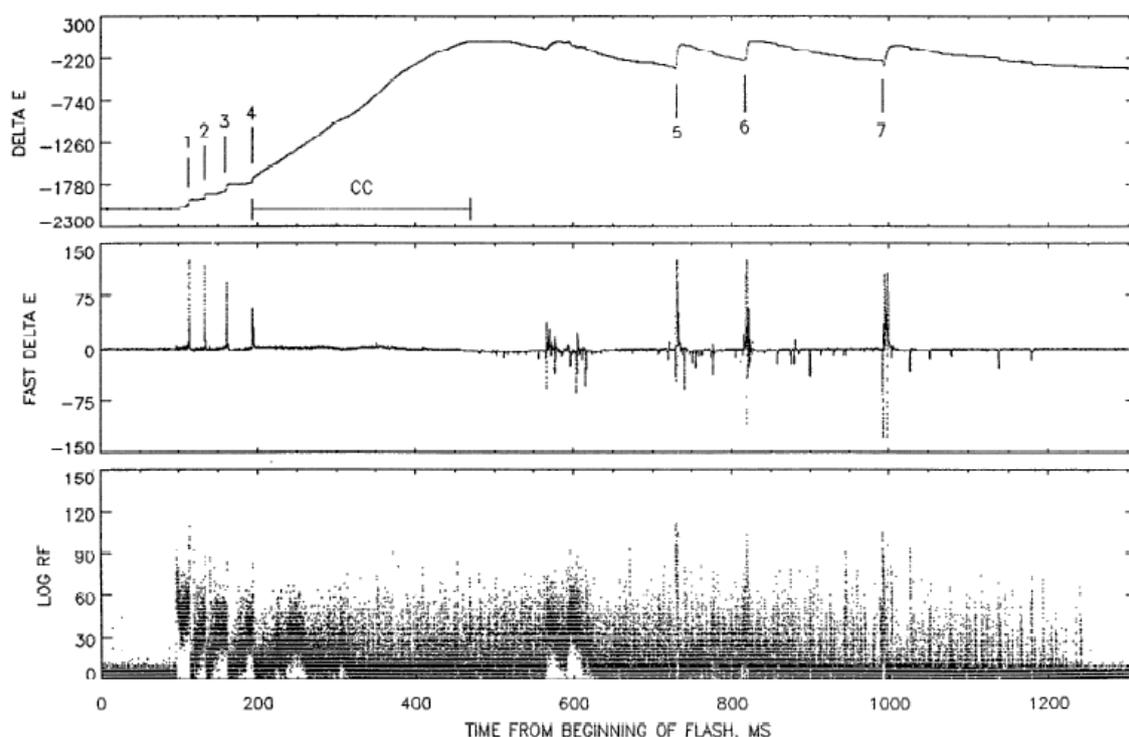


Figura 2.19 – Registros de campo elétrico com constantes de tempo de 10 s (*delta E*, baixas frequências) e de 100  $\mu$ s (*fast delta E*, altas frequências) e logaritmo da amplitude de radiação em RF (*log RF*) para um raio negativo de sete descargas de retorno (DRs) com corrente contínua (CC) iniciada na quarta DR e de duração em torno de 120 ms.

Fonte: adaptado de Shao et al. (1995).

A componente M (M de D. J. Malan, quem primeiro estudou este processo) é uma “perturbação relativamente curta na corrente contínua, com duração típica de alguns milissegundos ou menos”. “As componentes M são surtos no estado quase estacionário da corrente contínua e na luminosidade do canal associada” (RAKOV; UMAN, 2003, p. 176). A componente M é também referida como sendo um resultado do processo chamado evento M (*M-event*), que consiste no encontro do líder de recuo (tratado na seção 2.5) com o canal condutivo, conectado ao solo e portador de corrente, como foi descrito por Mazur et al. (1995) e Mazur e Ruhnke (2011, p. 104). As Figuras 2.20 e 2.21 mostram registros de componentes M ocorridas após a descarga de retorno. Note que, na Figura 2.21, a polaridade da assinatura da DR (*4th return stroke*) é contrária a do líder subsequente (*subsequent leader*) e das componentes M. Esta inversão de polaridade se dá pela grande proximidade da descarga.

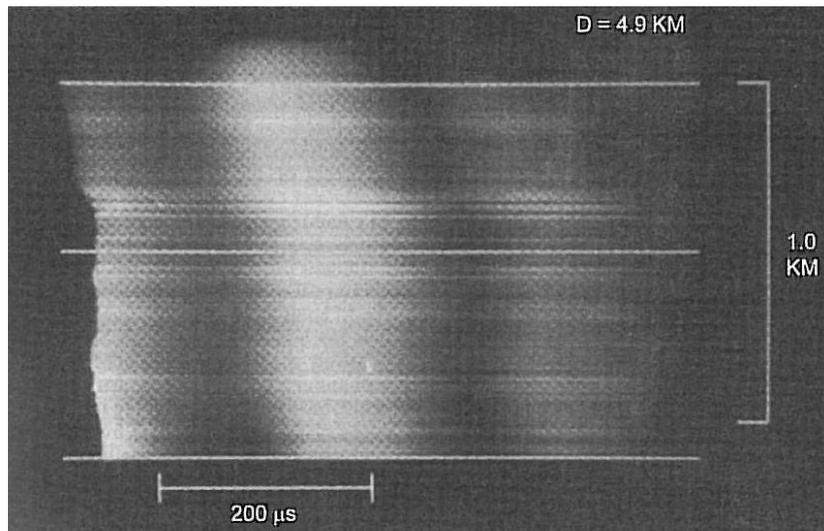


Figura 2.20 – Fotografia de *streak camera* de uma descarga de retorno e duas componentes M associadas de um relâmpago ocorrido na Flórida (EUA) a uma distância de 4,9 km.

Fonte: adaptado de Jordan et al. (1995) apud Rakov e Uman (2003, p.177).

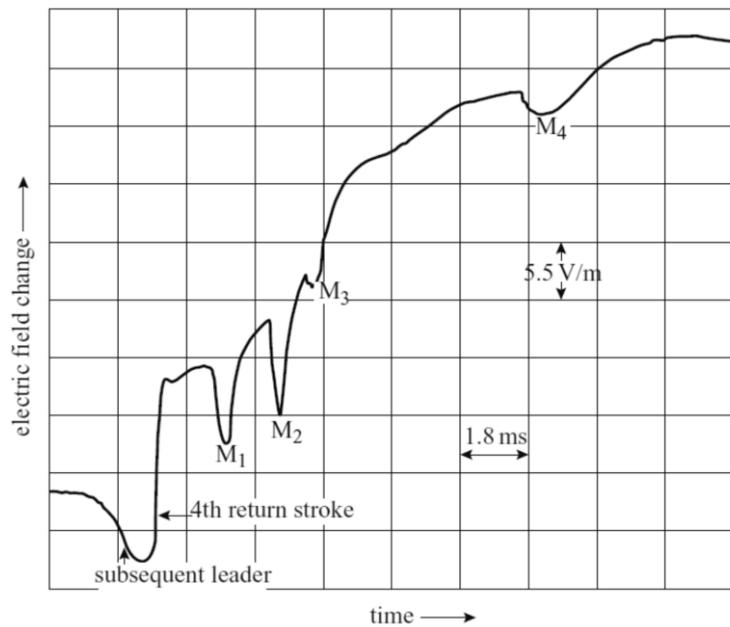


Figura 2.21 – Registro de campo elétrico com variações em forma de gancho devido a quatro componentes M ocorridas durante a corrente contínua, iniciada pela quarta descarga de retorno (DR) de um relâmpago nuvem-solo negativo na Florida (EUA), observado a uma distância em torno de 5 km.

Fonte: adaptado de Rakov et al. (1992) apud Cooray (2003, p.189).

A Figura 2.22 mostra uma representação esquemática da corrente ao longo da altura do canal para os três modos de transferência de carga para o solo em descargas de retorno subsequentes: (a) sequência líder-contínuo-descarga-de-retorno; (b) corrente contínua; e

(c) componente M. Estão indicadas as velocidades da frente de onda da corrente e valores da condutividade do canal para o primeiro e o terceiro modos. O gráfico abaixo representa como a corrente na base do canal varia no tempo. Segundo Rakov e Uman (2003, p. 176), os modos (a) e (b) diferem-se entre si pelo fato de que a sequência líder-contínuo-descarga-de-retorno “aparentemente ocorre ao longo dos remanescentes do canal previamente formado quando essencialmente não há corrente fluindo para o solo”, enquanto que a componente M “requer a presença de um canal portando corrente para o solo”.

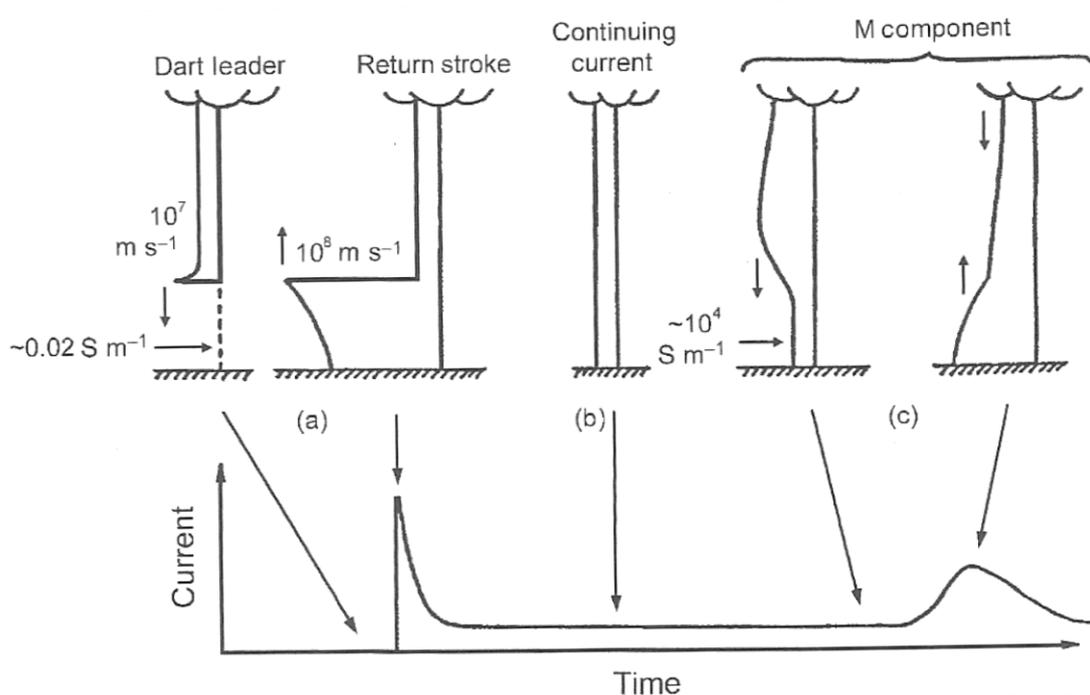


Figura 2.22 – Representação esquemática da corrente versus perfis de altura do canal para três modos de transferência de carga para o solo em descargas de retorno subsequentes: (a) líder-contínuo e descarga-de-retorno (*dart-leader* e *return-stroke*), (b) corrente contínua (*continuing current*) e (c) componente-M (*M component*).

Fonte: adaptado de Rakov e Uman (2003, p. 6).

A componente M possui um pulso de corrente mais suave do que o da descarga de retorno, onde normalmente a amplitude da primeira é menor e seus tempos de subida e descida são maiores (RAKOV; UMAN, 2003, p. 179). A caracterização das componentes M foi realizada para relâmpagos induzidos artificialmente através de

medidas diretas de corrente (THOTTAPPILLIL et al., 1995) e para relâmpagos naturais através de medidas indiretas (CAMPOS et al., 2007; FERRAZ, 2009).

### **2.2.2.7. Processos J e K**

Os processos J e K foram revisados principalmente por Uman (1987, p. 179-85) e Rakov e Uman (2003, p. 182-8). São processos de difícil observação e consequentemente processos menos conhecidos em geral. Segundo Rakov e Uman (2003, p. 182), podem ser interpretados genericamente como processos de captura e transporte de carga que ocorrem dentro da nuvem durante as etapas do relâmpago nuvem-solo, principalmente entre as descargas de retorno. Foram observados inicialmente através de registros de campo elétrico, onde as suas respectivas assinaturas, chamadas variações J e K, foram identificadas. Observações mais recentes através de técnicas de mapeamento de fontes de radiação dentro da nuvem têm especialmente contribuído para o maior entendimento de tais processos.

Segundo Rakov e Uman (2003, p. 182-3), o processo J ou de junção (*J-process* ou *junction-process*) é “identificado por uma mudança relativamente estável no campo elétrico em uma escala de tempo de dezenas de milissegundos”. A chamada variação J (*J change* ou *J-field change*) no campo elétrico pode ter tanto polaridade igual como oposta em relação à variação de campo da descarga de retorno. No primeiro caso, “geralmente é menor do que a variação devida à corrente contínua e, diferentemente desta, não está associada a um canal luminoso entre a nuvem e o solo”. “A variação no campo elétrico após a última descarga de retorno (ou após o fim da corrente contínua, se houver) é provavelmente da mesma natureza da variação J”<sup>9</sup>.

Ainda segundo Rakov e Uman (2003, p. 183), “a variação J ocorrendo entre as descargas de retorno de um raio [*ground discharge*] é quase sempre negativa (conforme convenção de sinal da eletricidade atmosférica) para raios distando alguns quilômetros”, podendo ter qualquer polaridade para raios distando além de cinco quilômetros. A

---

<sup>9</sup> Variações de campo elétrico após a última descarga de retorno já foram chamadas por alguns autores de *F-changes* ou variações F (MACGORMAN; RUST, 1998, p. 106; RAKOV; UMAN, 2003). Neste trabalho, entretanto, não é feita tal distinção.

Figura 2.23 mostra um registro de campo elétrico contendo variações J, variações K, sequência líder-DR e componentes M ocorridas antes e depois da segunda descarga de retorno de um relâmpago nuvem-solo negativo próximo.

Krehbiel et al. (1979 apud RAKOV; UMAN, 2003, p. 184) interpretando seus registros de campo elétrico de múltiplas estações de medição, “deduziram que o processo J usualmente move cargas horizontalmente em direção ao topo da descarga de retorno antecedente”, de modo que a carga envolvida na próxima descarga de retorno não é necessariamente a mesma, sendo inclusive observada em regiões mais distantes na nuvem. A ideia de “junção”, portanto, não parece ser válida para os volumes de cargas das diversas descargas de retorno (DRs).

Krehbiel et al. (1979) reportam que muitas correntes contínuas foram observadas “progredindo horizontalmente dentro da nuvem”, sendo que o processo de fornecimento de carga para tal seria iniciado pela própria descarga de retorno. Os autores observam que as variações de campo da sequência líder-descarga-de-retorno parecem estar sobrepostas à variação J, sugerindo independência entre os respectivos processos.

Segundo Rakov e Uman (2003, p. 182-4), as variações K são mudanças rápidas, em comparação às variações J, no campo elétrico que ocorrem entre as descargas de retorno (DRs) ou após a última, geralmente em intervalos de unidades a dezenas de milissegundos, quando não há corrente no canal até o solo. A letra K significa tanto *kleine* (pequeno, em alemão; possivelmente em comparação à assinatura mais expressiva da descarga de retorno), quanto a inicial dos sobrenomes de N. Kitagawa e M. Kobayashi, que foram os primeiros a estudar este processo mais detalhadamente. Algumas variações K podem ser confundidas com as assinaturas de DRs subsequentes, especialmente quando não se dispõe de uma resolução na escala de microssegundos. Segundo Thottappillil et al. (1990), Rakov et al. (1992) e Zhu et al. (2014), o processo K possui grande variabilidade de assinaturas.

A Figura 2.23 mostra variações K sobrepostas à variação J. K<sub>1</sub>-K<sub>5</sub> referem-se às cinco variações K; *J-change*, à variação J (negativa); *leader field change*, à variação de campo devido ao líder; *second return stroke field change*, à variação de campo devido à

segunda DR (positiva); e  $M_1$ - $M_3$ , às variações de campo devido às três componentes M. Constante de tempo do integrador é 1 s. Uma variação positiva de campo elétrico, conforme a convenção de sinal da eletricidade atmosférica, deflete para baixo.

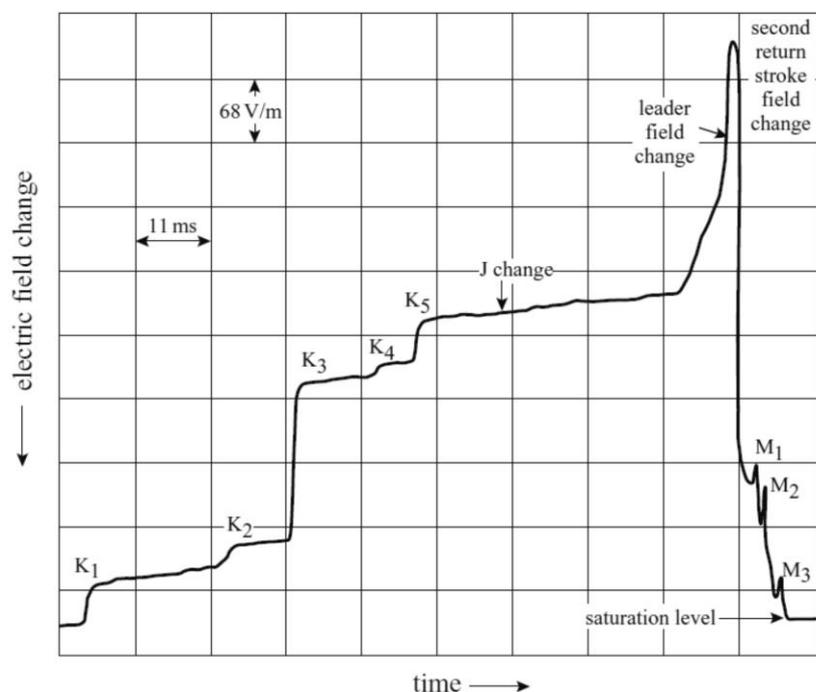


Figura 2.23 – Registro de campo elétrico para um relâmpago nuvem-solo negativo ocorrido a uma distância de 2,5 km na Florida (EUA).

Fonte: adaptado de Thottappillil et al. (1990) apud Cooray (2003, p. 190).

O processo K, segundo Rakov e Uman (2003, p. 186), foi aparentemente inferido pela primeira vez por Malan e Schonland (1951, p. 161-2) através de observações de campo elétrico e fotográficas de raios na África do Sul.

Eles interpretaram as variações escalonadas no campo, que ocorreram entre as descargas de retorno e após a última e que não estavam acompanhadas por nenhuma luminosidade detectável no canal entre a base da nuvem e o solo, como sendo devidas a um líder que não foi capaz de alcançar o solo e acabou produzindo ‘um pequeno reajuste de cargas dentro da nuvem’ (RAKOV; UMAN, 2003, p. 186).

Rakov e Uman (2003, p. 184-5) explicam que “existe controvérsia e considerável confusão na literatura acerca da definição da variação K”, especialmente quando baseadas nas análises das assinaturas de campo elétrico obtidas no solo. Os autores

reúnem três definições de variação K utilizadas por diferentes pesquisadores, a começar pelas que consideraram menos ambíguas:

- a) Thottappillil et al. (1990) e Rakov et al. (1992; 1996) identificaram-na, em *ground flashes*, como sendo variações do tipo degrau no campo elétrico com constante de tempo de 1 s, que ocorrem nos intervalos entre DRs e após a última DR, de mesma polaridade da variação J e com tempo máximo de subida (10-90%) de 3 ms. Esta definição provavelmente tende a identificar mais os eventos pronunciados e a desprezar os eventos pouco expressivos;
- b) Kitagawa e Brook (1960) e Kitagawa et al. (1962) identificaram-na como sendo pulsos ocorrendo durante o intervalo entre DRs e após a última DR no campo elétrico com constante de tempo de 70  $\mu$ s. Esta definição incluiria eventos de menor expressão, mas pulsos individuais na escala de microssegundo não representariam adequadamente a natureza da variação K;
- c) Rhodes e Krehbiel (1989), Mazur et al. (1995) e Shao et al. (1995) identificaram-na no mapeamento em VHF como sendo processos dentro da nuvem que ocorriam durante o intervalo entre DRs e que não poderiam ser atribuídos a nenhum outro processo conhecido. Em particular, foi identificada a propagação retrógrada em direção ao tronco principal da árvore do relâmpago com variações da definição (a), do tipo degrau.

Cooray (2003, p. 190) concorda ao destacar que a constante de tempo de integração utilizada pode mudar o formato da assinatura básica da variação K: se for lenta, do tipo degrau; e se for rápida, pulso com decaimento exponencial.

Zhu et al. (2014) analisaram observações coordenadas de variações de campo elétrico, pulsos de campo magnético em escala de microssegundo (VLF/LF) e emissões em VHF associados com processos K em *cloud* e *ground flashes* de uma tempestade local. Neste estudo, os autores analisaram milhares de assinaturas do processo K tanto componentes de altas quanto de baixas frequências, este último com uma antena de campo elétrico com constante de tempo de 330 ms e capaz de registrar o degrau característico (Figura

2.24). As setas indicam o tempo aproximado de começo e fim da atividade de pulsos em escala de microssegundo associada à variação K.

Quanto ao intervalo entre variações K, Thottappillil et al. (1990) encontraram uma média geométrica de 12,5 ms para um conjunto de 93 eventos. Miranda et al. (2003) reportaram um valor correspondente de 12,0 ms. Mais recentemente, Zhu et al. (2014) encontraram média geométrica de 7,5 ms para um conjunto bem maior de 1.154 eventos (7,1 ms para os 662 *ground flashes* e 8,0 para os 492 *cloud flashes*). Pode-se notar grande semelhança entre os valores dos diferentes autores. Quanto à duração das variações K, Thottappillil et al. (1990) encontraram uma média geométrica de 0,7 ms para um conjunto de 135 eventos. Zhu et al. (2014) encontraram o mesmo valor (0,7, tanto para *ground* quanto para *cloud flashes*) para um conjunto de 1.252 eventos.

Observações de relâmpagos feitas a partir do mapeamento das fontes de radiação em VHF-UHF com suficiente resolução temporal têm permitido avançar bastante no conhecimento dos processos dentro da nuvem nos relâmpagos nuvem-solo, incluindo os processos K. Rakov e Uman (2003, p. 185-8) trazem uma revisão sobre o processo K, especialmente sobre as interpretações dadas às características de radiação em VHF-UHF do processo. Diferentes autores, *e.g.*, Brook e Kitagawa (1964) e Proctor et al. (1988), observaram trens de pulsos (“*bursts*”, “*Q-noise*”, “*K-type event*”) acompanhando frequentemente as variações K e provenientes de regiões que previamente haviam sido fontes de radiação, indicando reutilização de canais dentro da nuvem em direção ao canal antigo conectado ao solo. Baseados em interpretação similar, Proctor et al. (1988 apud RAKOV; UMAN, 2003, p. 186) propôs um modelo conceitual do desenvolvimento do relâmpago dentro da nuvem conforme ilustrado na Figura 2.25. SL significa *stepped leader* ou líder escalonado; 1st stroke, 1ª descarga de retorno; J 1-2, processos J 1-2; 2nd stroke, 2ª descarga de retorno; J 2-3, processos J 2-3; 3rd stroke, 3ª descarga de retorno; *Stroke N*, enésima descarga de retorno. O nível do solo (GND) está a 1,4 km acima do nível do mar. Neste modelo, cada descarga de retorno subsequente está relacionada com a captura de cargas mais remotas, resultando em um canal cada vez mais longo conforme aumenta a multiplicidade.

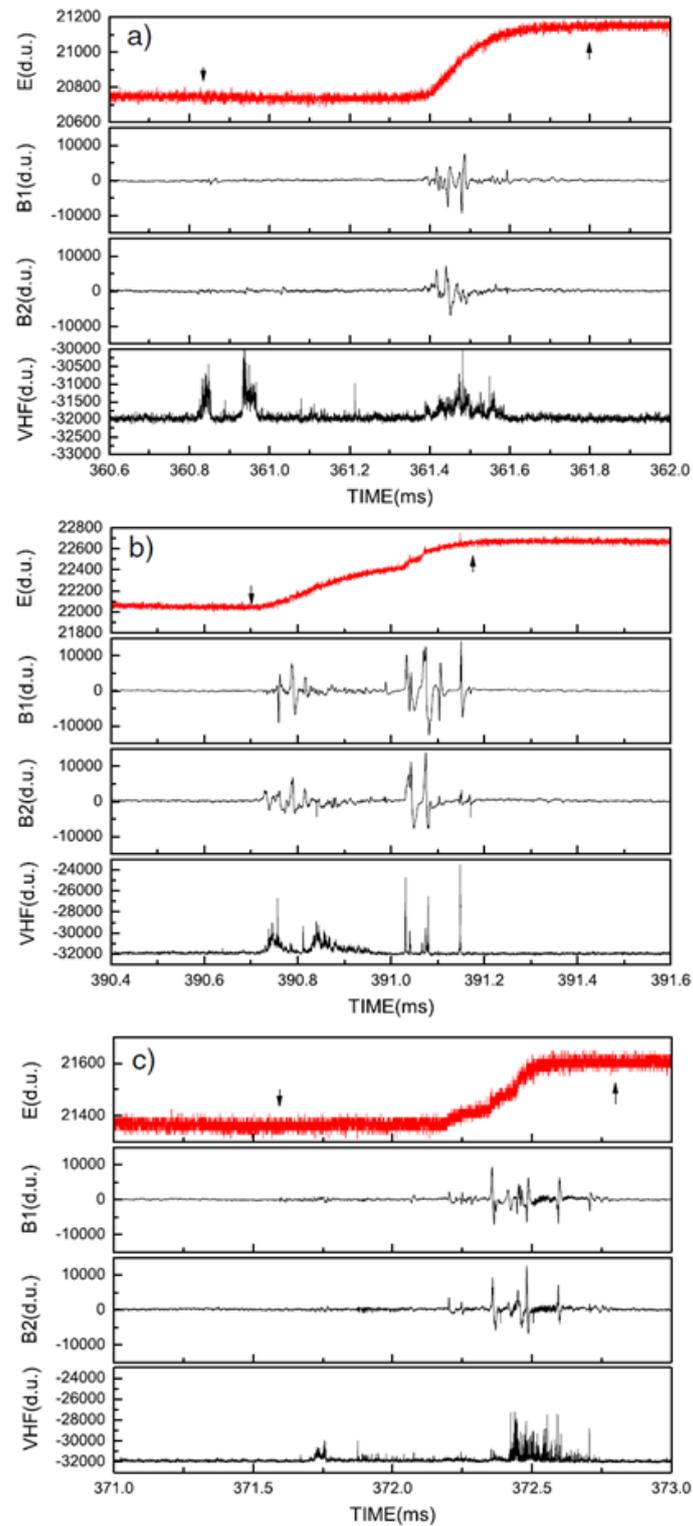


Figura 2.24 – Formas de onda de campo elétrico ( $E$ , primeira parte), pulsos de campo magnético ( $B_1$  e  $B_2$ , segunda e terceira partes) e emissão em VHF (quarta parte) de três variações  $K$  ocorrendo em um *ground flash*, após sua quarta descarga de retorno.

Fonte: adaptado de Zhu et al. (2014).

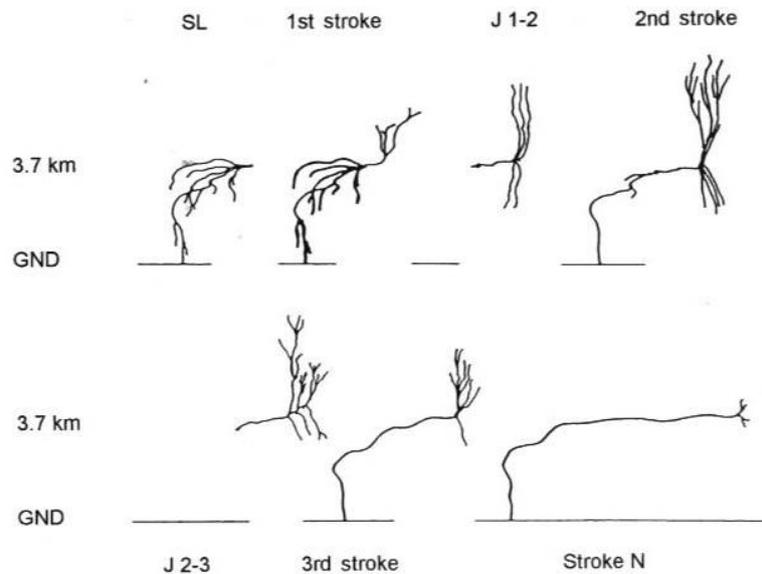


Figura 2.25 – Modelo conceitual de um relâmpago NS baseado no mapeamento em VHF de canais de relâmpagos.

Fonte: adaptado de Proctor et al. (1988) apud Rakov e Uman (2003, p. 186).

Rakov e Uman (2003, p. 186), analisando os resultados de Proctor et al. (1988), comentam que o processo responsável pela emissão do *Q-noise* seria o “*Q-streamer*”, que poderia ser visto como “descargas verticais intermitentes durando menos que 100  $\mu$ s separadas por intervalos de alguns milissegundos”. São estruturas muito ramificadas tanto para cima quanto para baixo e presumivelmente afuniladas em direção à extremidade do canal na nuvem.

Os ‘*Q-streamers*’ ocorrem em regiões progressivamente mais distantes à frente do canal positivo que propaga expandindo-se, provavelmente facilitando sua extensão a uma velocidade da ordem de  $10^4$  m/s (RAKOV; UMAN, 2003, p. 186).

Proctor et al. (1988 apud RAKOV; UMAN, 2003, p. 186) observaram algumas vezes variações J suaves sem pulsos em VHF (*Q-noise*), que, segundo Rakov e Uman (2003, p. 186), poderiam ser o caso do líder positivo (“*classical*” *positive J-leader*) propagando-se suavemente a partir do canal da descarga de retorno anterior. Os autores sugerem que cada *Q-streamer* levaria a um “efetivo movimento de carga negativa ao longo do canal, o que resultaria na variação K”. Sugerem também que o *Q-streamer* seria a parte inicial de um processo de recuo (*recoil process, recoil streamer*), onde cargas negativas são fornecidas para um canal positivo se desenvolvendo dentro da

nuvem. Sobre a presença de pulsos de altas frequências, Zhu et al. (2014, p. 2709) concluem que:

[...] parece que o processo K é um *streamer* ou líder rápido que dá origem às emissões em VHF observadas e correspondentes pulsos na escala de microssegundo, mas somente aqueles eventos associados com significativa transferência de carga são capazes de produzir uma variação K do tipo degrau nos registros de campo elétrico.

A projeção espacial da evolução do líder dentro da nuvem de Proctor et al. (1988) foi posteriormente confirmada por mapeamentos de fontes de radiação mais elaborados (e.g., o Lightning Mapping Array, LMA). Na Figura 2.26, as cores indicam a progressão temporal, e os diferentes painéis mostram a evolução do relâmpago na altura versus tempo (topo), vista de cima (embaixo à esquerda) e projeções verticais Leste-Oeste (centro esquerda) e norte-sul (embaixo à direita). O histograma da altura das fontes também está mostrado. Os triângulos indicam os momentos e as localizações das descargas de retorno detectadas pela rede americana de detecção NLDN. Os quadrados no plano indicam a localização das estações de medição, e a linha vertical indica a divisão dos estados do Colorado e do Kansas (EUA). É possível identificar o crescimento e expansão da estrutura do líder positivo, bem como o retraço de dois ramos principais que percorrem o tronco principal (em vermelho).

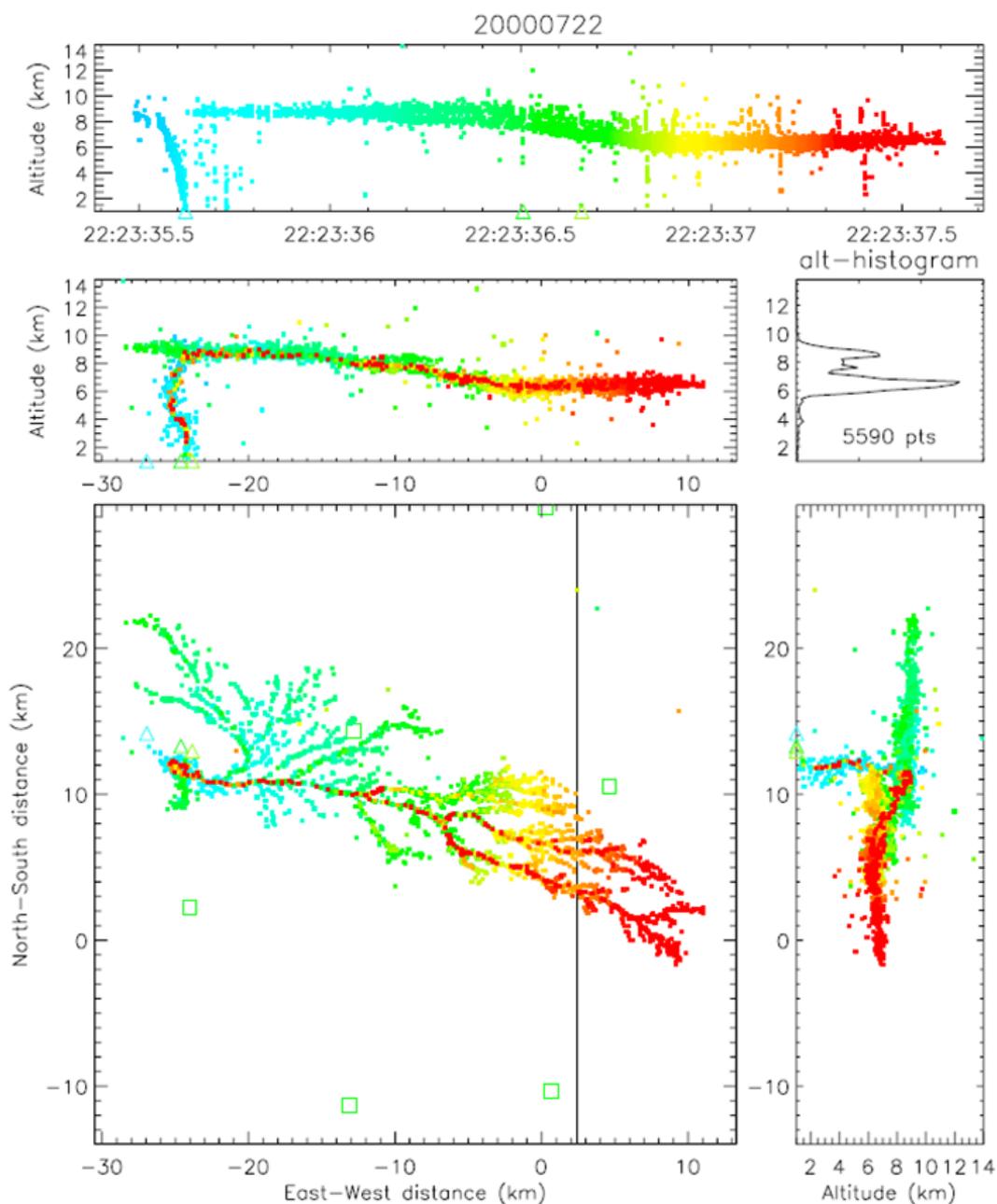


Figura 2.26 – Fontes de radiação (VHF) de um relâmpago nuvem-solo negativo que ocorreu às 22:23:35 UTC, 22/jul/2000. Fonte: THOMAS et al. (2004).

### 2.3. O relâmpago nuvem-solo positivo

O relâmpago nuvem-solo positivo é revisado mais detalhadamente por Rakov e Uman (2003, cap. 5) e Bazelyan e Raizer (2000). Os processos do relâmpago nuvem-solo positivo foram muito menos observados e estudados do que os de seu correspondente

negativo. Em primeiro lugar, porque o nuvem-solo positivo natural é muito menos frequente e a visualização da parte positiva do líder através de interferometria é limitada; em segundo lugar, porque as técnicas de indução por foguete são pouco eficientes para os positivos (MAZUR, 2002). Medidas diretas da corrente, por exemplo, não são abundantes e a principal referência (BERGER et al., 1975) utiliza somente 26 raios positivos e que podem estar contaminados por raios positivos solo-nuvem (RAKOV; UMAN, 2003, p. 214). Não há, portanto, um conjunto de dados estatisticamente expressivo para seus parâmetros de corrente da descarga de retorno, e valores de pico de corrente inferidos pelas redes de detecção, por exemplo, são feitos a partir de modelos calibrados com base nas descargas de retorno negativas.

Pode-se dizer que o relâmpago nuvem-solo positivo é basicamente semelhante ao nuvem-solo negativo, pois é composto de um líder (positivo e de luminosidade mais fraca do que o líder escalonado) propagando-se em direção ao solo que, após sua conexão, produz uma descarga de retorno, que por sua vez é seguida frequentemente por corrente contínua e eventuais componentes M (RAKOV; UMAN, 2003, cap. 5). A Figura 2.27 mostra fotografias de um relâmpago nuvem-solo positivo momentos antes da conexão com o solo e durante a descarga de retorno.

Rakov e Uman (2003, p. 222-3), baseados em observações de vários estudos, elencam cinco propriedades “características dos relâmpagos positivos” (os autores parecem agrupar raios positivos nuvem-solo e solo-nuvem, envolvendo os de torres e aqueles induzidos por foguete): (i) relâmpagos positivos possuem usualmente uma única descarga de retorno; (ii) descargas de retorno positivas tendem a ser seguidas por correntes contínuas que duram tipicamente dezenas a centenas de milissegundos e com intensidade que podem exceder uma dezena de quiloampères por certo tempo; (iii) descargas de retorno positivas parecem ser precedidas por atividade dentro da nuvem (observada nos registros de campo elétrico) por algumas centenas de milissegundos, sugerindo que seja iniciada pelo ramo de uma extensa descarga na nuvem (*cloud discharge*); (iv) relâmpagos positivos costumam envolver longos canais horizontais de até dezenas de quilômetros; (v) líderes positivos de relâmpagos se movem continuamente ou podem apresentar passos em sua propagação, mas normalmente

irradiam menos em VHF e frequências menores do que os líderes negativos, indicando uma propagação mais contínua e suave. Rakov e Uman (2003, p. 214) comentam que os maiores valores de pico de corrente e de carga transferida para o solo são associados ao relâmpago positivo e, como consequência, também os maiores efeitos deletérios em objetos e sistemas.

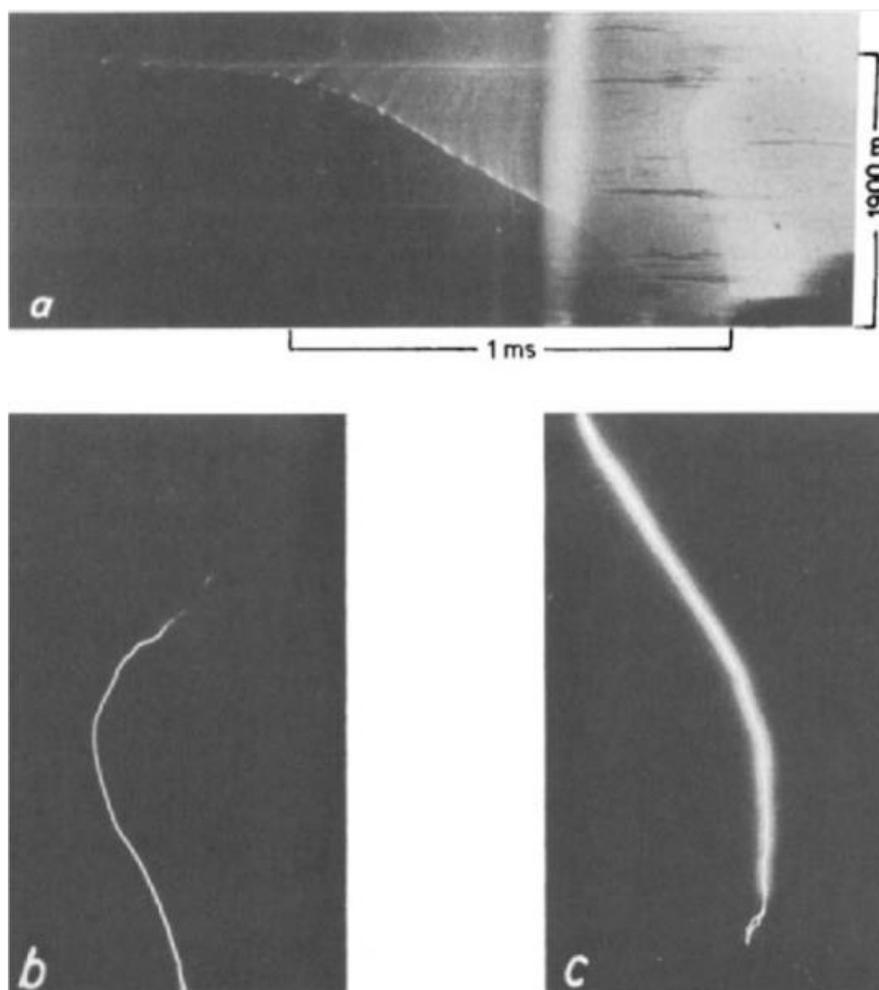


Figura 2.27 – Fotografias de um relâmpago nuvem-solo positivo. (a) Fotografia *streak* do último milissegundo de um líder positivo propagando em direção ao solo seguido da descarga de retorno. (b) Fotografia convencional tirada do mesmo local, a 3,3 km de distância. (c) Fotografia convencional tirada de local diferente mostrando o ponto de impacto no lago Lugano (Suíça) e o laço (*loop*) indicativo da conexão do líder descendente com o líder ascendente conectivo.

Fonte: adaptado de Berger e Vogelsanger (1966) apud Uman (1987).

Parâmetros do relâmpago nuvem-solo positivo sem a contaminação de ascendentes positivos foram mais estudados recentemente através de técnicas de elevada acurácia

(em vídeo de alta velocidade e campo elétrico) e para um número expressivos de casos. Ballarotti et al. (2007) observaram 20 raios nuvem-solo positivos com uma câmera rápida e a RINDAT<sup>10</sup> e obtiveram uma caracterização preliminar do fenômeno que confirmava as características elencadas por Rakov e Uman (2003, p. 222), não sendo observado somente o item (iii) por falta de instrumento. Saba et al. (2010) e Schumann (2012) apresentaram estatísticas gerais baseados em 103 e 231 raios, respectivamente, observados a partir de câmeras rápidas e redes de detecção em três países (Brasil, Estados Unidos e Áustria) entre 2003 e 2012. Qie et al. (2013) apresentam resultados de observações de 185 raios ocorridos na China a partir de uma rede de várias estações de campo elétrico (rápido e lento). Schumann et al. (2013) reportam formas de onda de campo elétrico de 80 nuvem-solo positivos. Saba et al. (2015) analisam um caso onde foi registrado a conexão do líder positivo descendente e o líder ascendente negativo através de câmera rápida e um sensor de campo elétrico rápido.

A Figura 2.28 mostra um registro de vídeo de alta resolução temporal de um relâmpago nuvem-solo positivo no Brasil. Os quadros 775 a 777 ms mostram o final da propagação do líder até o solo. No quadro 778 ms, ocorre o pico de corrente da única descarga de retorno (de 65 kA de acordo com a rede de detecção RINDAT). Esta descarga de retorno foi seguida por uma corrente contínua de 142 ms de duração.

Vários autores já reportaram observações do líder positivo do relâmpago nuvem-solo, *e.g.* Bazelyan e Raizer (2000, p. 94), Rakov e Uman (2003, p. 224-6), Saba et al. (2008, 2010) e Campos et al. (2014). Saba et al. (2008) apresentam características do líder do NS positivo a partir de observações, comparando-as com as do líder escalonado negativo, especialmente sobre velocidade de propagação. Saba et al. (2009) comentam dois casos onde ramos extensivos de relâmpagos intranuvem produziram raios positivos.

---

<sup>10</sup> A Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT) é um convênio de cooperação técnico-científica entre empresas privadas e governamentais, que possui ótima cobertura em toda a região Sudeste e os Estados do Paraná, Goiás e Mato Grosso do Sul, além das regiões adjacentes com cobertura menos eficiente. A rede de localização de raios atualmente administrada pelo INPE é a BrasilDat, que utiliza tecnologia semelhante à da RINDAT. Mais informações em INPE (2014).

Sobre a velocidade do líder positivo no relâmpago nuvem-solo, poucas medições foram realizadas, todas em duas dimensões. Berger e Vogelsanger (1966 apud CAMPOS et al., 2014) mediu a velocidade, de um único relâmpago nuvem-solo, crescente de  $3,6 \times 10^5$  to  $24 \times 10^5$  m/s conforme se aproximava do solo. Mais recentemente através de análise de registros de câmera rápida, Kong et al. (2008) observaram também valores crescentes de velocidade, de  $0,1 \times 10^5$  a  $3,8 \times 10^5$  m/s; e Saba et al. (2010) reportam valores máximos medidos na faixa de  $1-2 \times 10^6$  m/s e valor médio de  $1,81 \times 10^5$  m/s referentes a 29 relâmpagos nuvem-solo positivos ocorridos no Brasil e nos EUA. Campo et al. (2014), analisando mais detalhadamente os mesmos dados de Saba et al. (2010), comentam a forte tendência do aumento da velocidade ao longo da progressão até o solo nos dados analisados.

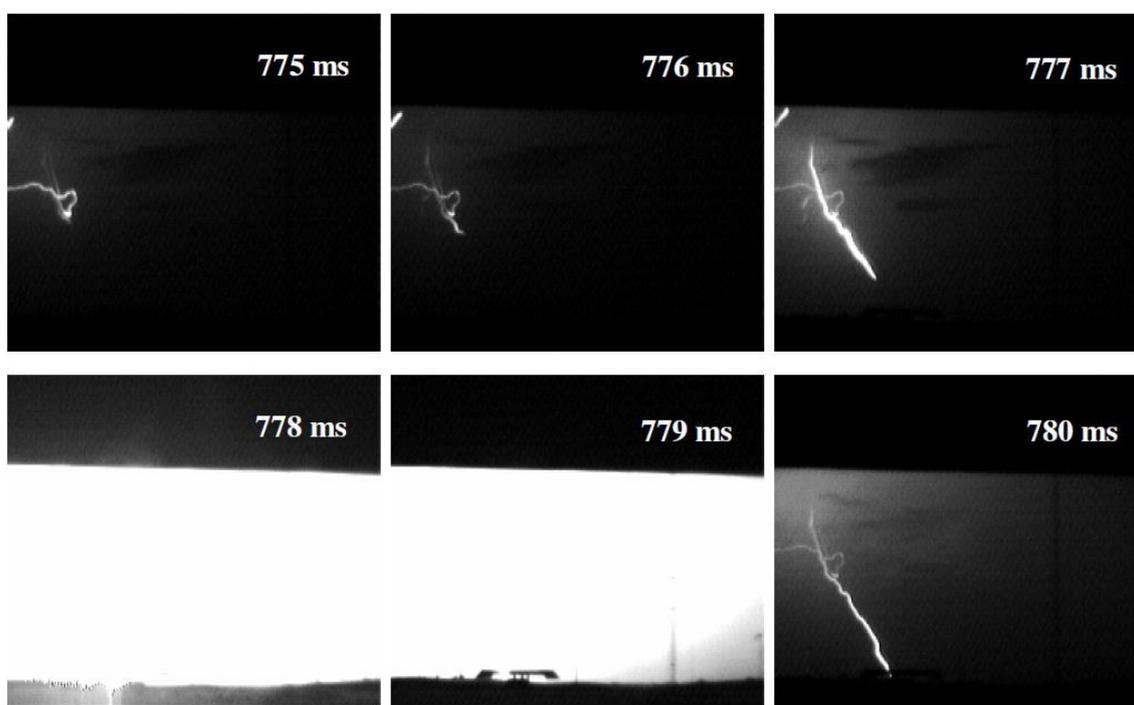


Figura 2.28 – Sequência de quadros de câmera rápida (a 1.000 qps) de um relâmpago nuvem-solo positivo observado a 20 km de distância. Registro obtido no Observatório Espacial do Sul (INPE), São Martinho do Sul (RS), 01/03/2006 23:29:40 UT. Fonte: Ballarotti et al. (2007).

Campos et al. (2009) apresentam formas de onda de corrente contínua e propriedades de componentes  $M^{11}$  de relâmpagos nuvem-solo positivo através da luminosidade e compararam com as respectivas características dos nuvem-solo negativos (Campos et al., 2007). Os autores observaram que as “componentes M negativas tendem a ocorrer nos primeiros momentos após a descarga de retorno, enquanto que as positivas têm uma distribuição mais homogênea ao longo da duração da corrente contínua”. Não foi observada diferença estatisticamente significativa entre os valores positivos e negativos para o intervalo entre duas componentes M sucessivas. A duração das positivas foi menor do que das negativas, mas a média de ocorrência por CC foi maior para as positivas (9,0) do que para as negativas (5,5).

A Figura 2.29 mostra um mapeamento das fontes de radiação de outro evento. A linha tracejada (nas duas séries temporais acima) e a cruz marcam o momento e o ponto de contato da descarga de retorno (DR), respectivamente. A região de cargas positivas onde o líder negativo se desenvolve encontra-se em torno de 8 km. Nos gráficos embaixo (altitude e distância Norte-Sul *versus* distância Leste-Oeste), pode-se notar a distribuição espacial das fontes de radiação antes e depois da DR. A corrente contínua que a seguiu ocorreu simultaneamente ao desenvolvimento de dois ramos principais em direção ao Sul.

---

<sup>11</sup> O processo pouco conhecido que gera o incremento transitório da corrente contínua nos relâmpagos nuvem-solo positivos é aparentemente diferente do nuvem-solo negativo. Entretanto, tal processo é também chamado de componente M neste trabalho.

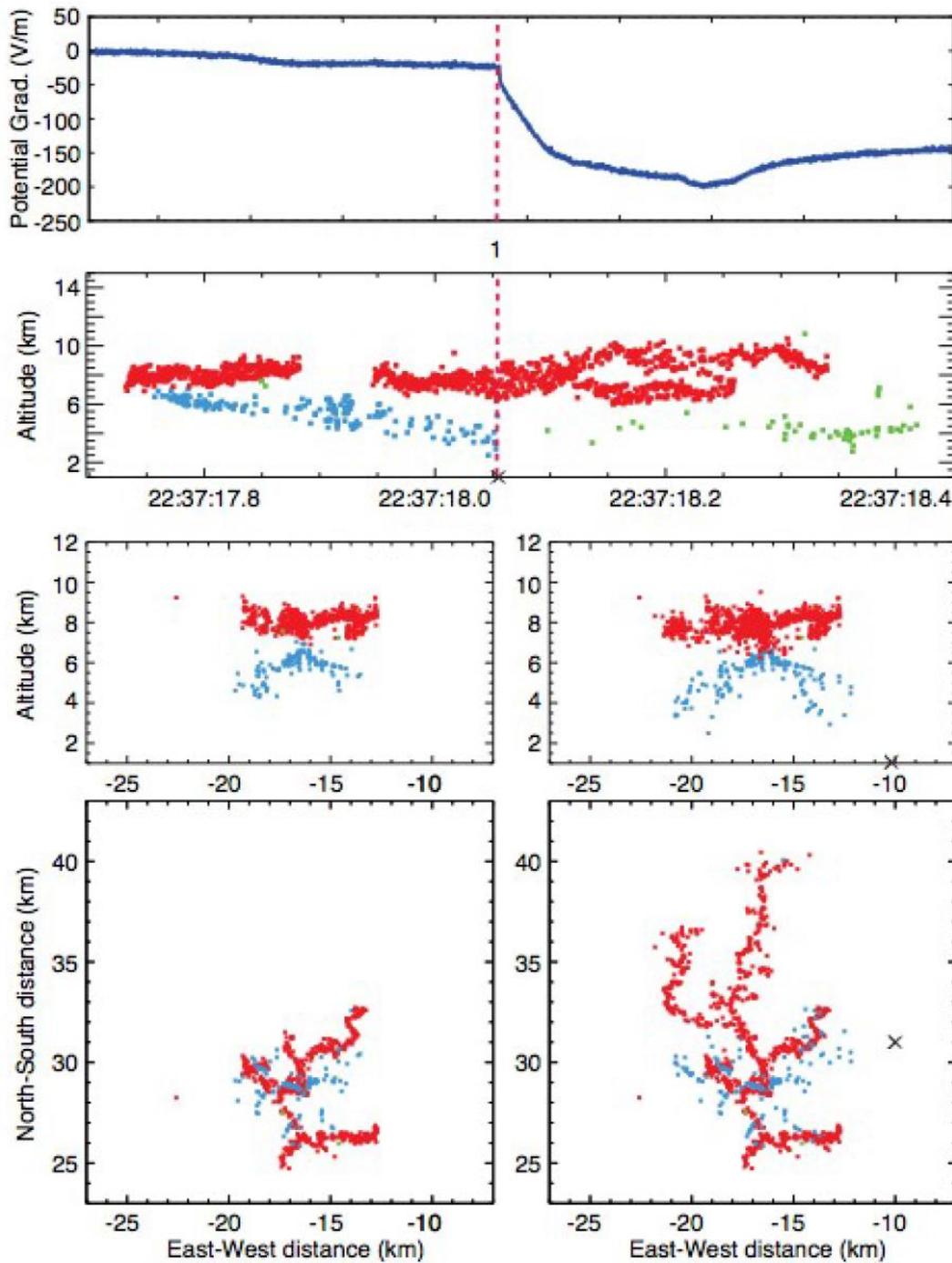


Figura 2.29 – Registros de LMA e campo elétrico (*Potencial Grad.*) de um relâmpago nuvem-solo positivo.  
 Fonte: Krehbiel e Wang (2011).

## 2.4. O relâmpago ascendente

Esta seção apresenta os conceitos básicos dos relâmpagos ascendentes (solo-nuvem) iniciados através de objetos aterrados estacionários, usualmente uma torre alta. Rakov e Uman (2003, cap. 6) revisam este tópico. Rakov e Uman (2003, p. 50) comentam que algum objeto ou estrutura aterrada e proeminente no solo (em geral com altura superior a ~100 m) é necessário para a ocorrência desse tipo de relâmpago.

A iniciação do relâmpago ascendente se dá quando a intensidade do campo elétrico sobre a extremidade do objeto<sup>12</sup> excede o valor da quebra de rigidez e um líder propaga a partir do objeto em direção à nuvem de tempestade. O relâmpago ascendente negativo é iniciado por um líder ascendente positivo e transporta carga negativa para o solo. Por outro lado, o relâmpago ascendente positivo é iniciado por um líder ascendente negativo e transporta carga positiva para o solo. No caso de transferência bipolar de carga (ascendente bipolar), aparentemente na maioria das vezes o relâmpago é iniciado por um líder positivo e, após a transferência de carga negativa, ocorre a transferência de carga positiva (RAKOV; UMAN, 2003).

O relâmpago ascendente negativo é semelhante àqueles induzidos por foguetes pelo método clássico (fio aterrado). O estágio inicial deste relâmpago é composto pelo líder ascendente positivo e pela corrente contínua inicial, que dura tipicamente algumas centenas de milissegundos. Este estágio “pode ser seguido, após um período sem corrente, por uma ou mais sequências de um líder descendente e de uma descarga de retorno”, como mostrado na Figura 2.30. Neste exemplo, o relâmpago é composto por um líder ascendente positivo (*upward positive leader*, UPL), seguido por uma corrente contínua inicial (*initial continuous current*, ICC), e por duas sequências de um líder contínuo descendente seguido por uma descarga de retorno ascendente (*dart-leader-return-stroke*, DL-RS). Tal sequência de líder e de descarga de retorno é semelhante à sequência do relâmpago nuvem-solo natural (RAKOV; UMAN, 2003, p. 244).

---

<sup>12</sup> Existe uma distância crítica a partir da extremidade (~15 m) onde o líder se desenvolve de modo autossustentável na presença de um campo elétrico maior que o de quebra de rigidez. Caso contrário, qualquer situação de descarga corona resultaria necessariamente em um relâmpago ascendente (Bazelyan et al., 1978 apud RAKOV; UMAN, 2003, p. 243).

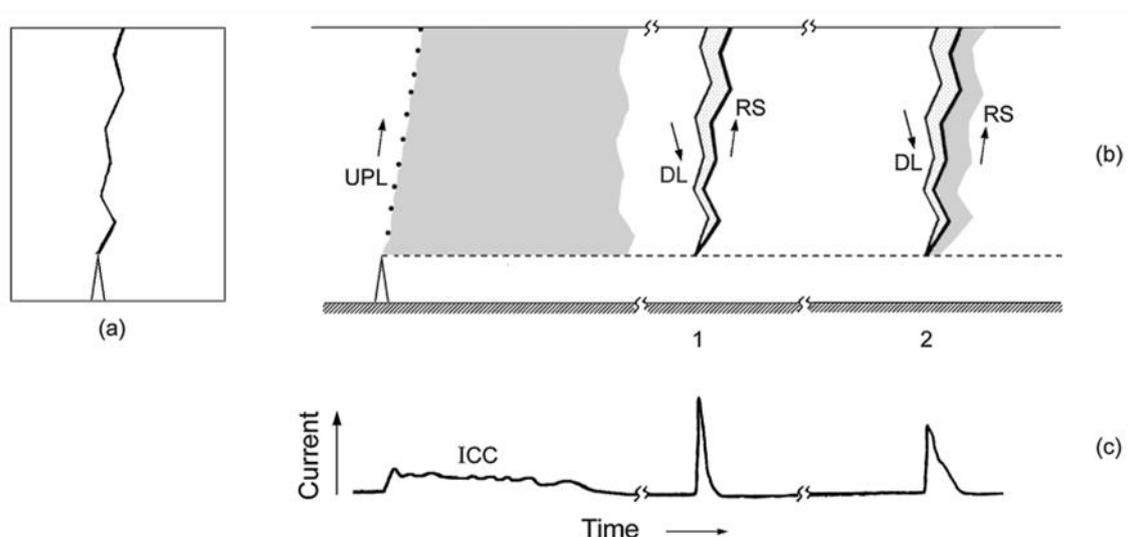


Figura 2.30 – Diagrama esquemático mostrando a luminosidade e a correspondente corrente na base do canal de um relâmpago ascendente negativo. (a) imagem fotográfica de filme estacionário, (b) imagem fotográfica de filme corrido, e (c) registro de corrente.

Fonte: Rakov e Uman (2003, p. 243).

As componentes impulsivas de corrente medidas no objeto aterrado podem ser divididas em três categorias: (i) pulsos sobrepostos à corrente contínua inicial (também chamados de componentes  $\alpha$ ), (ii) descargas de retorno (necessariamente precedidas por um intervalo de corrente nula e também chamados de componentes  $\beta$ ), e (iii) componentes M sobrepostas à corrente contínua que seguem as descargas de retorno (RAKOV; UMAN, 2003). A Figura 2.31 traz um registro de corrente contendo componentes impulsivas, onde é possível identificar (i) e (ii). O registro foi intencionalmente limitado em -2 kA para aumentar a resolução nos componentes de baixa corrente. O estágio inicial é composto pela corrente contínua inicial (*initial continuous current*) sobreposta por componentes impulsivos  $\alpha$  ( $\alpha$ -components). Em seguida, há uma sequência de 10 descargas de retorno (componentes  $\beta$  ou  $\beta$ -components), sendo a última seguida por uma corrente contínua longa.

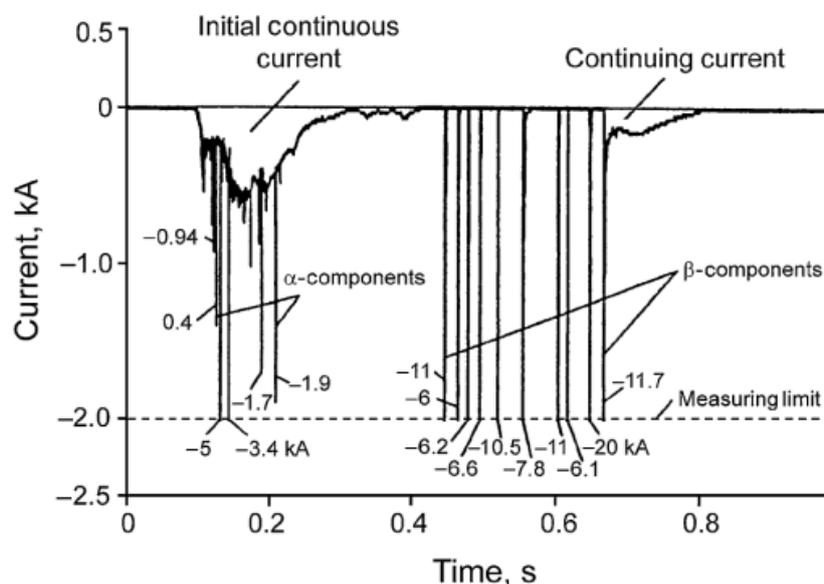


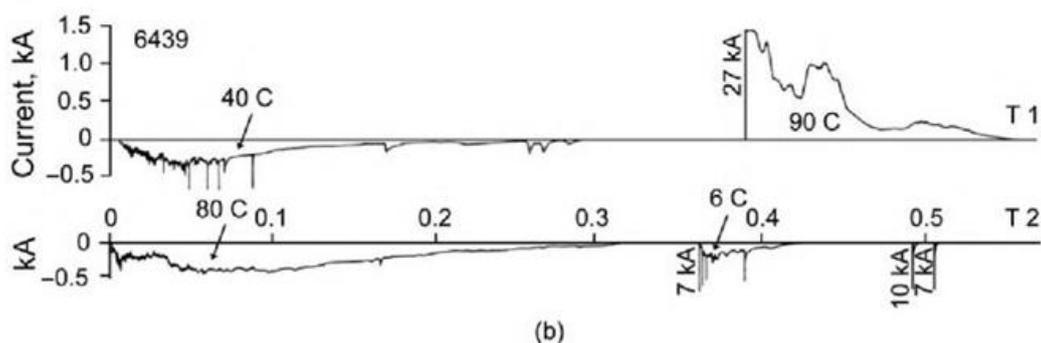
Figura 2.31 – Registro completo de corrente de um relâmpago ascendente negativo iniciado a partir da torre Peissenberg na Alemanha.  
 Fonte: Fuchs et al. (1998) apud Rakov e Uman (2003, p. 250).

Conforme Rakov e Uman (2003, p. 245-7), nos relâmpagos ascendentes (solo-nuvem), enquanto o relâmpago negativo (formado por um líder ascendente positivo) pode possuir ou não descargas de retorno, o relâmpago positivo (formado por um líder ascendente negativo) parece não as possuir. Os impulsos de corrente que se assemelham às descargas de retorno nos negativos parecem ser oriundos da conexão de canais do líder ascendente com canais do relâmpago intranuvem que o disparou.

A Figura 2.32 exhibe registros fotográficos e de corrente de um ascendente negativo concorrente a um bipolar, onde é possível observar os três tipos de componentes impulsivos.



(a)



(b)

Figura 2.32 – (a) Fotografia de dois relâmpagos ascendentes concorrentes originados a partir de duas torres no Monte San Salvatore (Suíça): um ascendente bipolar (torre da esquerda, T1) e um ascendente negativo (torre da direita, T2). (b) Registros de corrente medida em cada torre. A escala de tempo, que está em segundos, se aplica ao gráfico de cima.

Fonte: adaptado de Berger e Vogelsanger (1966) apud Rakov e Uman (2003, p. 248).

Quanto à corrente do líder, parece razoável esperar como comportamento geral, que comece carregando correntes de menor magnitude e, no final de seu desenvolvimento, carregue correntes de maior magnitude. Conforme Bazelyan e Raizer (2000, p. 100-102), o líder de laboratório e relâmpagos ascendentes tem quase sempre corrente crescente com o tempo. A corrente supre um líder que se alonga, portando e consumindo cada vez mais cargas.

Fisicamente, estas cargas são induzidas pelo campo elétrico da nuvem. Quando o líder se aproxima da nuvem, atravessando campos cada vez maiores, a densidade linear de carga induzida aumenta. Por outro lado, o líder sobe com uma velocidade crescente, reduzindo o tempo para o suprimento de carga (BAZELYAN; RAIZER, 2000).

Segundo Bazelyan e Raizer (2000), a combinação destes fatores aumenta a corrente, de cerca de 10 A quando inicia, até 200-600 A no final de sua propagação (como mostrado na Figura 2.33).

Não há razões para sugerir qualquer diferença principal entre correntes de líderes ascendentes e descendentes. Em ambos os casos, o líder é suprido por cargas induzidas pelo campo elétrico da nuvem de tempestade, e suas durações são comparáveis porque se movem aproximadamente na mesma velocidade (BAZELYAN; RAIZER, 2000).

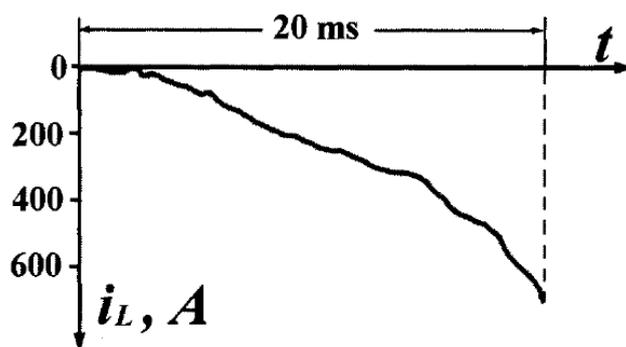


Figura 2.33 – Oscilograma esquemático da corrente do líder positivo ( $i_L$ ) de um relâmpago ascendente (negativo) na base do canal.

Fonte: Bazelyan e Raizer (2000, p. 101).

A Figura 2.34 mostra um mapa de fontes de radiação em VHF de um relâmpago (ascendente) disparado por foguete, que é semelhante ao ascendente negativo. As fontes estão coloridas de acordo com o tempo de ocorrência, do azul (início) até o vermelho (término). O relâmpago durou 640 ms, alcançando 7,5 km de altitude e se estendendo sobre uma área horizontal de 13x13 km. Gráfico disposto como o da Figura 2.26. A velocidade de propagação dos ramos foi medida na faixa de  $1-3 \times 10^4$  m/s. As primeiras detecções ocorreram quando “o canal do líder ascendente tinha  $\sim 700$  m de comprimento e havia se dividido em cinco ramos [principais], segundo as imagens da câmera rápida” (EDENS et al., 2012). Os ramos tornaram-se praticamente horizontais a partir do

momento em que entraram na região de carga negativa situada entre 6-7 km de altitude. A polaridade positiva do líder foi inferida pelos registros de campo elétrico.

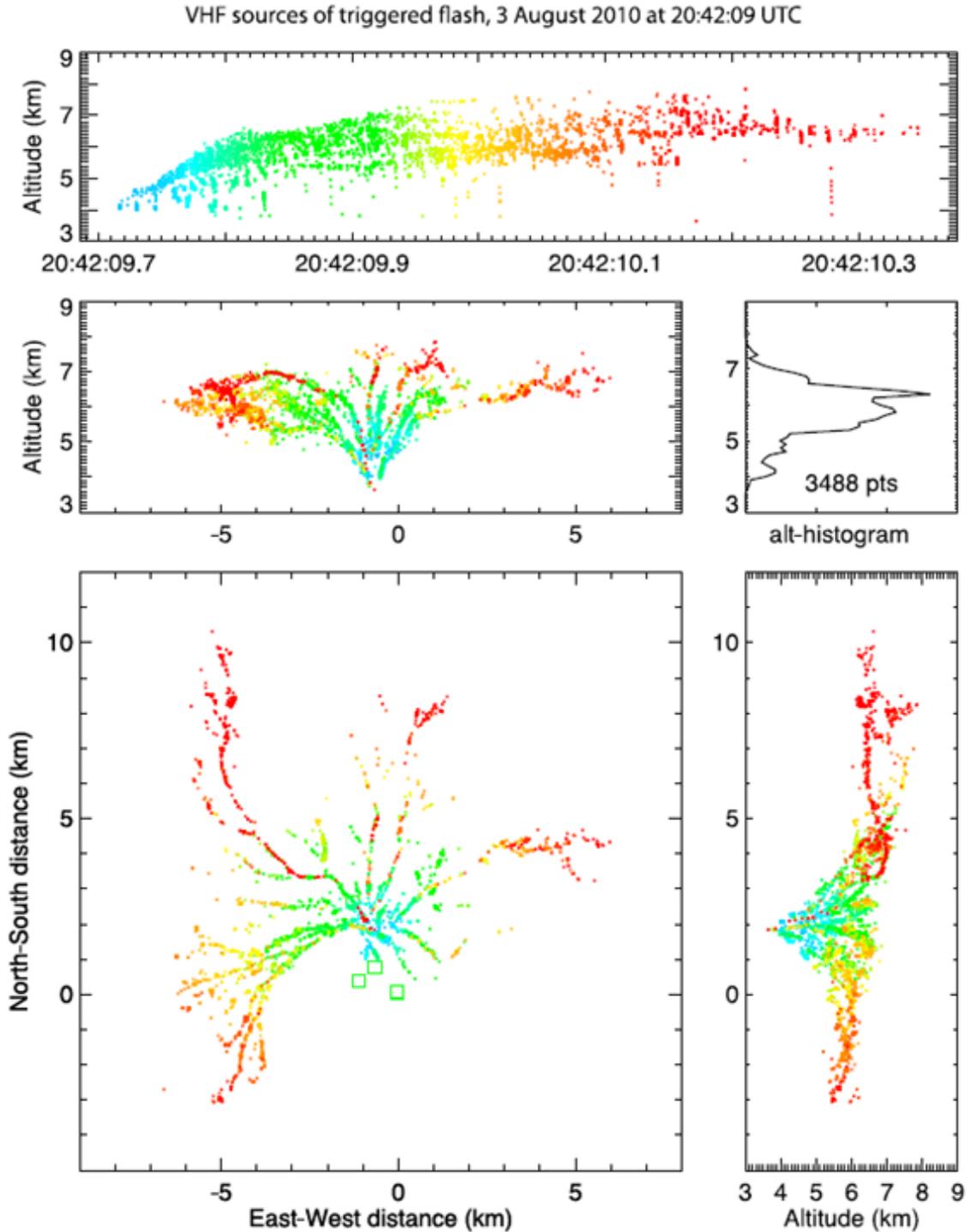


Figura 2.34 – Visão tridimensional das fontes mapeadas de VHF de um relâmpago ascendente disparado por um foguete no Novo México, EUA. Fonte: Edens et al. (2012).

## 2.5. O líder de recuo

O líder de recuo é um processo ainda pouco conhecido e compreendido (MAZUR; RUHNKE, 2013) e, comparado aos outros processos do relâmpago revisados neste trabalho, foi o menos estudado até então. Nesta seção, são apresentadas observações e características conhecidas do líder de recuo, bem como a identificação que tem sido feita deste com outros processos do relâmpago. Alguns modelos de sua formação são também revisados.

### 2.5.1. Observações e características do líder de recuo

Ogawa e Brook (1964), baseados em observações fotográficas de relâmpagos nuvem-ar, identificaram processos nas extremidades dos líderes positivos (chamados então de *streamers*<sup>13</sup>) que propagavam ao longo dos canais em direção à fonte (origem ou tronco do líder) em relâmpagos intranuvem. Chamaram tais processos de “*streamers* de recuo negativos” (*negative recoil streamers*) e os compararam à descarga de retorno que segue o líder contínuo nos relâmpagos nuvem-solo.

Registros mais recentes de líderes positivos fora da nuvem obtidos através de câmeras rápidas foram capazes de elucidar ainda mais a natureza do líder de recuo. Líderes de recuo foram filmados em líderes positivos de relâmpagos nuvem-solo positivos (SABA et al., 2008; 2009; 2013) e em relâmpagos ascendentes negativos (WARNER, 2012; WARNER et al., 2012a; SABA et al., 2012). A Figura 2.35 mostra imagens do líder positivo de um relâmpago nuvem-solo apresentando líderes de recuo, que retraçam caminhos previamente feitos pelo líder descendente.

---

<sup>13</sup> Até o presente momento, parece ainda haver uma indiscriminada alternância no uso dos termos “*streamer*” e “líder” para as rápidas movimentações de carga dentro da nuvem, como utilizado em Zhu et al. (2014). Neste trabalho é usado preferencialmente o termo líder em tal contexto.

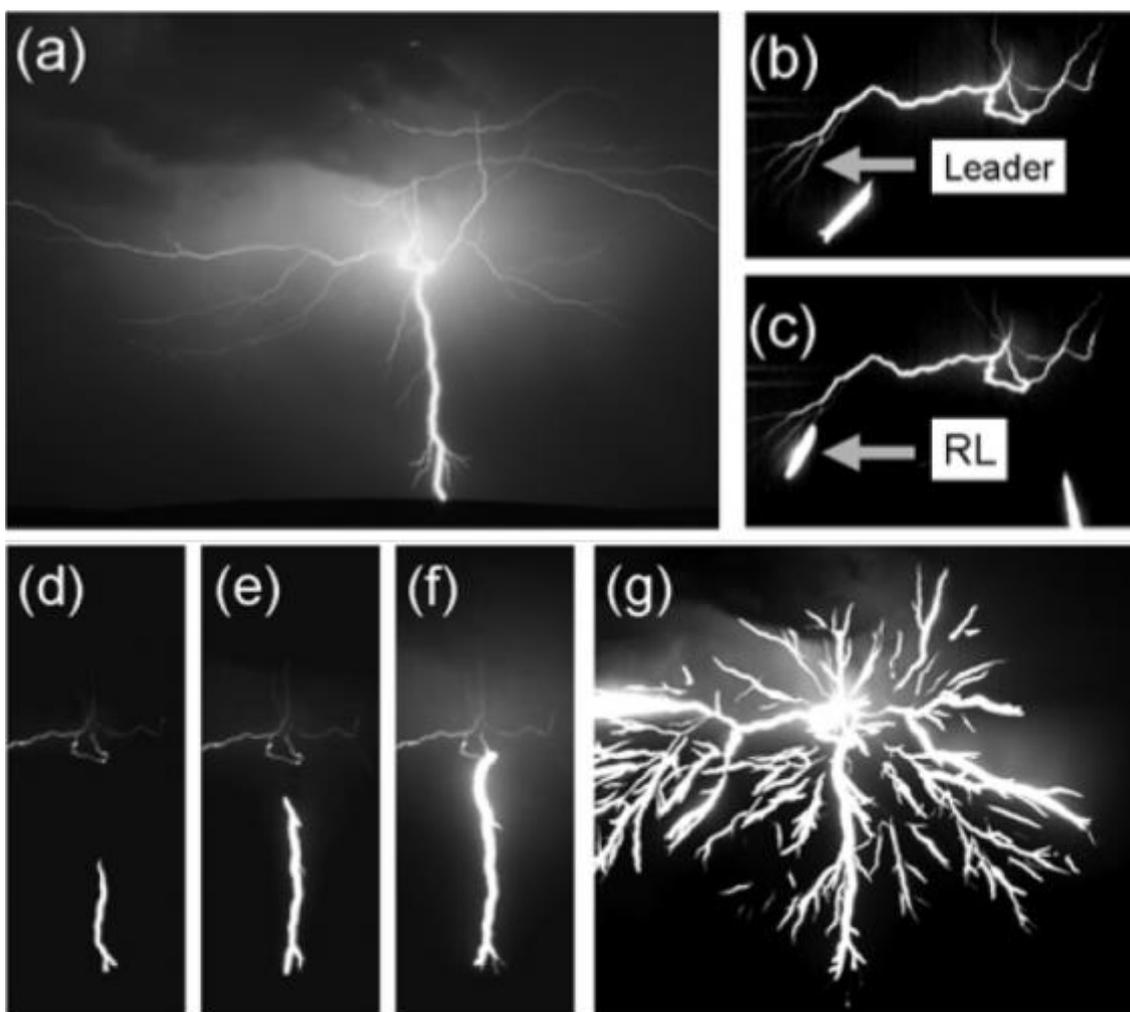


Figura 2.35 – Imagens de um relâmpago nuvem-solo positivo exibindo extensos canais horizontais e ramificações ao longo do canal vertical, ocorrido em 22 de julho de 2007, South Dakota (EUA), a 16 km de distância. (a) fotografia (ISO 400, f/11). (b-f) quadros da câmera rápida de 135  $\mu$ s de exposição (7.200 quadros/s): (b) e (c) exemplos de líderes de recuo (RL) retrazendo um ramo do líder positivo fraco e ainda visível. (d-f) movimento retrógrado do líder de recuo em direção à origem do líder positivo. (g) imagem resultado da integração de todos os quadros durante a descida do líder positivo. Fonte: adaptado de Saba et al. (2008).

De acordo com Saba et al. (2008), em sua análise de sete relâmpagos nuvem-solo positivos observados com câmeras rápidas, os líderes de recuo começaram a ocorrer de 45 a 120 ms antes da conexão do líder positivo no solo e a imediata descarga de retorno, e que propagaram em direção retrógrada à origem do líder positivo. Warner et al. (2012b) relatam, para o líder positivo ascendente de relâmpagos solo-nuvem, que o tempo mínimo entre a iniciação do líder e o primeiro líder de recuo (LR) observado foi

6,2 ms, sendo o valor médio de 22,8 ms. Altura mínima acima do topo da torre para a ocorrência do primeiro LR foi 155 m, tendo valor médio de 539 m.

A iniciação do líder de recuo está associada com a interrupção da corrente no ramo do líder positivo em que ocorrerá, *i.e.*, em um ramo em decaimento, como observações de Mazur (2002, p. 1403), Mazur e Ruhnke (2011, p. 99), Krehbiel e Wang (2011), Warner (2012), Warner et al. (2012a, 2012b) e Mazur et al. (2013) sugerem<sup>14</sup>. Nestes estudos, o nível de luminosidade dos ramos, instantes antes da ocorrência do líder de recuo, pareceu ser imperceptível pela câmera ou desprezível, o que sugere um nível de corrente nulo ou insignificante.

Quanto à velocidade de propagação do líder de recuo (LR) ou do processo correspondente antes de haver esta terminologia, Ogawa e Brook (1964) a estimaram em  $2 \times 10^6$  m/s; Shao et al. (1995) mediram valores na faixa de  $10^6$  a  $10^7$  m/s; Saba et al. (2008) relatam que a maioria destes apareceu somente em um quadro a 7.200 quadros/s, o que lhes permitiu estimar uma velocidade mínima de propagação de  $4 \times 10^6$  m/s; Warner et al. (2012a) encontraram valores de  $4,5 \times 10^6$  m/s até  $1,4 \times 10^7$  m/s, com médias aritmética de  $1,4 \times 10^7$  m/s e geométrica de  $9,1 \times 10^6$  m/s; Warner et al. (2012b) relatam velocidade mínima de  $3,82 \times 10^6$  m/s, máxima de  $1,89 \times 10^7$  m/s e média de  $4,53 \times 10^6$  m/s. Tais valores referem-se às velocidades de propagação em duas dimensões e da extremidade negativa do LR, que é bastante expressiva opticamente. Vale notar que tais valores de velocidade do líder de recuo são coerentes com os valores típicos do líder contínuo ( $1-2 \times 10^7$  m/s).

Quanto à corrente envolvida no líder de recuo, há muito pouca informação presente na literatura. Ogawa e Brook (1964) estimaram valores entre 1.000 e 4.000 A. Mais recentemente, Saraiva et al. (2014a) estimaram picos de corrente de líderes de recuo em

---

<sup>14</sup> De modo análogo, o processo de interrupção da corrente no canal (*channel cutoff* ou *current cutoff*) é comumente observado em relâmpagos nuvem-solo negativos, naturais e induzidos por foguete, com múltiplas descargas de retorno antes da sequência líder-contínuo-descarga-de-retorno (MAZUR, 2002). Mazur e Ruhnke (2012) afirmam que “a interrupção da corrente nos canais do relâmpago é uma parte essencial do ciclo de vida de todos os tipos de relâmpagos, e desempenha um papel crucial na maneira como um relâmpago se desenvolve. No entanto, isto não foi seriamente investigado e ainda é mal compreendido”, mesmo para a interrupção que ocorre na base do canal junto ao solo.

dois relâmpagos NS bipolares (cada um contendo 191 e 90 líderes de recuo, respectivamente), relacionando valores de luminosidade na imagem da câmera rápida com valores do pico de corrente da descarga de retorno do mesmo raio detectado pela rede de detecção de relâmpagos BrasilDat. Encontraram, dentre os 281 casos, valores mínimo e máximo de 0,5 kA e 7,7 kA, respectivamente, e média geométrica de 1,06 kA.

Os líderes de recuo observados em líderes positivos de relâmpagos ascendentes através de câmeras rápidas possibilitam registros visualmente mais claros de toda a estrutura do líder, *e.g.*, Mazur e Ruhnke (2011), Saba et al. (2012), Warner (2012) e Warner et al. (2012a).

A Figura 2.36 mostra um registro de Mazur e Ruhnke (2011) da formação de um novo ramo (*new branch*) até sua interrupção (*cut off*) no líder ascendente. A Figura 2.37 traz um registro do líder de recuo que ocorreu no novo ramo da Figura 2.36. Em (A) ocorre o início do líder de recuo. Em (B) o líder de recuo conecta com o canal do líder ascendente. Em (B-D) ocorre a progressão ascendente do ramo em questão e a intensificação da luminosidade (componente M) do canal principal junto à torre (máxima em C). Os autores interpretaram tal evento como sendo um evento M, que teria resultado em uma componente M no canal principal, enquanto este possuía luminosidade (corrente) até a torre.

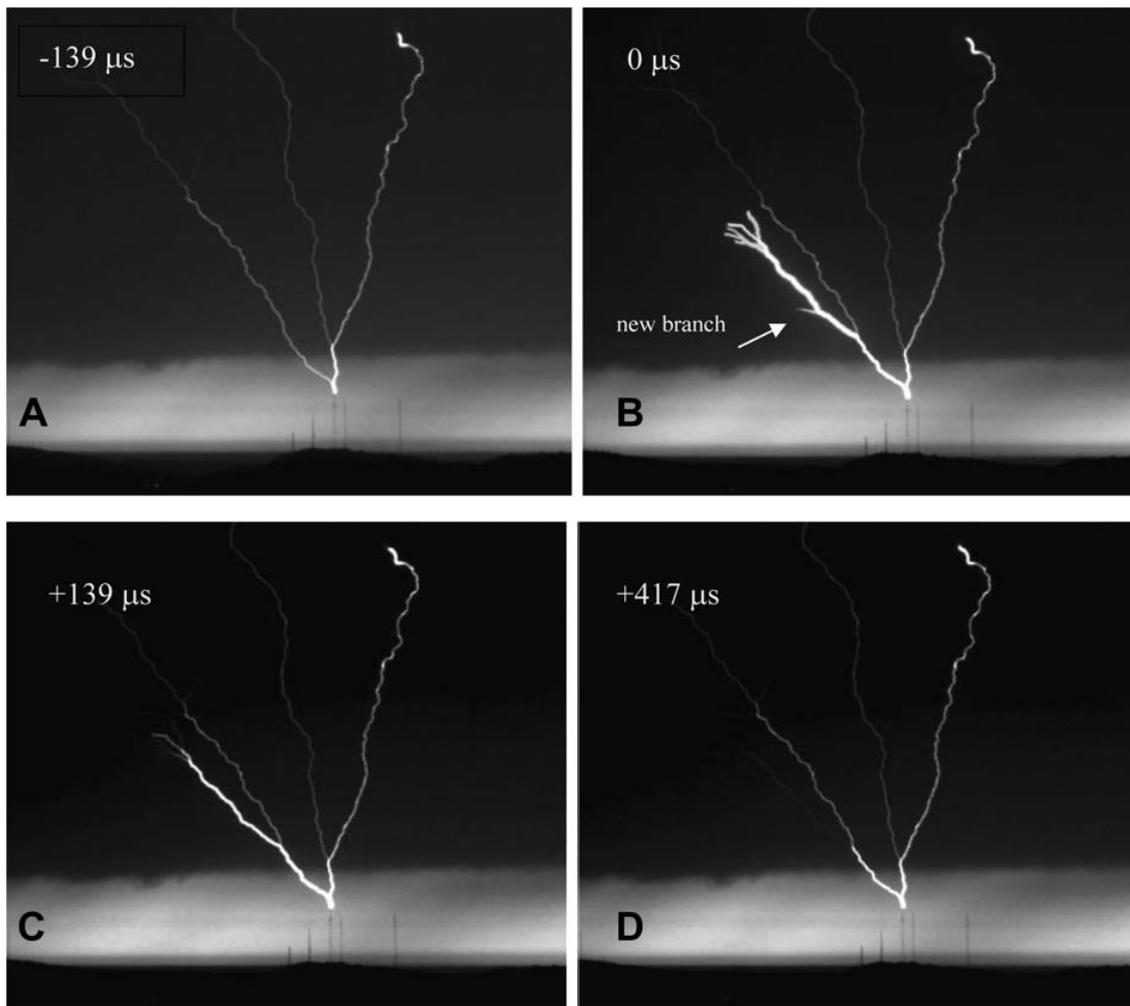


Figura 2.36 – Desenvolvimento e decaimento de um novo ramo no líder positivo ascendente ocorrido a partir de uma torre de TV em Rapid City, South Dakota, EUA. Sequência de imagens obtidas por uma câmera rápida a 7.200 quadros/s, com intervalo entre quadros de 139  $\mu$ s. Fonte: adaptado de Mazur e Ruhnke (2011).

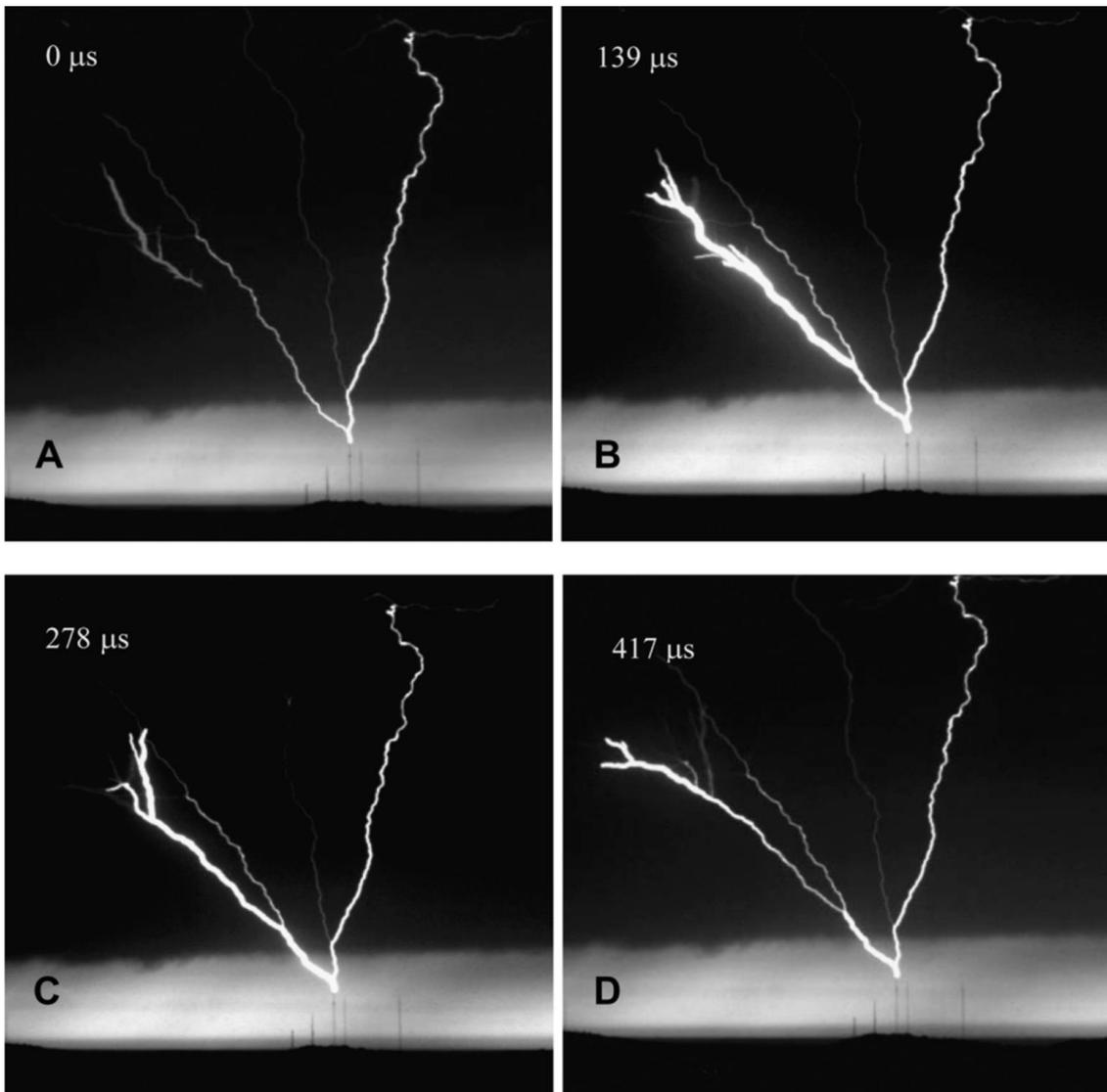


Figura 2.37 – Interação de um líder de recuo, formado em um ramo decaído (mostrado na Figura 2.36), com o canal existente de um líder positivo ascendente originado em uma torre de TV.

Fonte: adaptado de Mazur e Ruhnke (2011).

Trabalhos recentes, *e.g.*, Ferro (2008), Warner et al. (2012a; 2012b) e Mazur et al., (2013), apresentaram fortes evidências em vídeo com elevada resolução temporal de que o líder de recuo (LR) é bipolar e bidirecional, diferentemente da natureza somente negativa e unidirecional relatada até então. A Figura 2.38 apresenta um registro onde é possível notar esta característica em um registro de Mazur et al. (2013). O início do líder de recuo se dá 10 ms após a (suposta) interrupção de corrente no respectivo ramo. E a conexão do LR com o tronco do líder ascendente acontece após 185,2 μs de seu

início. Deste total, é possível notar o desenvolvimento bidirecional nos primeiros 129,64  $\mu\text{s}$  (Figura 2.38, quadros 1-7). Os autores chamam este período de “primeira fase” (inicial). Na “segunda fase”, a parte carregada positivamente para de propagar porque a diferença de potencial entre sua extremidade (ponta) e o ambiente fica menor do que o valor mínimo requerido para a propagação de um líder, e a parte negativa continua sua propagação em direção ao ponto de ramificação (Figura 2.38, quadros 8-10), durante 55,56  $\mu\text{s}$ . O LR, por fim, produziu um evento M, e uma componente M ao se conectar com o tronco portando corrente.

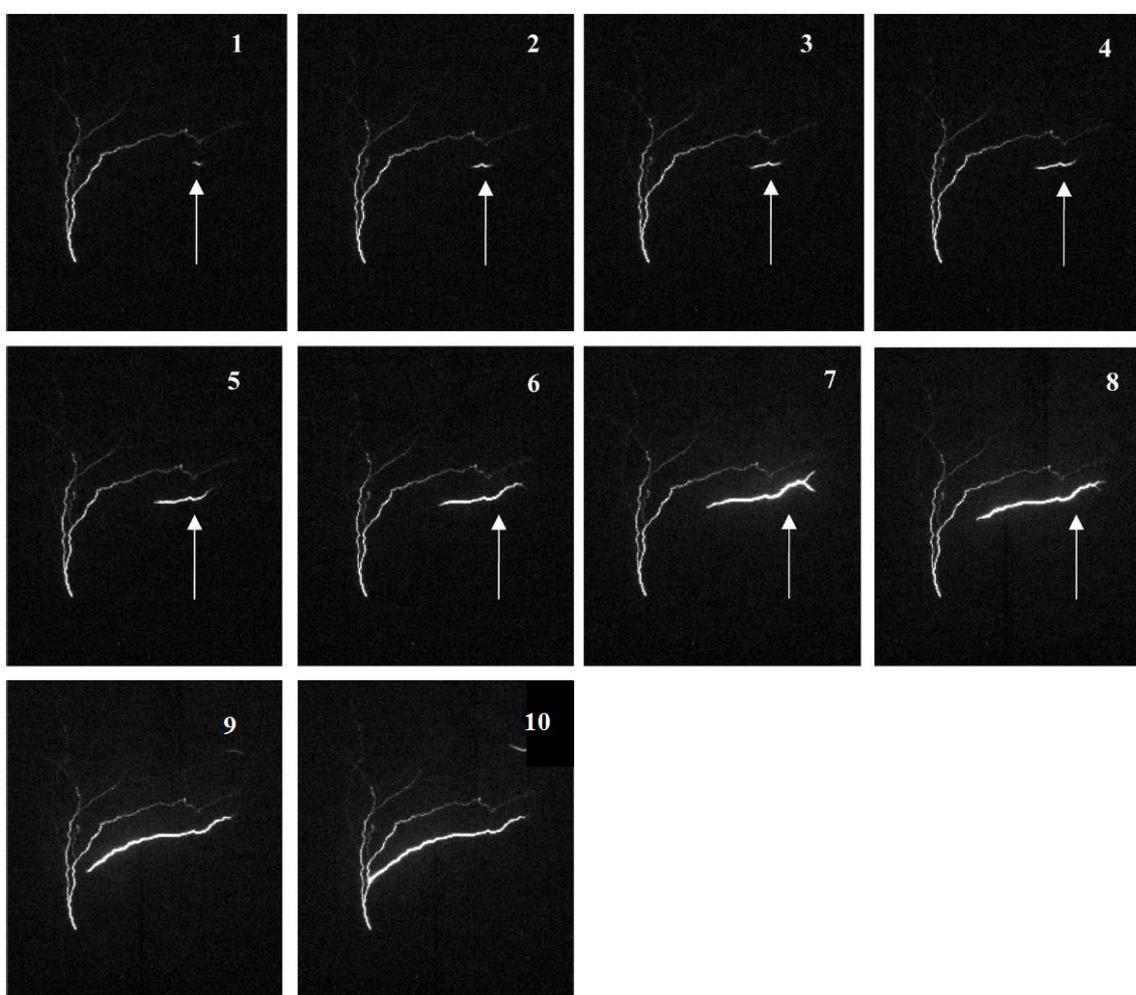


Figura 2.38 – Desenvolvimento de um líder de recuo ao longo de um ramo decaído do líder ascendente obtido através de uma câmera rápida a 54.000 quadros/s (intervalo entre quadros de 18,52  $\mu\text{s}$  e exposição de 18,12  $\mu\text{s}$ ). A seta (1-8) indica o ponto de início do líder de recuo, que se propaga de modo bidirecional. No quadro 10, o líder de recuo encontra um ramo condutor e iluminado (evento M).

Fonte: adaptado de Mazur et al. (2013).

A Figura 2.39 contém os registros de campo elétrico e magnético e de luminosidade referentes ao evento M da Figura 2.38. Mazur e Ruhnke (2013) comentam que, como o desenvolvimento de ambas as partes do líder de recuo (bipolar) é simultâneo, o sensor de campo elétrico (Figura 2.39a) registra somente a variação negativa produzida tanto pelas cargas negativas se aproximando do canal principal (contribuição maior), quanto pela parte carregada positivamente mais distante e se afastando do sensor (contribuição menor). A conexão do líder de recuo ao canal principal produz um evento M, que é caracterizado por um surto sobreposto à corrente presente no mesmo canal, identificado pelo pulso de campo magnético (Figura 2.39b), pela excursão positiva no campo elétrico (Figura 2.39a) e também pela renovada iluminação do novo ramo localizado no traçado do ramo antigo e decaído (Figura 2.39c).

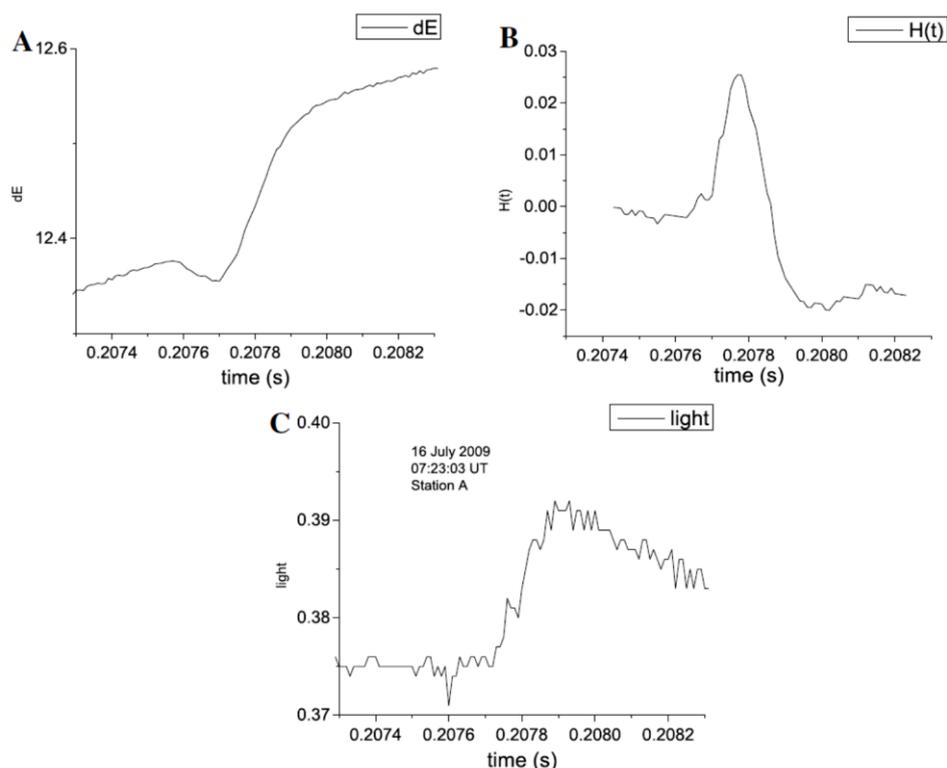


Figura 2.39 – Registros de um evento M produzido pelo líder de recuo da Figura 2.38. (A) A variação de campo elétrico ( $dE$ ) negativa indica a aproximação da extremidade negativa do líder de recuo, e a variação positiva indica um evento M. (B) A variação de campo magnético ( $H$ ) mostra o pulso de corrente de um evento M que se seguiu a conexão do líder de recuo com o antigo ponto de ramificação. (C) Pulso de luminosidade ( $light$ ) correspondente ao pulso de corrente do evento M.

Fonte: Mazur e Ruhnke (2013).

Mazur e Ruhnke (2013) comentam que as análises já realizadas, baseadas em variações de campo elétrico ou em mapeamento de fontes de radiação através da técnica de “tempo de chegada” (*time-of-arrival*, TOA), não permitem identificar a parte positiva do líder de recuo, que emite radiação em baixa intensidade. Os autores explicam que o evento registrado foi um caso observado em condições especiais para tal: o ramo do líder se desenvolveu em um plano perpendicular à câmera e a resolução temporal da câmera foi alta o suficiente (54.000 qps).

Outro registro mostrando a propagação bidirecional do líder de recuo (LR) em dois casos de um mesmo relâmpago é apresentado por Warner et al. (2012a) na Figura 2.40. As setas horizontais indicam desenvolvimento ou ativação de ramos após a conexão do líder de recuo com a torre. “A extremidade negativa propaga-se para a esquerda em direção à torre enquanto a extremidade positiva prossegue somente uma curta distância para a direita”. As conexões do líder de recuo com a torre resultaram em um pico de corrente da DR estimado em (a) -8,1 kA e em (b) -15,1 kA. Os valores são estimados pela rede americana de detecção de relâmpagos (NLDN).

Este mesmo registro mostra também o comportamento complexo que um líder de recuo pode apresentar, especialmente acerca da interação dos ramos decaídos. Em ambos os casos, após o líder de recuo propagar até a torre (quadros a.9 e b.4 da Figura 2.40) e ocasionar descarga de retorno subsequente, seguiu-se uma frente de luminosidade em direção às pontas do líder ascendente. Tal frente de luminosidade aparece acompanhada de progressão ou certa ativação de ramos decaídos de modo descontínuo, indicada pelas setas horizontais na Figura 2.40. Sobre a interação entre tais ramos, Warner et al. (2012a, p. 12) afirmam acerca da Figura 2.40b:

Devido ao longo tempo de exposição de 135  $\mu$ s, não está claro se as duas últimas iluminações dos ramos são resultado dos novos líderes de recuo que se formaram nos ramos decaídos devido ao aumento de potencial experimentado pelo ramo novamente reconectado. [...] usando velocidades de gravação mais altas, foram observados líderes de recuo adicionais formando-se nos ramos secundários decaídos dos ramos do líder positivo reconectados novamente. Quando estes se conectam com o ramo novamente ionizado e ainda luminoso, resulta em iluminação ao longo do ramo e do canal principal (WARNER et al. 2012a, p. 12).

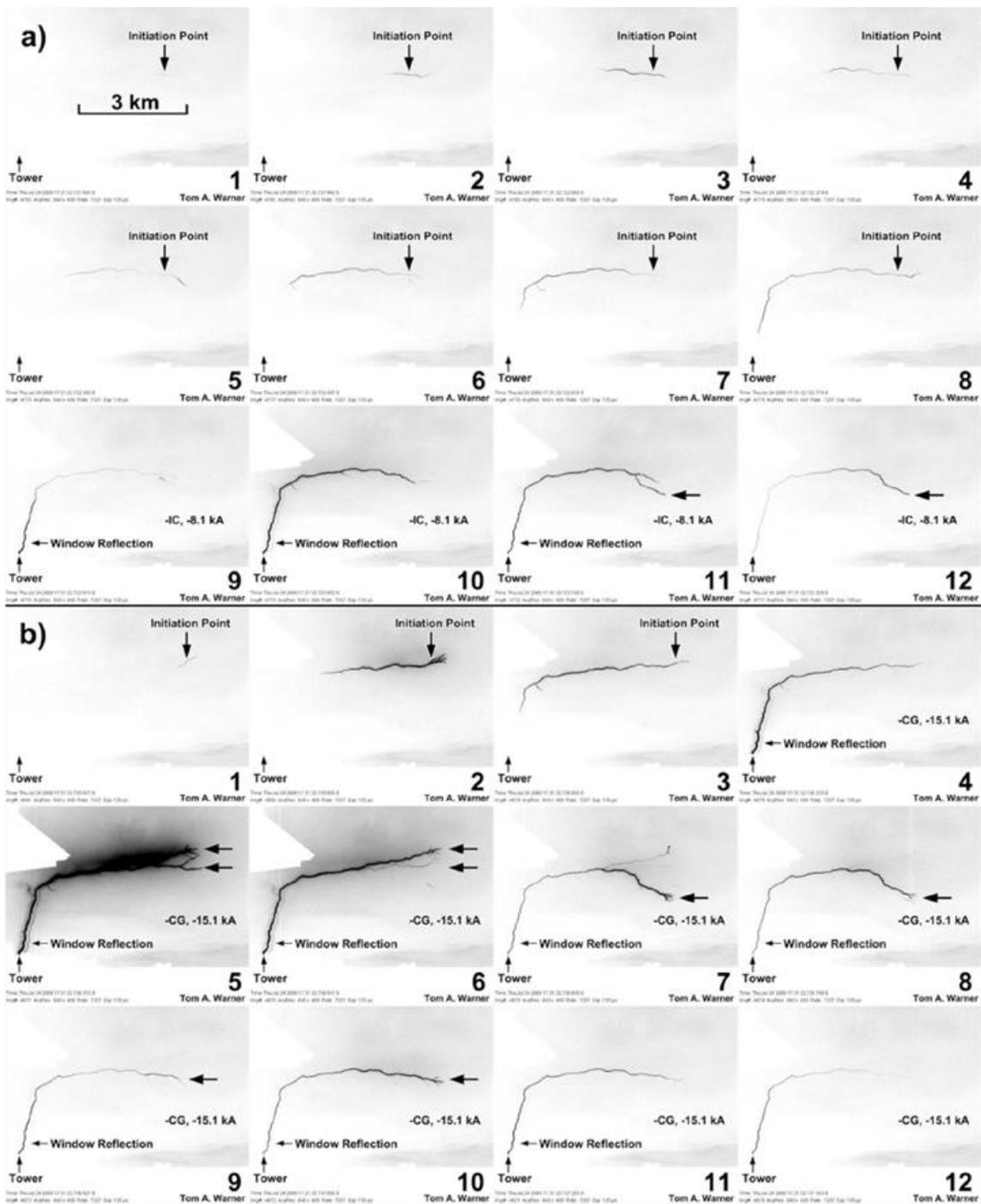


Figura 2.40 – Quadros de câmera rápida (7.207 qps, exposição de 135  $\mu$ s) mostrando o ponto de iniciação (*initiation point*) e o desenvolvimento de dois líderes de recuo (a e b), separados entre si por 13 ms, ao longo do mesmo ramo de um líder ascendente a partir de uma torre (*tower*) em Rapid City, South Dakota, EUA.  
 Fonte: Warner et al. (2012a).

Quanto à conexão dos líderes de recuo com o ramo portando corrente, Saba et al. (2012) e Warner et al. (2012b) relataram líderes de recuo que não se conectaram ao canal ativo

do líder (“malsucedidos”). Nem todos os líderes de recuo, portanto, mostram ter energia suficiente para propagar até o ponto de ramificação mais próximo ou até o canal ativo (portando corrente). As Figuras 2.41 e 2.42 mostram inúmeros líderes de recuo através da integração de muitos quadros. É possível identificar líderes de recuo que conseguiram atingir o tronco principal do líder ascendente, enquanto outros não foram capazes, tornando-se aparentemente desconectados e, por vezes, com menor luminosidade.



Figura 2.41 – Quadros de câmera rápida (4.000 qps, exposição de 250  $\mu$ s) integrados no tempo mostrando líderes de recuo que retraçaram ramos decaídos. Relâmpago ocorrido em 15/01/2012 no Pico do Jaraguá, São Paulo, SP.  
Fonte: adaptado de Saba et al. (2012).

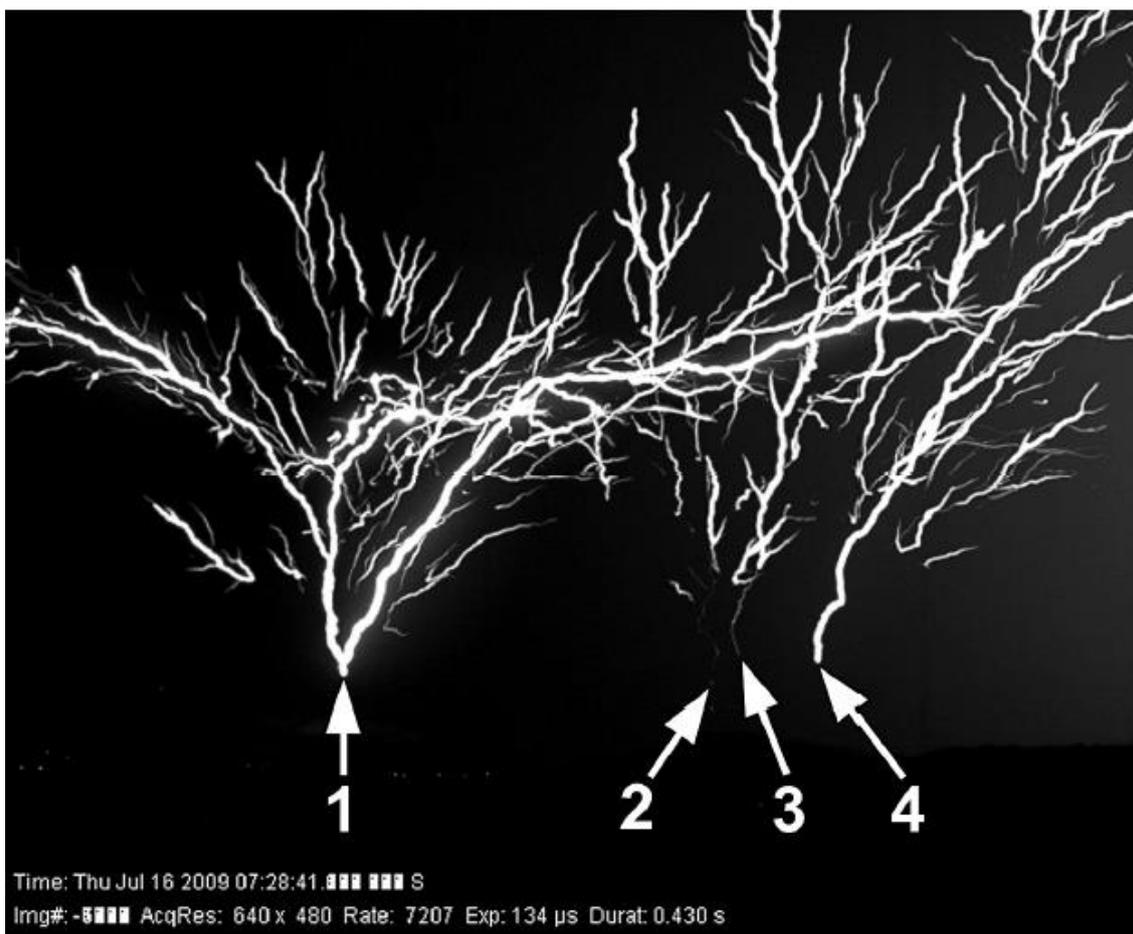


Figura 2.42 – Trecho de um vídeo de câmera rápida (7.207 qps, 134  $\mu$ s de exposição) integrado no tempo mostrando o desenvolvimento prolífico de luminosos líderes de recuo nos ramos fracamente luminosos de quatro líderes ascendentes.  
Fonte: Warner et al. (2012b).

Além dos trabalhos citados de Mazur et al. (1995), Shao et al. (1995) e Mazur (2002) (comentado na seção 2.6), outros trabalhos também observaram o líder de recuo e/ou fenômenos similares através do mapeamento de fontes de radiação em VHF-UHF, como por exemplo, Shao e Krehbiel (1996) e Akita et al. (2010) em relâmpagos intranuvens, e Krehbiel (2011) e Yoshida et al. (2012) em relâmpagos induzidos por foguete.

Baseado em observações deste tipo dentro da nuvem, Krehbiel e Wang (2011) comentam que enquanto o líder positivo possui múltiplos ramos simultaneamente ativos, o líder negativo se desenvolve através de um ramo dominante por vez. Sugere, a partir disso, que o primeiro possui canais menos condutivos do que o segundo, tendo

quebra de rigidez fundamentalmente diferente um do outro. Os autores afirmam também que a quebra de rigidez do líder positivo é essencialmente a mesma para relâmpagos nuvem-solo negativos e intranuvens de polaridade normal (o que ocorre entre os dois centros principais de carga em uma nuvem de tempestade com estrutura tripolar clássica).

### **2.5.2. Associação do líder de recuo com outros processos conhecidos**

Malan e Schonland (1951 apud RAKOV; UMAN, 2003, p.188) foram os primeiros a sugerir que a maior parte dos processos K de um *ground flash* poderia ser vista como líderes subsequentes falhos. De acordo com Rakov e Uman (2003, p. 188), após algumas décadas, Hayenga (1984), Rhodes e Krehbiel (1989), Shao et al. (1995) e Mazur et al. (1995) detectaram fontes de radiação em VHF associadas a eventos-K (processos K) em relâmpagos nuvem-solo se comportando como líderes contínuos falhos (sem conexão com o solo).

Em um relâmpago nuvem-solo negativo, Ferro (2008) através de registros de câmera rápida reporta líderes de recuo em ramos expostos do líder positivo na nuvem propagarem em direção ao solo, até o momento em que um deles se transforma em líder contínuo e ocasiona uma descarga de retorno subsequente.

Em Mazur e Ruhnke (2011, p. 99; 2013, p. 763), os autores identificam o líder de recuo com as antigas denominações “variação K” e “*streamer* de recuo”. Mazur e Ruhnke (2013) comentam que “[...] usando a palavra recuo [*recoil*], a hipótese de Ogawa e Brook (1964) [sobre as observações de “reiluminação” em direção retrógrada] identificou as variações K com os canais do líder positivo que as precediam”.

Zhu et al. (2014) inferiram a partir de suas observações através de antenas de campos elétrico e magnético e emissões em VHF que “os processos K podem ser vistos como líderes negativos”, e que somente líderes envolvendo apreciável transferência de carga poderiam ser identificados nos registros de campo elétrico como variações K do tipo degrau/rampa.

Tais trabalhos sugerem que processos identificados como K, líderes subsequentes “falhos” (*unsuccessful* ou *attempted leaders*), líderes contínuos e eventos M seriam essencialmente o mesmo, exceto que os dois últimos propagariam até o solo. Rakov e Uman (2003, p. 185) ressaltam que a similaridade entre estes processos se aplica a seus comportamentos dentro da nuvem, enquanto os mecanismos de propagação no canal até o solo do líder contínuo e da componente M “são aparentemente bem diferentes”.

Warner (2013), agrupando as diversas denominações dadas aos processos de redesenvolvimento de um ramo positivo (decaído), sugere que há mais variação de denominação do que de natureza do processo: *recoil streamer*, *recoil leader*, *K-streamer*, *K-event*, *K-leader*, *K-process wave* (onda do processo K), *K-wave* (onda K), *negative retrograde leader* (líder retrógrado negativo) e *dart leader* (WINN et al., 2012).

Mazur (2002, p. 1394) sugere a interpretação dos então chamados *streamers* de recuo (*recoil streamers*) como líderes de recuo (LR):

A presente interpretação dos *recoil streamers* é que estes são líderes negativos, *i.e.*, descargas autopropagantes movendo-se ao longo de caminhos previamente desenvolvidos das partes carregadas positivamente dos líderes bidirecionais e de carga líquida zero. Como líderes negativos, eles deveriam ser chamados mais apropriadamente de líderes de recuo [*recoil leader*] ao invés de *streamers* de recuo [*recoil streamers*]. (*Streamers* são filamentos frios de corona de comprimento de alguns metros, enquanto líderes são canais de plasma quente e autopropagáveis<sup>15</sup>).

Krehbiel e Wang (2011) e Edens et al. (2012 apud VAN DER VELDE e MONTANYÀ, 2013) ainda sugerem a nomenclatura *retrograde negative leader* (líder negativo retrógrado) ou *retrograde breakdown* (quebra de rigidez retrógrada) ao invés de “*recoil*” *leader* (líder de recuo). Krehbiel (2011) sugere também os termos *channel ‘instability’* (instabilidade do canal) ou *‘reconnection’ breakdown* (quebra de rigidez de reconexão) ao invés de *recoil* (recuo).

---

<sup>15</sup> O autor aqui usa os termos “corona” e “*streamer*” de modo inverso quando comparado a Rakov e Uman (2003, p. 5), onde “uma corona ou descarga de ponta [*point discharge*] consiste de inúmeros *streamers* individuais”, e também a Gallimberti *et al.* (2002, p. 1336), onde “a corona consiste de um número de canais ramificados estreitos (*streamers*) que se desenvolvem a partir de uma raiz comum”.

A partir de observações com câmeras rápidas com taxas maiores que 10.000 qps, Warner (2013) relatou o que chamou de *prograde leader* em ramos de líder negativo, que seria redesenvolvimento de um ramo decaído no sentido do tronco para a extremidade do ramo (sentido inverso do líder de recuo). O autor sugere categorizar tanto o *prograde leader* quanto o líder de recuo em um grupo chamado “líderes de redesenvolvimento” de canais de líder previamente existentes.

Em português, a expressão “recuo” traz a ideia de retrocesso, o que de fato não ocorre no líder positivo, mas sim seu redesenvolvimento. Ferro (2008) identificou o líder de recuo em um relâmpago nuvem-solo negativo de múltiplas DRs e usou alternativamente a nomenclatura “líder de retorno”. No presente trabalho, porém, é usado o termo “líder de recuo”, por ser a tradução direta do termo mais comum (*recoil leader*).

### 2.5.3. Modelos e hipóteses sobre a formação o líder de recuo

O primeiro modelo de líder de recuo foi provavelmente proposto por Mazur e Ruhnke (1993)<sup>16</sup>. Mazur e Ruhnke (1993 apud MAZUR, 2002) propuseram um mecanismo para explicar a formação do *recoil leader* logo após a interrupção da corrente estabelecida pelo canal do líder aplicando um modelo eletrostático de líder bidirecional, de carga líquida zero e com carga monopolar. Dois processos contribuem para este mecanismo: (i) a conservação de carga aprisionada no canal após sua interrupção de corrente e (ii) a indução de cargas no canal condutivo flutuante pelo campo elétrico ambiente (descrita detalhadamente em Mazur e Ruhnke, 1998).

Mazur e Ruhnke (2013) explicam que Mazur e Ruhnke (1993) “propuseram um modelo rudimentar [*crude model*] da formação do líder de recuo em líderes positivos”, ilustrado na Figura 2.43. (A) líder descendente logo antes de tocar o solo; seu potencial  $\Phi_1$  é negativo e a carga líquida é zero. (B) processo da descarga de retorno; transferência do potencial do canal do líder de  $\Phi_1$  para o potencial zero do solo é equivalente a depositar uma carga positiva uniforme ao longo do canal, adicionando isto às cargas induzidas no

---

<sup>16</sup> Rakov e Uman (2003, §12.3) revisam modelos de líderes contínuos, que não contemplam o líder de recuo ou qualquer processo de redesenvolvimento do líder positivo, mas especialmente a parte final de propagação em direção ao ponto de contato no solo.

líder antes da conexão. (C) líder mais descarga de retorno; o potencial no canal da descarga de retorno é zero e sua distribuição de cargas é máxima na extremidade superior, o que leva ao desenvolvimento do líder positivo e consequente alongação do canal. (D, E e F) desenvolvimento do canal condutivo e flutuante do líder após a interrupção de corrente na parte inferior do canal. Note a decrescente densidade de carga da carga aprisionada (destacada pela linha fina), a decrescente (com reversão de sinal) carga na parte inferior do líder em desenvolvimento e a crescente diferença de potencial entre a parte inferior ( $\Phi_{0l}$ ) e a superior do canal ( $\Phi_1$ ). E continuam explicando que:

A essência do modelo é que, após a interrupção de corrente, o canal do líder positivo continuaria sua extensão na extremidade superior enquanto a extremidade inferior resfriaria e perderia sua condutividade, mantendo sua carga residual líquida positiva. Tornando-se um condutor flutuante no campo elétrico ambiente, o líder obtém cargas induzidas que se distribuem como um dipolo em adição à carga residual positiva existente. O crescimento deste dipolo de cargas resultaria no crescimento de carga negativa ao longo da extremidade inferior do canal em decaimento. O processo pode levar à quebra de rigidez negativa na extremidade inferior do canal condutivo e à formação do líder de recuo. Este líder propagará em direção ao solo ao longo de um caminho preferencial feito de remanescentes do canal do líder positivo decaído (MAZUR; RUHNKE, 2013).

Mazur (2002), ainda comentando o mecanismo proposto por Mazur e Ruhnke (1993), explica que a carga aprisionada no canal após sua interrupção de corrente (neste caso, a carga depositada pela descarga de retorno) vai se alongando e, assim, decrescendo sua densidade por unidade de comprimento, devido à alongação do líder dentro da nuvem. Enquanto a carga induzida na parte inferior do canal condutor flutuante muda em direção a um valor negativo, o efeito combinado da alongação da carga aprisionada e da indução faz com que a carga total na parte inferior decresça, mude de polaridade e então cresça (na polaridade oposta). O efeito deste processo é observado como uma rápida recuperação do campo elétrico próximo à ocorrência do relâmpago (Figura 2.43ABC).

O potencial do canal condutivo superior e flutuante se aproxima do potencial da nuvem, enquanto que o canal não condutivo inferior conectado ao solo permanece com potencial zero (Figura 2.43DEF). Esta diferença de potenciais próxima ao redor do

ponto de interrupção de corrente pode produzir um campo elétrico suficiente para iniciar uma quebra de rigidez (MAZUR, 2002). Mazur e Ruhnke (1993) sugerem que isto iniciaria um novo líder negativo do ponto de interrupção do canal em direção ao solo. “O potencial do novo líder, identificado como um *streamer* de recuo negativo, seria determinado primariamente pelo potencial da parte superior condutiva do canal antigo”.

Os autores admitem que “este modelo conceitual não abordou vários detalhes dos processos físicos envolvidos”, deixando espaço para diferentes interpretações, e que não há ainda confirmações através de observações na natureza (MAZUR e RUHNKE, 2013).

Williams e Heckman (2012), comentando sobre o local de origem típico dos líderes de recuo como sendo a extremidade do canal em decaimento e não o ponto de contato da ramificação, assinalam que o canal

[...] totalmente iluminado (seguindo a extensão do líder de recuo) mostra um maior grau de distância da origem do que era aparente para o canal antes da interrupção, consistente com a visão comum de que a extensão do canal sustentado no campo elétrico da nuvem era responsável pela tensão [*re-stressing*] aplicada sobre o canal previamente interrompido.

Pilkey et al. (2013) explicam que também suas observações de eventos K, líder contínuo e componente M através de dados de LMA mostram “inconsistência com o mecanismo de iniciação do líder negativo [como os autores chamam o líder de recuo] sugerido por Mazur e Ruhnke (1993)”. Em todos os casos analisados, os autores perceberam que os “líderes negativos são iniciados próximos às extremidades dos canais previamente desenvolvidos pelo líder positivo”. Na visão de Pilkey et al. (2013), a iniciação do líder negativo ocorre “quando as pontas do líder positivo encontram pacotes discretos e localizados de carga negativa próximos das extremidades dos canais do líder positivo”. Afirmam também que suas “observações são consistentes com as observações interferométricas de Shao et al. (1995)”.

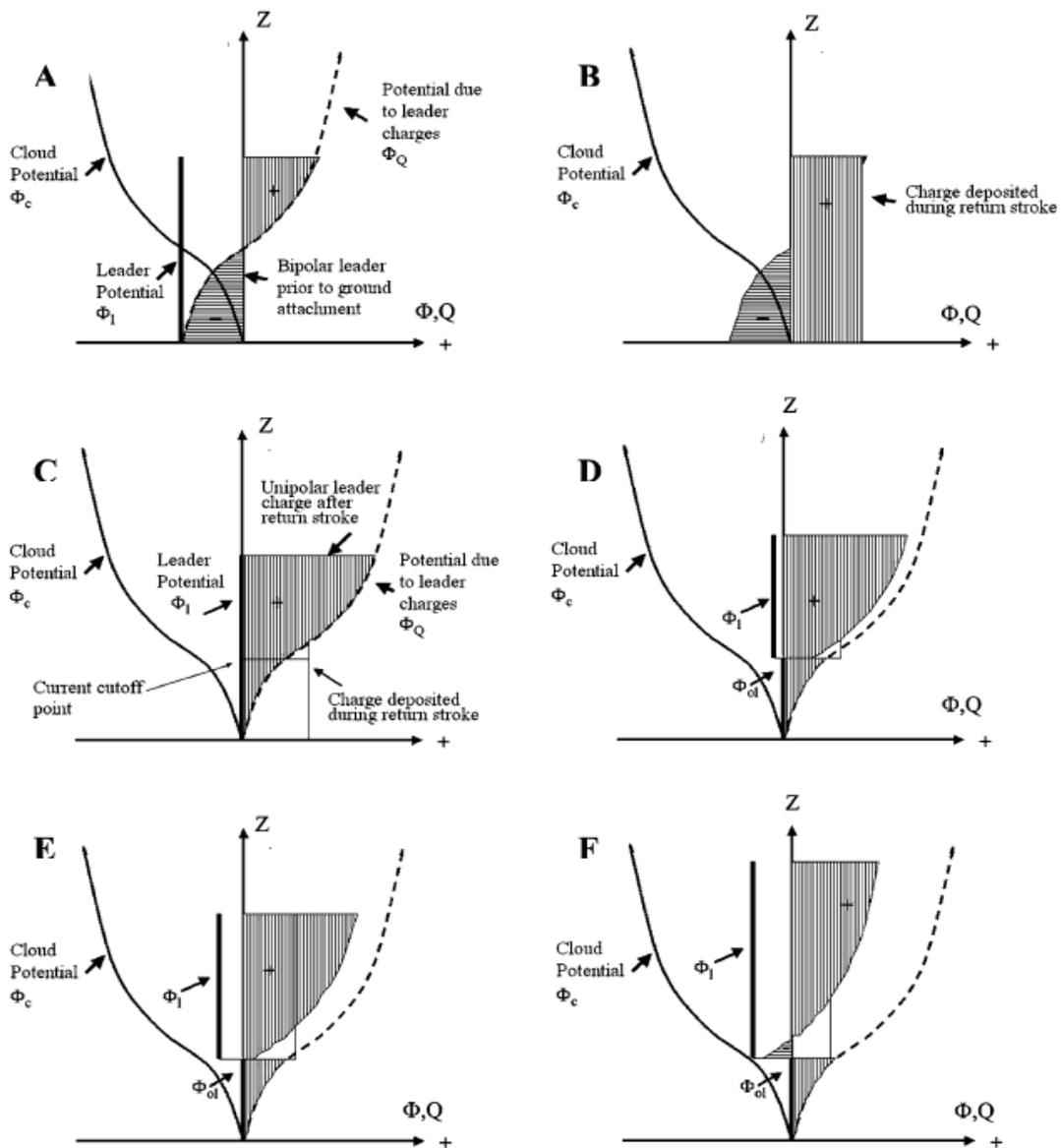


Figura 2.43 – Evolução das distribuições de carga ( $Q$ ) e função de potencial ( $\Phi$ ) no canal do líder-descarga de retorno antes, durante e após a conexão no solo para um relâmpago nuvem-solo negativo em função da altitude  $Z$  (os hachurados vertical e horizontal marcam cargas induzidas positivas e negativas respectivamente).  
Fonte: Mazur (2002).

Mazur e Ruhnke (2011) elaboraram um modelo eletrostático simplificado de evento M que produz uma componente M envolvendo a modelagem de um líder de recuo. Os autores afirmam que este seria o primeiro modelo eletrostático do tipo na literatura, incluindo líderes contínuos. Este modelo está baseado no conceito do líder bidirecional de carga líquida zero e nas seguintes suposições:

- a) O potencial ambiente linearmente crescente, portanto, campo elétrico ambiente constante. A distribuição de carga ao longo do canal vertical condutor espelha a distribuição de potencial ambiente;
- b) As cargas associadas com qualquer canal de líder são produzidas pela zona de streamers corona na ponta do líder em desenvolvimento durante a fase de transição streamer-líder;
- c) A zona de streamers corona produz um envelope de corona com o canal do líder de diâmetro muito menor dentro;
- d) O envelope de corona contém cargas estáticas que decaem com uma constante de tempo de relaxação que é muito maior que o tempo de vida do relâmpago;
- e) As cargas do canal antigo permanecem distribuídas de acordo com a distribuição de potencial ambiente;
- f) O antigo canal está no potencial do solo mesmo depois que a corrente acabou;
- g) O campo elétrico longitudinal no canal é desprezado porque este é muito menor do que o campo ambiente;
- h) A capacitância por unidade de comprimento do canal é assumida constante e o efeito das extremidades na mesma é desprezado.

Em seu modelo eletrostático, Mazur e Ruhnke (2011) consideram dois princípios básicos: (i) o líder de recuo e o líder contínuo são o mesmo processo físico, ambos percorrendo canais de líder previamente existentes, e (ii) descargas de retorno de relâmpagos nuvem-solo negativos oriundas de líderes contínuos tocando o solo são o mesmo processo físico que aquelas oriundas de líderes escalonados. O líder contínuo é considerado bidirecional, possui carga líquida nula e uma distribuição bipolar de cargas induzidas que espelham a distribuição de potencial ao longo do comprimento do canal (Figura 2.44). Um líder contínuo bipolar e bidirecional se desenvolve acima do ponto de interrupção da corrente e propaga-se para o solo (A). Transição da distribuição de carga durante a conexão do líder com o potencial zero do solo, com carga positiva depositada uniformemente no canal do líder pela descarga de retorno (B). Distribuição final das cargas do canal da descarga de retorno subsequente (C).

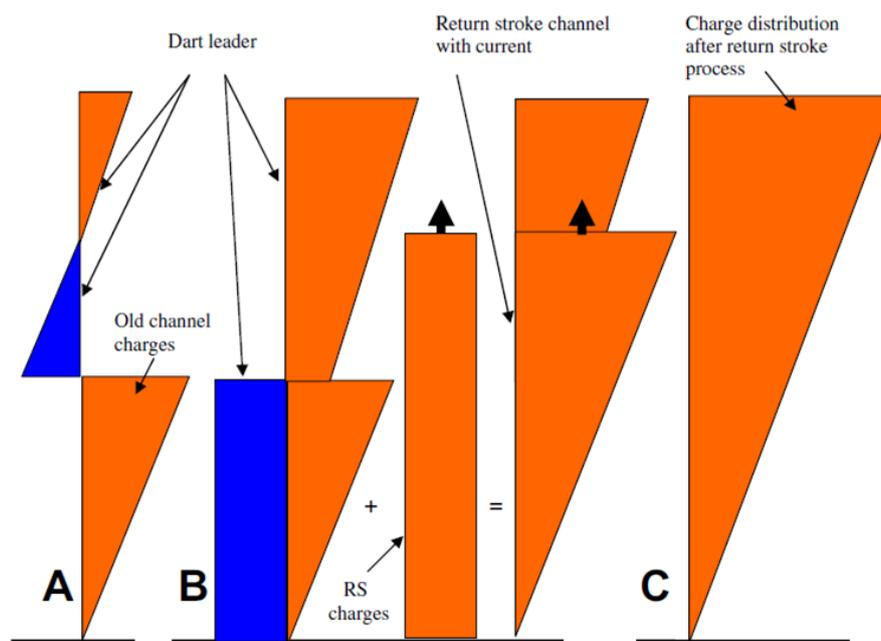


Figura 2.44 – Representação eletrostática simplificada da sequência líder contínuo e descarga de retorno em um relâmpago nuvem-solo negativo. Cargas positivas são vermelhas e as negativas azuis.

Fonte: Mazur e Ruhnke (2011).

O líder contínuo, segundo Mazur e Ruhnke (2011), utiliza um canal fracamente ionizado que está envolvido por cargas espaciais do envelope corona antecedente. Nem as cargas de relaxação, nem forças de Coulomb ou turbulência muda significativamente o envelope corona durante o tempo de vida do relâmpago. Tais cargas espaciais estão representadas na Figura 2.44A como a região carregada positivamente entre o líder contínuo e o solo. Como o canal decaído e pouco condutivo está no potencial do solo, o líder contínuo que o penetra produz por indução cargas uniformemente distribuídas no canal. A parte superior do líder permanece influenciada pelo potencial ambiente, de modo que suas cargas ficam distribuídas linearmente (Figura 2.44B). Até o instante de tocar o solo, a condição da distribuição de cargas bipolar no líder contínuo de carga líquida nula seria satisfeita, e a distribuição das cargas apenas mudam seu formato. Ao tocar o solo, todo o canal do líder adquire potencial zero, quando a descarga de retorno deposita carga positiva uniforme. O resultado destas distribuições é carga nula junto ao solo e carga máxima no topo (Figura 2.44C). Isto deixaria a distribuição de cargas no canal em equilíbrio com a distribuição de potencial ambiente.

Mazur e Ruhnke (2011) afirmam que o conceito físico do líder contínuo seria aplicável também ao líder de recuo que se conecta ao tronco portador de corrente de um líder positivo ascendente (componente M). Como no caso do líder contínuo, após a interrupção de corrente no ramo de um líder ascendente, seu antigo envelope corona permanece carregado (Figura 2.45A). Um líder de recuo bipolar e bidirecional que se desenvolve acima do ponto de interrupção da corrente, e cargas remanescentes ao longo do ramo decaído do líder ascendente (sem corrente ou emissão de luz) (A). Transição da distribuição de cargas durante a conexão ao tronco que está no potencial zero (B). A carga positiva uniforme é depositada ao novo ramo pela corrente fluindo no tronco. As setas indicam a direção da corrente no ramo reconectado, ex-líder de recuo. Distribuição final das cargas do líder ascendente com seu novo ramo (C).

Assim que o líder de recuo se conecta com o líder ascendente, corrente flui no ramo e, por adicionar uma carga líquida uniforme ao canal do líder de recuo, traz este a um potencial quase zero do canal portador de corrente do tronco (Figura 2.45BC). Isto transforma a distribuição bipolar de cargas no canal do líder de recuo em uma distribuição unipolar ao longo do novo ramo (Figura 2.45C).

A carga positiva adicional na extremidade superior do novo ramo leva à quebra de rigidez positiva e à alongação do ramo. A densidade de carga do novo ramo no nível da junção torna-se igual a do líder ascendente no mesmo nível. A corrente que flui do solo para o novo ramo é vista nos registros de vídeo como um brilho no ramo e na seção do tronco abaixo da ramificação. É importante notar que, durante a conexão do líder de recuo com o tronco, a distribuição de carga no tronco do líder ascendente abaixo do ponto de ramificação não se altera. Isto implica que a variação de campo elétrico medida no solo próximo ao canal registra somente a variação resultante da mudança de cargas no novo ramo situado acima do ponto de ramificação.

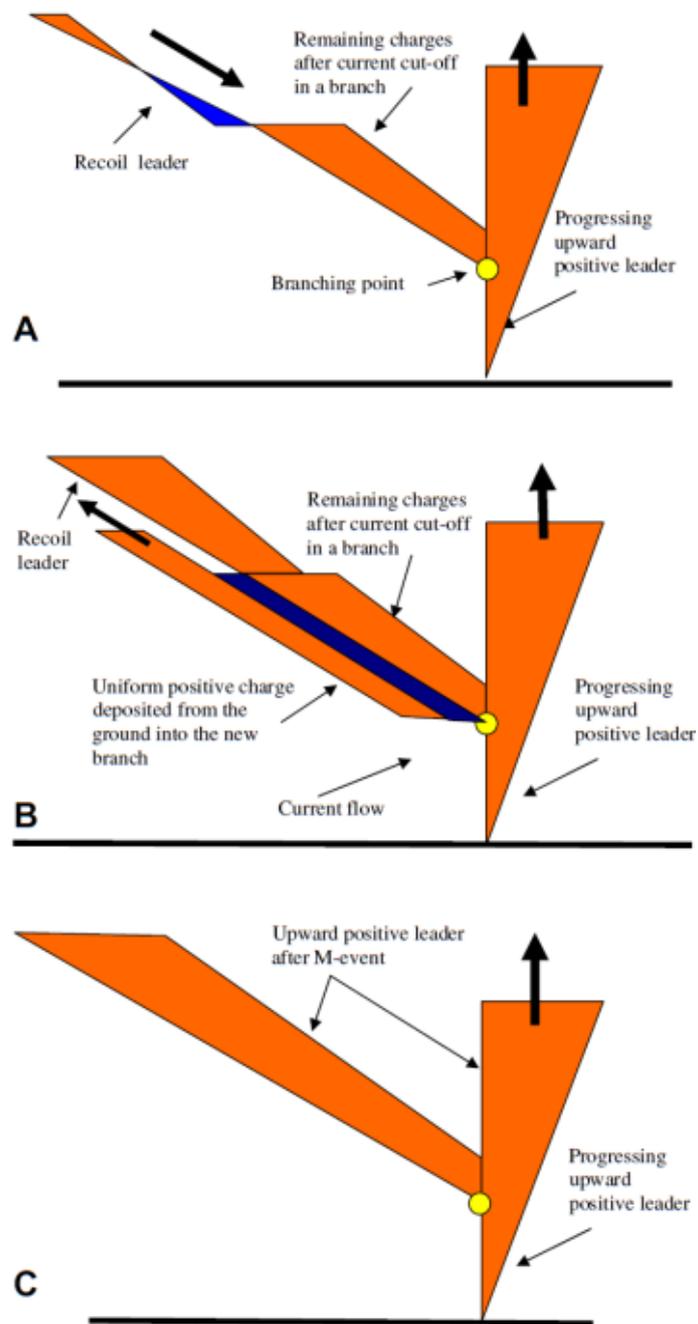


Figura 2.45 – Representação eletrostática simplificada das cargas durante a conexão de um líder de recuo e o canal de um líder ascendente. Cargas positivas são vermelhas e as negativas azuis.  
 Fonte: Mazur e Ruhnke (2011).

Van der Velde e Montanyà (2013) afirmam que os processos de recuo não foram incluídos ainda nos modelos [numéricos] de relâmpagos até então. Entretanto, em um artigo sucinto, L'Helgoualc'h et al. (2007) modelaram um líder positivo ascendente sob uma nuvem de tempestade até sua interrupção de corrente, considerando *streamers*

(líderes) de recuo nos ramos decaídos. Seria o primeiro modelo numérico de líder de recuo e incluído em um modelo de relâmpago. A corrente em cada ramo é computada até quando seu valor cai abaixo de um valor mínimo. Ocorre um rápido decréscimo de sua condutividade e a diferença de potencial no ponto de interrupção entre os canais é monitorada até que alcance um valor crítico, quando ocorre a reconexão (líder de recuo). Os autores mostram curvas de corrente do tronco (base) do líder com durações de cerca de 100 ms e amplitudes máximas entre 400 e 700 A, mas não contemplando intervalos sem corrente (interrupções e reativações do canal principal). Em tal modelo, os autores não deixam muito claro o que causaria a interrupção da corrente no tronco do líder, já que um maior número de ramos resultaria em princípio em um nível maior de corrente.

Ballarotti et al. (2012a) desenvolveram um modelo numérico basicamente eletrostático do relâmpago nuvem-solo negativo com descargas de retorno subsequentes, estas geradas, por sua vez, por líderes de recuo. No modelo, a cada 20 ms, um valor randômico de campo elétrico (entre 0 e 3 MV/m) é aplicado sobre o canal decaído (de determinado comprimento), desde o solo até o ramo do líder positivo. Um líder contínuo (propagante até o solo) surgiria somente se o campo elétrico ambiente aplicado sobre o ramo fosse maior que o campo de quebra de rigidez. O campo elétrico, por sua vez, foi calculado pela expressão sugerida por Borovsky (1995) para um canal em equilíbrio de pressão no ambiente atmosférico:

$$E_{QR} \approx 2 \cdot 10^6 \cdot 300/T \quad \text{Eq. (2.1)}$$

Onde:

$E_{QR}$ : campo elétrico de quebra de rigidez (V/m);

T: temperatura do canal do relâmpago (K).

A forma de decaimento da temperatura do canal utilizada pelos autores foi aquela desenvolvida no modelo de Uman e Voshall (1968) para o canal abaixo da nuvem e após a descarga de retorno.

## **2.6. O relâmpago como líder bidirecional e seus processos essenciais**

São apresentados a teoria do líder bidirecional para o desenvolvimento inicial dos canais do relâmpago e os processos essenciais que seriam comuns a todos os relâmpagos. Esta teoria, desenvolvida principalmente por Vladimir Mazur, procura desenvolver uma visão mais essencial e unificadora da estrutura e dos processos do relâmpago.

Segundo Mazur (2002), o conceito do líder bidirecional como base para a compreensão do relâmpago foi introduzido por Heinz Kasemir (KASEMIR, 1950), e verificado décadas depois através de medidas de relâmpagos induzidos por aviões (MAZUR, 1989). Ferro (2008, cap. 7) revisa e discute este assunto também. Mazur (2002) explica que:

A essência deste conceito é que a iniciação do relâmpago na nuvem eletrificada ocorre como um líder bidirecional, bipolar e de carga líquida zero e como uma descarga sem eletrodos. Tal processo de iniciação acontece nos relâmpagos intranuvem, nuvem-solo, induzidos por aeronaves e por foguetes pelo método de altitude (onde o fio fica isolado do solo).

Segundo Cooray (2003, p. 152), o conceito de líder bidirecional considera para o relâmpago nuvem-solo negativo que:

Um canal (provavelmente na periferia externa do centro principal negativo da nuvem) propaga carregado negativamente para baixo enquanto um canal carregado positivamente penetra no centro negativo. A carga líquida nos canais do líder seria zero com cargas negativas concentradas na parte inferior e positivas na superior. Todas as cargas móveis são criadas no canal e, enquanto o líder progride, pode ser considerado que não há movimento das cargas da nuvem.

Pode ser entendido também que, enquanto os ramos superiores positivos progridem, cargas negativas seriam transferidas do centro negativo da nuvem para o líder negativo, sustentando-o. Os líderes positivo e negativo, estando ligados, se autossustentariam durante o desenvolvimento inicial. O transporte de cargas entre os líderes, bem como a origem das cargas que formam a corrente nos ramos do líder, são ainda pouco compreendidos de modo geral. A geração de cargas durante a ionização que ocorre na ponta do líder durante sua propagação talvez seja o principal ou o processo mais

conhecido de fornecimento de corrente no líder (GALLIMBERTI et al., 2002), mas outros processos poderiam participar.

Analogamente à geometria de uma árvore, o líder de uma polaridade formaria a copa e o líder de outra a raiz. A Figura 2.46 mostra fotografias do relâmpago induzido por um avião e uma descarga em laboratório, onde é possível observar a geometria da árvore. À esquerda, fotografia de um relâmpago induzido por um avião atuando como eletrodo e tronco da árvore das duas terminações. À direita, fotografia de filme corrido do desenvolvimento simultâneo dos líderes positivo e negativo a partir das extremidades de uma haste metálica de 50 cm de comprimento em um campo elétrico uniforme: (1) haste; (2,3) canal e zona de *streamer* do líder positivo; (4-5) o mesmo para o líder negativo. O tempo está indicado em microssegundos. Os relâmpagos possuiriam tal estrutura exceto os relâmpagos ascendentes e raios induzidos por foguete com condutor aterrado (método clássico).

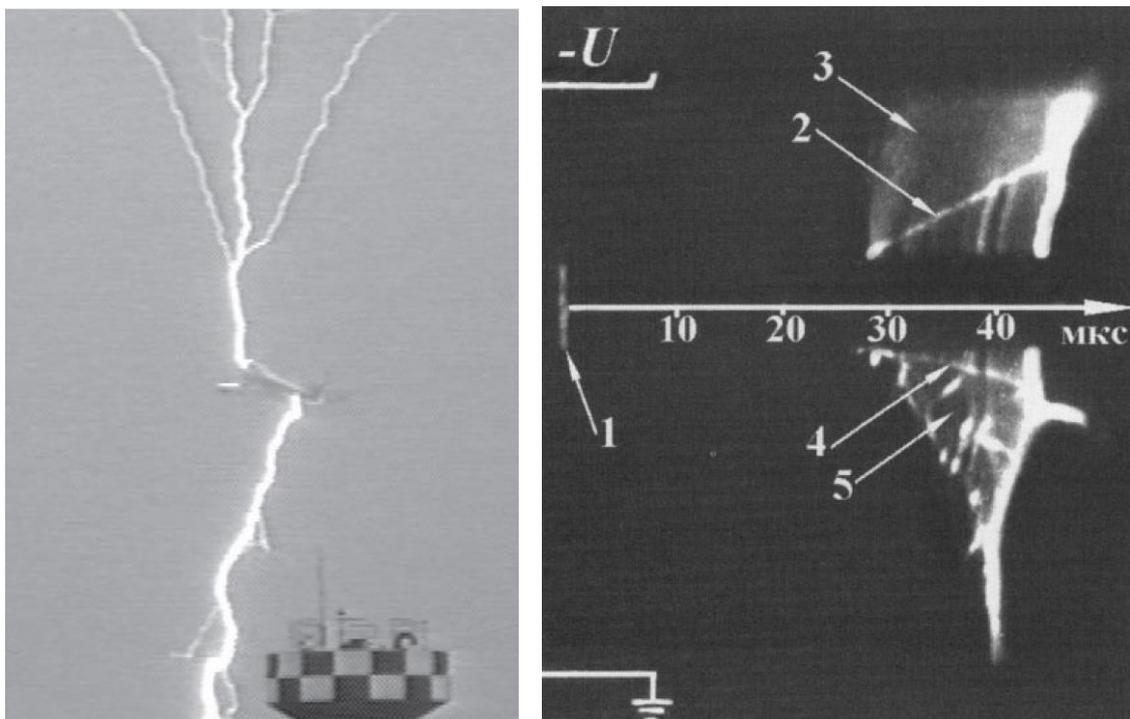


Figura 2.46 – Imagens de descargas elétricas mostrando o desenvolvimento bidirecional dos líderes.

Fonte: adaptado de Williams e Heckman (2012) e Bazelyan e Raizer (2000, p. 111), respectivamente.

Segundo Mazur (2002), foi possível descobrir a dinâmica do desenvolvimento do relâmpago na escala da nuvem através da aplicação do conceito do líder bidirecional na interpretação de mapas de fontes de radiação de relâmpagos, sendo o líder de recuo um componente essencial. O mapeamento das fontes de radiação do relâmpago pôde ser obtido pelas técnicas Diferença do Tempo de Chegada (*Difference of Time-of-Arrival*, DTOA) e Interferometria. O sistema já citado LMA, segundo Edens et al. (2012), utiliza o DTOA e a potência do pico das emissões impulsivas em VHF (60-66 MHz) em janelas sucessivas de 10  $\mu$ s.

Conforme Mazur (2002), como a quebra de rigidez negativa é muito mais energética do que a positiva, o mapeamento das fontes em VHF-UHF não é simétrico para ambas as polaridades, o que prejudica a visualização dos líderes positivos. A exceção é a potente quebra de rigidez positiva que ocorre na extremidade superior do canal da descarga de retorno nos nuvem-solo negativos após a onda de potencial do solo alcançar chegar na extremidade. A visualização de ramos dos líderes positivos é facilitada pelos líderes de recuo que os percorrem. Avanços mais recentes na tecnologia do LMA, *e.g.*, Krehbiel e Wang (2011) e Edens et al. (2012), mostram que quebra de rigidez positiva tem sido cada vez mais detectada e a progressão do líder positivo é observada, mesmo antes da ocorrência dos líderes de recuo.

### **2.6.1. O desenvolvimento do relâmpago nuvem-solo**

Segundo Mazur (2002), o líder bidirecional dos relâmpagos nuvem-solo negativo e positivo se desenvolveria de modo invertido, mas essencialmente igual, e descreveria o que ocorre até o contato do líder com o solo. Em seguida, a descarga de retorno promoveria o desenvolvimento unidirecional do relâmpago dentro da nuvem que, após a interrupção de corrente do canal, seria reativada pelos líderes de recuo.

A Figura 2.47 mostra um mapa de radiação típico de um relâmpago nuvem-solo negativo com os ciclos de líder, escalonado ou contínuo, se propagando em direção ao solo, seguido de líderes positivos dentro da nuvem (reconhecidos principalmente pela presença de líderes de recuo). Os líderes escalonados (*stepped leaders*) começaram a uma altitude de 6 km, primeiro terminando no ar e então tocando o solo em 50,5 s. As

quatro descargas de retorno estão marcadas com o símbolo  $\Delta$  na abscissa e os líderes de recuo estão indicados (*recoil leaders*). Os líderes contínuos negativos são virtualmente invisíveis ao mapeamento da radiação por causa de sua propagação ao longo dos canais ionizados previamente pelas descargas de retorno, ao invés do ar virgem, como é o caso dos líderes escalonados. A Figura 2.26 mostrou um registro similar para o mesmo tipo de relâmpago.

Mazur (2002) explica que:

O número de tais ciclos é igual ao de descargas de retorno. A dinâmica do desenvolvimento do relâmpago nuvem-solo negativo, antes do líder escalonado conectar-se ao solo, é a mesma do intranuvem. A descarga de retorno energiza o desenvolvimento do líder positivo (agora unidirecional), que continua mesmo depois da interrupção de corrente no canal para o solo. Este estágio é similar ao estágio final do intranuvem, com o desenvolvimento unidirecional do líder positivo e com a ocorrência dos líderes de recuo negativos. Nos nuvem-solo, a radiação dos líderes de recuo segue e também coincide com o desenvolvimento do líder positivo dentro da nuvem depois da primeira e das subsequentes descargas de retorno. Os líderes contínuos são os líderes de recuo que foram capazes de atingir o solo. O mapa de radiação do relâmpago nuvem-solo negativo mostra que os líderes de recuo estão associados com a região de carga negativa da nuvem, situada principalmente entre 6 e 8 km, neste caso.

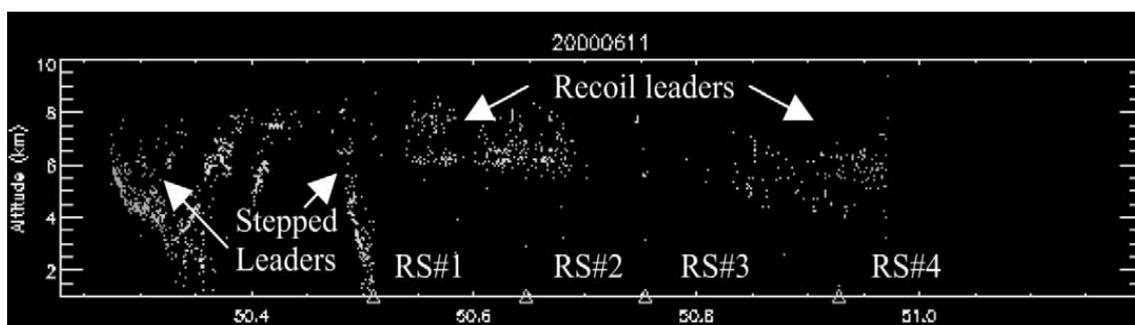


Figura 2.47 – Mapa de fontes de radiação de um relâmpago nuvem-solo negativo com quatro descargas de retorno (altitude, km *versus* tempo, s).

Fonte: adaptado de Mazur (2002).

Quanto à forma da árvore bidirecional do relâmpago nuvem-solo negativo, pode-se observar seu grande desenvolvimento horizontal (“copa”) em relação ao vertical, como mostra a Figura 2.26. Tal característica havia sido prevista em estudos anteriores à técnica de mapeamento (KREHBIEL et al., 1979; MAZUR; RUHNKE, 1993). A Figura

2.48 mostra uma representação esquemática do desenvolvimento de um relâmpago nuvem-solo negativo qualquer. Em  $t_1$ , início do líder bidirecional e bipolar;  $t_2$  mostra sua progressão;  $t_3$ , líder negativo tocando o solo;  $t_4$  mostra a descarga de retorno e seu canal (*RS channel*);  $t_5$  mostra a interrupção de corrente e a progressão do líder positivo com simultânea ocorrência intermitente dos líderes de recuo (setas) percorrendo no sentido da origem ou tronco do relâmpago.

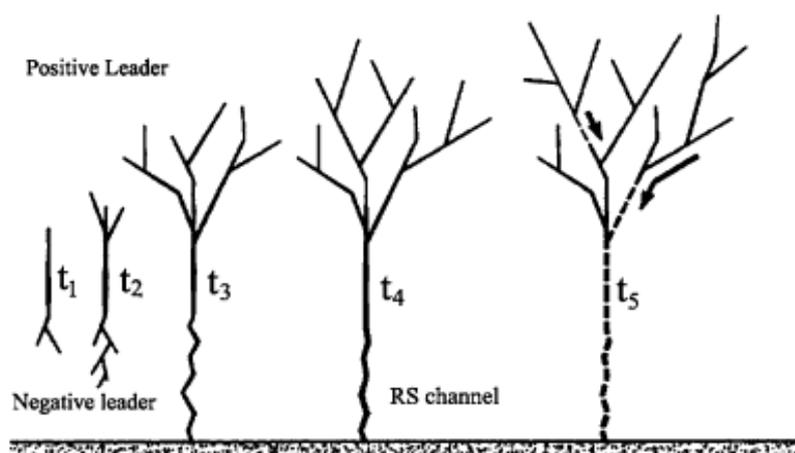


Figura 2.48 – Desenvolvimento da árvore bidirecional e bipolar do relâmpago nuvem-solo negativo, composta do líder negativo (*negative leader*) e do líder positivo (acima).

Fonte: Mazur (2002).

No caso do relâmpago nuvem-solo positivo, a progressão do líder negativo ocorre na região de cargas positivas da nuvem. A radiação dos líderes positivos vindo em direção ao solo, como já comentado, não é muito bem detectada (MAZUR, 2002). A Figura 2.49 mostra um mapa de radiação de um relâmpago nuvem-solo positivo. A descarga de retorno está marcada com um X na abscissa. O líder positivo é virtualmente invisível no mapa. O líder negativo começou em uma altitude de 6 km e então se desenvolveu na região de cargas positivas da nuvem em torno de 8 km.

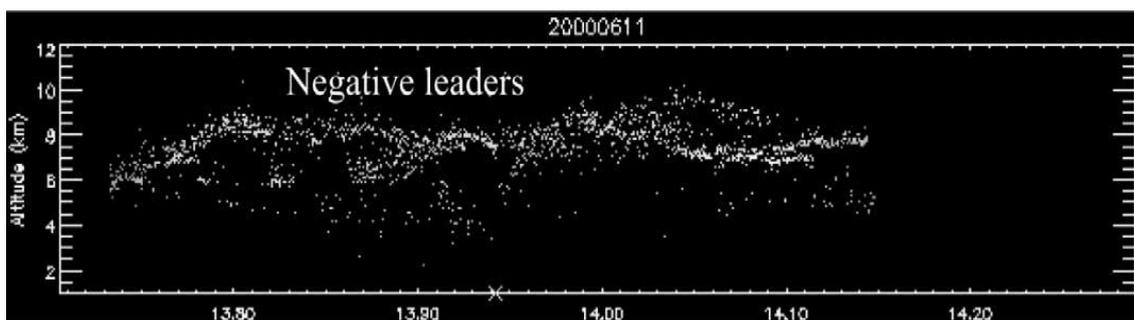


Figura 2.49 – Mapa de fontes de radiação de um relâmpago nuvem-solo positivo (altitude, km *versus* tempo, s).

Fonte: Mazur (2002).

Mazur (2002) afirma que o “mesmo conceito de líder bidirecional e de carga líquida nula também descreve o desenvolvimento do relâmpago nuvem-solo positivo até sua interrupção de corrente”, conforme mostra a Figura 2.50. Em  $t_1$ , ocorre o início do líder bidirecional e bipolar;  $t_2$  mostra sua progressão;  $t_3$ , o líder positivo tocando o solo e a consequente descarga de retorno;  $t_4$ , interrupção da corrente e progressão do líder negativo: não são observadas ocorrências intermitentes de líderes de recuo negativos durante este estágio. “A progressão ascendente do líder negativo impulsionado (energizado) pela descarga de retorno seria o estágio final deste relâmpago”.

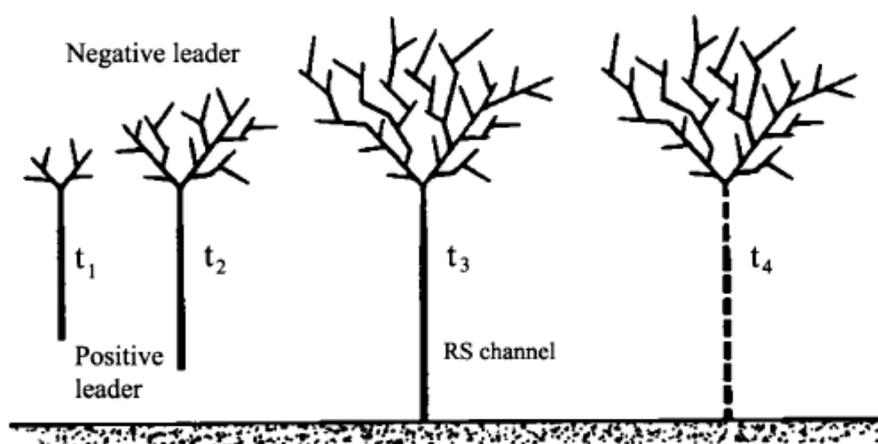


Figura 2.50 – Desenvolvimento da árvore bidirecional e bipolar em um relâmpago nuvem-solo positivo, composta de líder positivo (abaixo) e líder negativo (acima).

Fonte: adaptado de Mazur (2002).

Segundo Mazur (2002), numerosos experimentos de relâmpagos induzidos por foguete com o fio aterrado e de líderes negativos ascendentes mostraram que nenhum líder positivo descendente percorreu o canal remanescente após a interrupção de corrente,

como fazem frequentemente os líderes contínuos nos nuvem-solo negativos com múltiplas descargas de retorno. “Esta evidência apoia fortemente a hipótese de que os relâmpagos nuvem-solo positivos não possuem múltiplas descargas de retorno”.

Por outro lado, o mecanismo de geração das descargas de retorno subsequentes observadas nos nuvem-solo positivos com técnicas acuradas, *e.g.*, Ballarotti et al. (2006), Saba et al. (2008) e Schumann et al. (2012), ainda não é compreendido.

### **2.6.2. Corrente contínua como indicador do desenvolvimento do líder dentro da nuvem**

Mazur (2002) afirma:

A existência de corrente contínua nos relâmpagos nuvem-solo é conhecida há bastante tempo pelas assinaturas nos registros de campo elétrico (lento ou de baixa frequência), de vídeo de alta resolução temporal ou de corrente nos raios induzidos por foguetes ou estruturas instrumentadas. Entretanto, foi já considerada como um processo separado no desenvolvimento do relâmpago, sendo até chamada de ‘descarga de corrente contínua’. Não existia clara definição ou explicação para a sua natureza até a aceitação do conceito do líder bidirecional e de carga líquida zero.

Mazur e Ruhnke (1998 apud MAZUR, 2002) propuseram que “a corrente contínua é o resultado da mudança de distribuição de cargas induzidas no canal condutivo do líder durante seu desenvolvimento no campo elétrico ambiente dentro da nuvem”. Mazur (2002) afirma: “a corrente contínua seria uma parte inseparável de qualquer processo de líder, independentemente de sua polaridade”. A presença de corrente contínua, comumente observada em registros de campo elétrico ou como luminosidade continuada nos canais visíveis, é um indicativo do desenvolvimento do líder dentro da nuvem. Assim, a duração da corrente contínua corresponderia de algum modo à duração do desenvolvimento do líder, que pode variar de unidades a centenas de milissegundos.

Observações mais recentes também corroboram essa ideia. Krehbiel e Wang (2011) mostraram registros de relâmpagos nuvem-solo com LMA e antenas de campo elétrico lento que evidenciam a relação causa-efeito do desenvolvimento do líder dentro da nuvem e da ocorrência de corrente contínua. Fan et al. (2014), através de uma rede de

antenas de campo elétrico para diversas faixas de frequências (incluindo mapeamento em VHF em três dimensões) e *field mills*, afirmam baseados em suas observações: “a propagação de longa distância do líder positivo é o principal processo físico que ocorre durante a corrente contínua longa”.

Mazur (2002) ainda sugere que, como o desenvolvimento do líder positivo normalmente acontece imediatamente após cada descarga de retorno nos relâmpagos nuvem-solo negativo, uma corrente contínua de alguma duração estaria presente após cada descarga de retorno.

### **2.6.3. Correspondência entre os principais processos observados e os processos essenciais do relâmpago**

Segundo Mazur (2002), existiriam somente dois tipos de líderes negativos: (i) “líderes iniciais”, aqueles que realizam ruptura e propagação em ar virgem (líder escalonado, por exemplo) e (ii) líderes de recuo (*recoil leaders*), aqueles que se desenvolvem ao longo de canais previamente ionizados (*e.g.*, líder contínuo). Quanto à polaridade da região de cargas por onde propaga, pode ser positiva (líderes iniciais) ou negativa (líderes de recuo), porém retrazendo o caminho dos líderes positivos.

Todos os processos no relâmpago, portanto, seriam essencialmente apenas três: (i) líder negativo, que pode ser em ar virgem<sup>17</sup> ou retrazar canais positivos (líder de recuo), (ii) líder positivo, em ar virgem somente, e (iii) a descarga de retorno. Ou seja, exceto pelo processo da descarga de retorno (exclusivo dos *ground flashes*), o relâmpago seria composto somente por líderes (MAZUR, 2007). O líder com todas as suas variações seria, portanto, o principal e mais característico processo do relâmpago.

Assim, existiria uma correspondência entre os processos como foram sendo denominados tradicionalmente (de maneira estanque) e os processos físicos essenciais do relâmpago (líder e descarga de retorno):

---

<sup>17</sup> Ar virgem refere-se à condição de um líder inicial na atmosfera, que forma caminhos novos, para distinguir da condição do líder que percorre um caminho formado previamente.

- a) **Quebra de rigidez e líder escalonado:** começo e desenvolvimento dos líderes negativo em ar virgem (escalonado) e líder positivo na região negativa dentro da nuvem;
- b) **Descarga de retorno:** a própria descarga de retorno;
- c) **Líder contínuo:** líder negativo de recuo;
- d) **Líder contínuo-escalonado:** líder negativo de recuo até certo ponto e líder negativo em ar virgem;
- e) **Corrente contínua e processo J:** corrente alimentada pelos líderes positivos em propagação coletando cargas na região negativa da nuvem;
- f) **Evento M:** interações do líder de recuo com o canal conectado ao solo e portando corrente;
- g) **Processo K:** líder negativo de recuo.

Um problema ou limitação desta correspondência é que o líder de recuo se torna reduzido somente ao componente de polaridade negativa e, portanto, se desconsidera seu desenvolvimento bidirecional e bipolar.



### **3 ANÁLISE DE REGISTROS DO LÍDER DE RECUO EM LÍDER POSITIVO FORA DA NUVEM**

Neste capítulo, é apresentada a análise realizada dos registros de vídeo de alta velocidade de líderes positivos contendo líderes de recuo visíveis e fora da nuvem, tanto de relâmpagos nuvem-solo positivos quanto de ascendentes negativos.

#### **3.1. Metodologia**

Os registros analisados de relâmpagos descendentes positivos e ascendentes negativos (ambos com líderes positivos expostos fora da nuvem) são vídeos de câmeras de alta velocidade (câmeras rápidas) com marcação temporal (GPS/UT) em cada quadro. Esses registros foram obtidos por pesquisadores nos EUA e cedidos para este trabalho pelo serviço Weathervideohd.tv. Foi analisado um total de 18 vídeos contendo relâmpagos com líderes positivos e líderes de recuo: dez relâmpagos nuvem-solo (descendentes) e nove ascendentes, com um vídeo contendo ambos. A taxa de quadros por segundo (qps) variou entre 1.000 e 10.000. A Tabela 3.1 mostra as especificações de cada vídeo analisado. Nota-se que somente dez vídeos preservaram os quadros originais, onde não houve integração de quadros.

O vídeo 4387 é um registro raro, contendo três ascendentes negativos disparados e um relâmpago nuvem-solo positivo, que os disparou. Somente dois relâmpagos, entretanto, tiveram a maior parte de seus ramos e líderes de recuo expostos no registro e que foram analisados (Figura 3.1). Somente o nuvem-solo e o ascendente indicado por (1) foram analisados pelo grande número de eventos de líderes de recuo registrados e número de ramificações visíveis. Aparentemente o nuvem-solo desenvolveu dois canais principais para baixo da nuvem, um que se conectou ao solo e outro que se desenvolveu horizontalmente para a direita. Foram identificadas através do vídeo nove descargas de retorno no ascendente analisado. Entretanto, a ausência de registro de corrente na base do canal (torre) neste caso dificulta a identificação do fim da fase inicial de corrente contínua e início das descargas de retorno. A multiplicidade, portanto, torna-se imprecisa.

Tabela 3.1 – Os 18 vídeos de câmera de alta velocidade contendo líderes de recuo analisados neste trabalho de relâmpagos nuvem-solo positivos (descendentes) e ascendentes negativos.

n.	Número do vídeo ( <i>asset ID</i> )	Tipo de relâmpago (Ascendente, A; Descendente, D)	Taxa de amostragem original (qps)	Tempo de exposição do quadro original ( $\mu$ s)	Tempo de duração do quadro disponibilizado (ms)	Todos os quadros preservados (S/N)
1	6508	A	1.000	997	1,0	S
2	6539	D	1.000	997	1,0	S
3	6541	D	1.000	997	1,0	S
4	6553	A	1.000	997	1,0	S
5	6554	A	1.000	997	1,0	S
6	6557	A	1.000	997	1,0	S
7	6548	D	1.949	510	~1,0	N
8	6549	D	1.949	510	~1,0	N
9	4345	D	7.207	135	0,139	S
10	4348	A	7.207	135	0,139	S
11	6567	D	7.207	135	~0,4	N
12	6756	D	7.532	99	0,133	S
13	4387	D, A*	9.000	110	0,111	S
14	6552	A	9.000	110	~0,3	N
15	6555	A	9.000	110	~0,3	N
16	6556	A	9.000	110	~1,0	N
17	6540	D	10.000	97	~0,3	N
18	6550	D	10.000	99	~0,4	N

\* Este registro contém quatro relâmpagos: um nuvem-solo positivo com um canal vertical conectado ao solo e outro canal que propagou horizontalmente e três ascendentes (iniciados logo após a conexão do nuvem-solo) a partir de três torres diferentes. Somente dois relâmpagos foram analisados.

Fonte: Weathervideohd (2014).

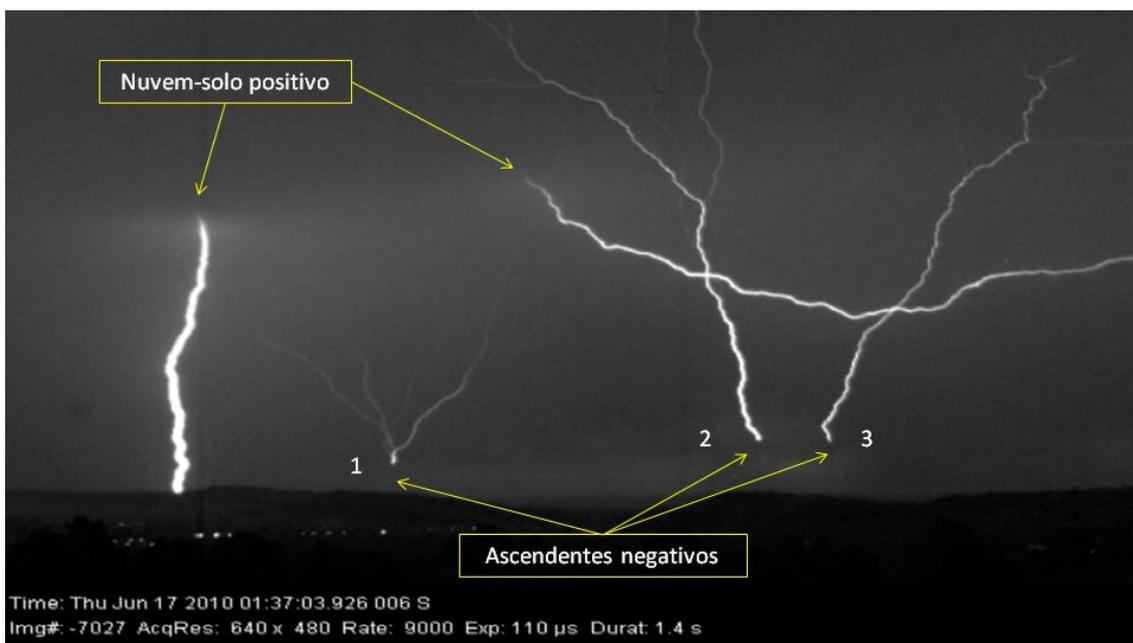


Figura 3.1 – Quadro do vídeo 4387 contendo os quatro relâmpagos que ocorreram simultaneamente, um nuvem-solo positivo e três ascendentes negativos.  
Fonte: vídeo 4387 de Weathervideohd (2014).

### 3.1.1. Limitações da técnica utilizada

Algumas limitações da técnica de vídeo utilizada neste trabalho puderam ser constatadas. São listadas e comentadas a seguir as limitações consideradas relevantes:

- a) Limitada resolução temporal (taxa de quadros):
  - i. Sentido de propagação: mesmo nos vídeos de maior resolução (10.000 qps), é difícil identificar o sentido de propagação de uma descarga quando esta aparece somente em um quadro. Tal situação se assemelha, em certos casos, com uma mera intensificação da ponta do líder;
  - ii. Múltiplas ramificações de um mesmo ramo iluminadas: duas situações podem se confundir:
    - a) O líder de recuo propaga-se para trás até um próximo entroncamento e, em seguida, para frente em um ramo vizinho, obtendo o formato de gancho;

- b) Dois ou mais líderes de recuo ocorrem (quase) simultaneamente em um mesmo quadro em diferentes ramificações comuns a um mesmo ramo, mas propagam para trás e se encontram em tal ramo;

b) Nível de luminosidade:

- i. Ruído de fundo da imagem: líderes de recuo que ocorram distantes, dentro da nuvem ou que tenham sua luminosidade atenuada pelo ambiente úmido/chuvoso podem não ser registrados por emitirem abaixo ou próximo do nível de luminosidade ambiente;
- ii. Saturação: intensa luminosidade (*e.g.*, descarga de retorno ou líderes de recuo muito intensos) pode saturar a imagem onde os líderes de recuo apareceriam no quadro, impedindo sua visualização.

### 3.2. Características observadas do líder de recuo

O comportamento observado do líder de recuo nos ramos aparentes de líderes positivos nos vídeos de alta velocidade é comentado sob os seguintes aspectos: (i) regime de funcionamento, (ii) localização da região de iniciação, (iii) propagação, (iv) registro de grupos de líderes de recuo simultâneos, (v) interatividade do líder de recuo com outros processos.

Na maior parte das vezes, os líderes de recuo foram registrados aparentemente separados do resto da estrutura do líder positivo e em um único quadro do vídeo. Aparentemente, isso se deu pela combinação dos fatores: curta propagação e elevada velocidade do fenômeno, e da limitada taxa de aquisição da câmera rápida. Tais registros foram identificados como sendo de líderes de recuo propagando em direção ao canal portador de corrente do líder positivo.

### 3.2.1. Regime de funcionamento

Foi possível observar nos vídeos que o líder de recuo possui claramente um regime de natureza transitória e intermitente comparada ao relâmpago como um todo, contrastando com o regime quase estacionário daqueles ramos do líder positivo que avançam continuamente.

A Figura 3.2 ilustra um caso com ramos funcionando em ambos os regimes, pertencentes provavelmente a um mesmo entroncamento comum encoberto pela nuvem. Os dois ramos principais propagam de modo contínuo: o ramo da esquerda em direção ao solo (que dará origem à descarga de retorno posterior), e o ramo da direita na direção horizontal. É possível também observar a ocorrência intermitente de líderes de recuo nos ramos secundários do canal da esquerda, ao contrário do canal da direita, onde não há praticamente nenhuma ocorrência.

É interessante notar que um mesmo ramo de líder positivo pode experimentar alternância no regime de propagação ao longo de seu tempo de vida. Pode experimentar um período desenvolvendo-se continua e intensamente e, em seguida, passar para um período de desenvolvimento mais lento e menos intenso, sendo que este último se mostrou mais propício à ocorrência de líderes de recuo. Na Figura 3.7, o mesmo ramo (direito) que propagava continuamente na Figura 3.2 sofre a ocorrência de um líder de recuo, ao ter sua propagação reduzida.



Figura 3.2 – Sequência descontinuada de quadros mostrando dois ramos principais supostamente de um único líder positivo do relâmpago nuvem-solo observados pela câmera rápida a 9.000 qps (exposição de 110  $\mu$ s) em South Dakota, EUA, em 17/jun/2010, 01:37:03 UTC.

Fonte: vídeo 4387 de Weathervideohd (2014).

### 3.2.2. Localização da região de iniciação

Nesta seção, são apresentadas características de localização dos líderes de recuo de dois modos: quando vistos separadamente, e quando vistos em sequência.

### 3.2.2.1. Líderes de recuo separados

Foi observado nos registros que os líderes de recuo, vistos separadamente, surgem em ramos que possuem três características: (i) ausência de luminosidade na região de iniciação, mas não necessariamente em todo o ramo que sofre a ocorrência; (ii) atrás da ponta do ramo; e (iii) situados na região mais exterior da estrutura do líder positivo. A característica (ii) foi observada de dois modos: primeiro, nos registros onde havia segmentos posteriores do ramo apresentando um nível mínimo de luminosidade (Figuras 3.4, 3.8, 3.10, 3.11); segundo, através do frequente desenvolvimento bidirecional do líder de recuo, descartando a possibilidade de ser uma mera progressão do ramo em ar virgem (de baixa velocidade), mas evidenciando o retraço progressivo da ponta do ramo (de alta velocidade e semelhante à do retraço retrógrado).

É difícil identificar com precisão o ponto de iniciação de um LR em relação à estrutura do líder positivo: seja no registro ótico pelo fato do líder positivo possuir ramos de baixíssima ou nenhuma luminosidade, ou no mapeamento por fontes de radiação (*e.g.*, LMA) por causa dos ramos positivos irradiarem muitas vezes abaixo da sensibilidade dos detectores. Inclusive, observa-se com muita frequência nos vídeos líderes de recuo (LRs) surgirem aparentemente desconectados da estrutura do líder. Sua elevada velocidade de propagação sugere, apesar da precária visibilidade do canal, que há ao longo de seu trajeto um canal ionizado desenvolvido previamente pelo líder positivo.

A Figura 3.3 mostra claramente o decaimento de um ramo próximo ao solo e sua reativação com o líder de recuo, que proporciona um pequeno avanço de propagação do líder positivo. O quadro de tempo 051,806 ms mostra o último quadro onde foi possível visualizar o ramo antes do líder de recuo, que em seguida se torna invisível. O terceiro quadro (cerca de quatro milissegundos depois) contém o desenvolvimento inicial do líder de recuo. O líder de recuo propaga em ambas as direções no último quadro, avançando a posição conquistada pelo líder anteriormente.

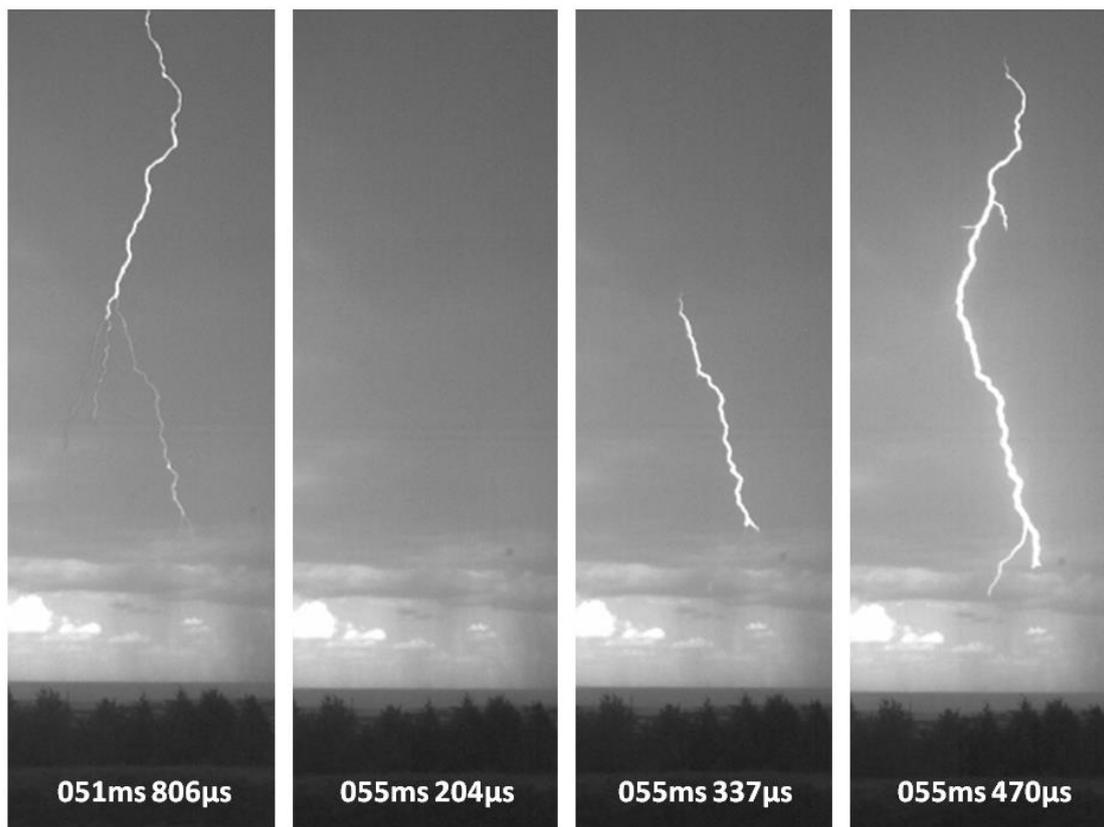


Figura 3.3 – Sequência descontinuada mostrando o redesenvolvimento de um ramo, através de um líder de recuo, antes do líder positivo de um relâmpago nuvem-solo tocar o solo. Evento registrado nos EUA (a 7.532 qps e tempo entre quadros de 133  $\mu$ s) em 06/jul/2012, 00:00:10 UTC.  
 Fonte: vídeo 6756 de Weathervideohd (2014).

A Figura 3.4 mostra um caso onde foi possível observar um líder de recuo se formando em um ramo externo, mas logo atrás de sua ponta ativa. O quadro 374,461 ms registrou o início da formação do LR (contorno amarelo). Nos quadros seguintes, é possível identificar o desenvolvimento tanto retrógrado, que inclusive interage com outro ramo formando um gancho, quanto progressivo do LR, que encontra a ponta ativa do líder. A seção do ramo onde o LR se originou está invisível no quadro, indicando nível muito baixo ou nulo de luminosidade e corrente. É possível notar também que o nível de luminosidade/corrente na ponta diminui logo antes do líder de recuo ser disparado.

Sobre a ocorrência no interior da estrutura do líder positivo, não foi observado nenhum caso no presente estudo e parece ser um fenômeno raro. M. Saba, através de uma

câmera rápida, registrou um caso raro onde o líder de recuo se originou no tronco principal próximo ao solo em um relâmpago ascendente<sup>18</sup>.

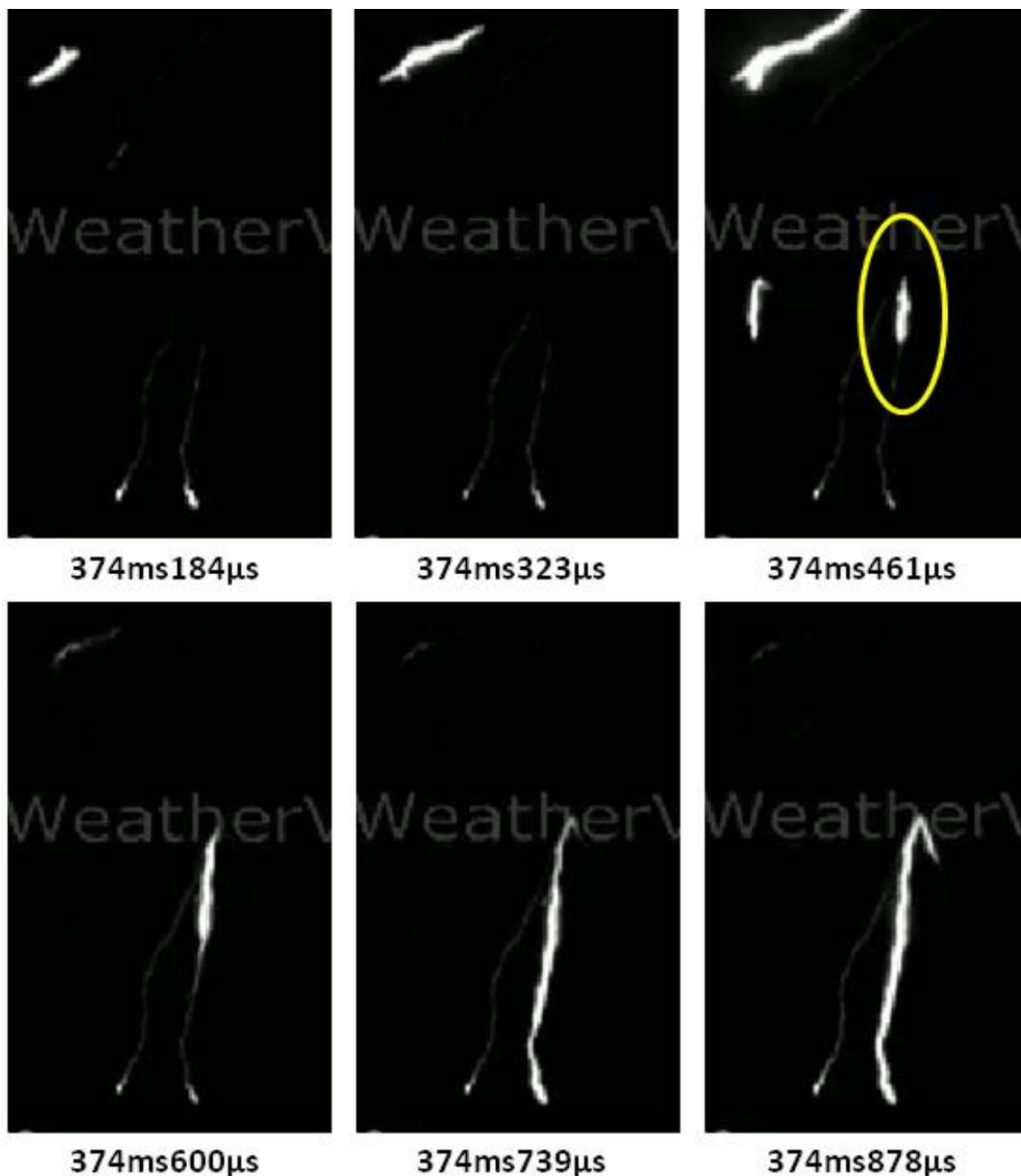


Figura 3.4 – Líder de recuo (LR) se formando em um ramo de ponta ativa de um relâmpago nuvem-solo positivo instantes antes da conexão com o solo e da descarga de retorno, enquanto outros LRs ocorrem.

Fonte: vídeo 4345 de Weathervideohd (2014).

<sup>18</sup> M. Saba, comunicação privada, São José dos Campos – SP, 2014.

### 3.2.2.2. Sequência de líderes de recuo

Quando analisada uma sequência de líderes de recuo na mesma região de um relâmpago, duas tendências mostraram-se expressivas em termos da região de iniciação e que podem ser chamadas de: (i) perímetro expansivo da zona de iniciação e (ii) consolidação de trajetos preferenciais na estrutura do líder.

O (i) “perímetro expansivo da zona de iniciação” dos líderes de recuo foi observado através de suas sucessivas localizações ao longo da propagação do líder positivo de ocorrerem cada vez mais adiante e distantes do tronco principal. Exemplos são mostrados em séries temporais descontinuas de diversos líderes de recuo ocorridos em um nuvem-solo (Figura 3.5) e em um ascendente (Figura 3.6). No último quadro da Figura 3.5, o ramo luminoso que aparece abaixo da linha (4) não é um líder de recuo, mas a ponta do líder positivo que propaga continuamente.

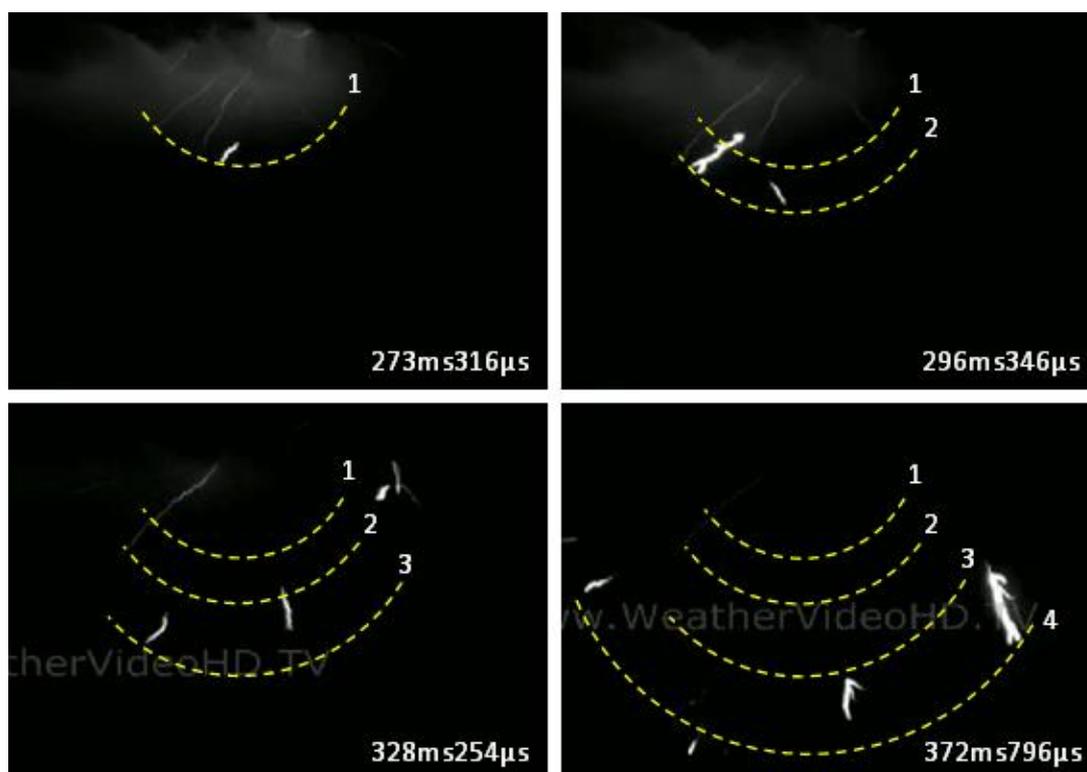


Figura 3.5 – Sequência descontinuada de quadros (7.207 qps) do líder positivo de um relâmpago nuvem-solo em direção ao solo, onde se podem observar as sucessivas localizações da origem dos diversos líderes de recuo (linhas pontilhadas) acompanhar o avanço do líder positivo.

Fonte: vídeo 4345 de Weathervideohd (2014).

A (ii) “consolidação de trajetos preferenciais” foi observada através da preferência de certos percursos na estrutura para a propagação dos líderes de recuo. Tal característica se mostrou pouco expressiva nos relâmpagos nuvem-solo positivos, ao contrário do que observado nos ascendentes (Figura 3.6). Tal preferência indica certo grau de condicionamento de canal do percurso, o que, por sua vez, propiciaria novas ocorrências. Na Figura 3.6, pode-se notar claramente o avanço de posição de origem dos sucessivos líderes de recuo e do ramo do líder positivo em relação ao tronco da árvore. Destes quatro exemplos, três atingiram a torre e formaram descargas de retorno e um (aquele originado em 1016 ms) comportou-se como um líder falho e não atingiu a torre.

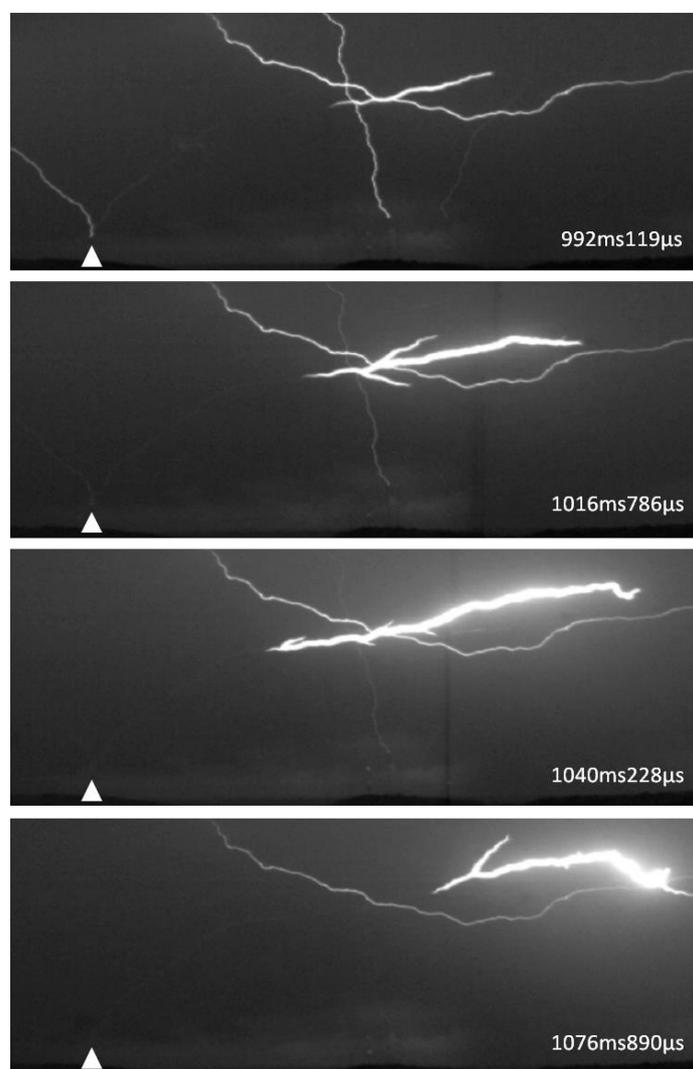


Figura 3.6 – Quatro líderes de recuo distintos originados em um mesmo ramo principal de um relâmpago ascendente negativo. A torre está indicada pelo triângulo.  
Fonte: vídeo 4387 de Weathervideohd (2014).

### 3.2.3. Propagação do líder de recuo

Foi possível notar nos líderes de recuo de maior extensão um sentido de propagação marcadamente retrógrado, retrazando um ramo em direção ao tronco principal do líder positivo. Tal característica mostrou-se a mais expressiva e de fácil observação do processo. O líder de recuo também mostrou frequentemente um desenvolvimento bidirecional, ou seja, tanto retrógrado quanto progressivo (exemplos nas Figuras 3.3, 3.4, 3.7 a 3.11). Na Figura 3.7, em 870,116 ms, o ramo possui em sua extremidade um ponto luminoso (círculo), indicando o surgimento do líder de recuo, que propaga principalmente para trás ao longo do ramo que decaía (quadros seguintes).

Notou-se, entretanto, a maior facilidade de percorrer o trajeto de canal já desenvolvido anteriormente pelo ramo e uma maior dificuldade em percorrer e/ou desenvolver o ramo posteriormente, visto que comparativamente o comprimento de tal avanço é tipicamente bem menor que do trajeto retrazado (Figuras 3.7, 3.8, 3.10, 3.11 e 3.14).

Sobre a extensão da propagação há grande variabilidade, podendo o LR aparecer no registro como traços curtos (cerca de uma dezena de pixels, contendo-se em um único ramo) ou percorrer desde um ramo mais externo, passar por diversos entroncamentos (nós) e atingir o solo (ocasionando uma descarga de retorno ou uma componente M). O LR, porém, se limitou na maioria das vezes a ocorrer e a propagar-se contido nas extremidades do líder positivo e longe do entroncamento principal do líder (Figuras 3.2, 3.5, 3.10 e 3.11). Na minoria dos casos é que percorre maiores trajetos e chega aos entroncamentos da estrutura do líder (Figuras 3.8 a 3.11 e 3.14). A Figura 3.8 mostra um caso onde o líder de recuo se transformou em um líder contínuo que, atingindo a torre, gerou uma descarga de retorno subsequente. O canal marcado com um (X) pertence ao nuvem-solo.

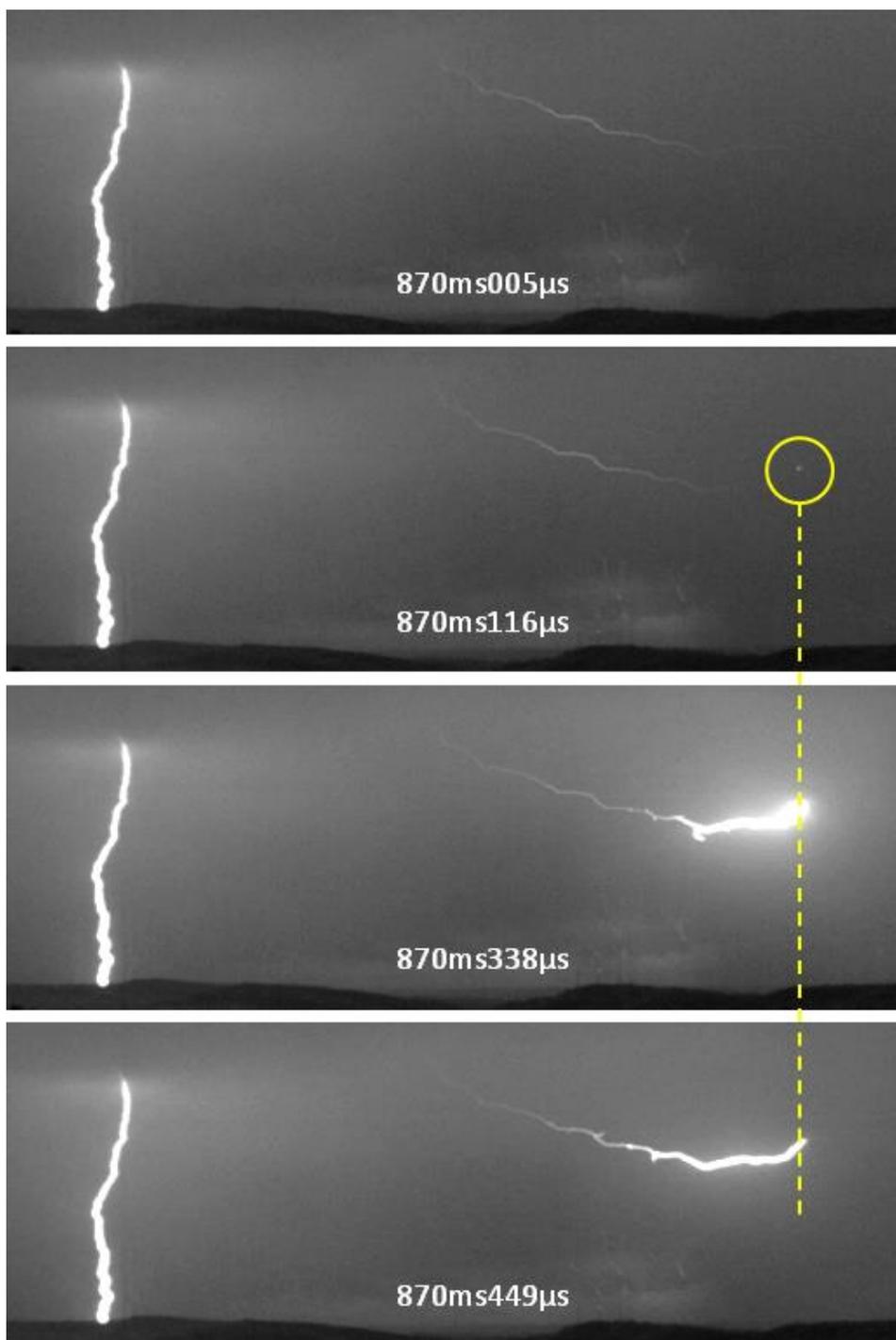


Figura 3.7 – Quadros sequenciais posteriores aos da Figura 3.2, onde é possível observar o ramo esquerdo em regime de corrente contínua (após a descarga de retorno) e a ocorrência de um líder de recuo no ramo direito, quando esse está em propagação dificultada e menos luminoso (870,005 ms).  
Fonte: vídeo 4387 de Weathervideohd (2014).

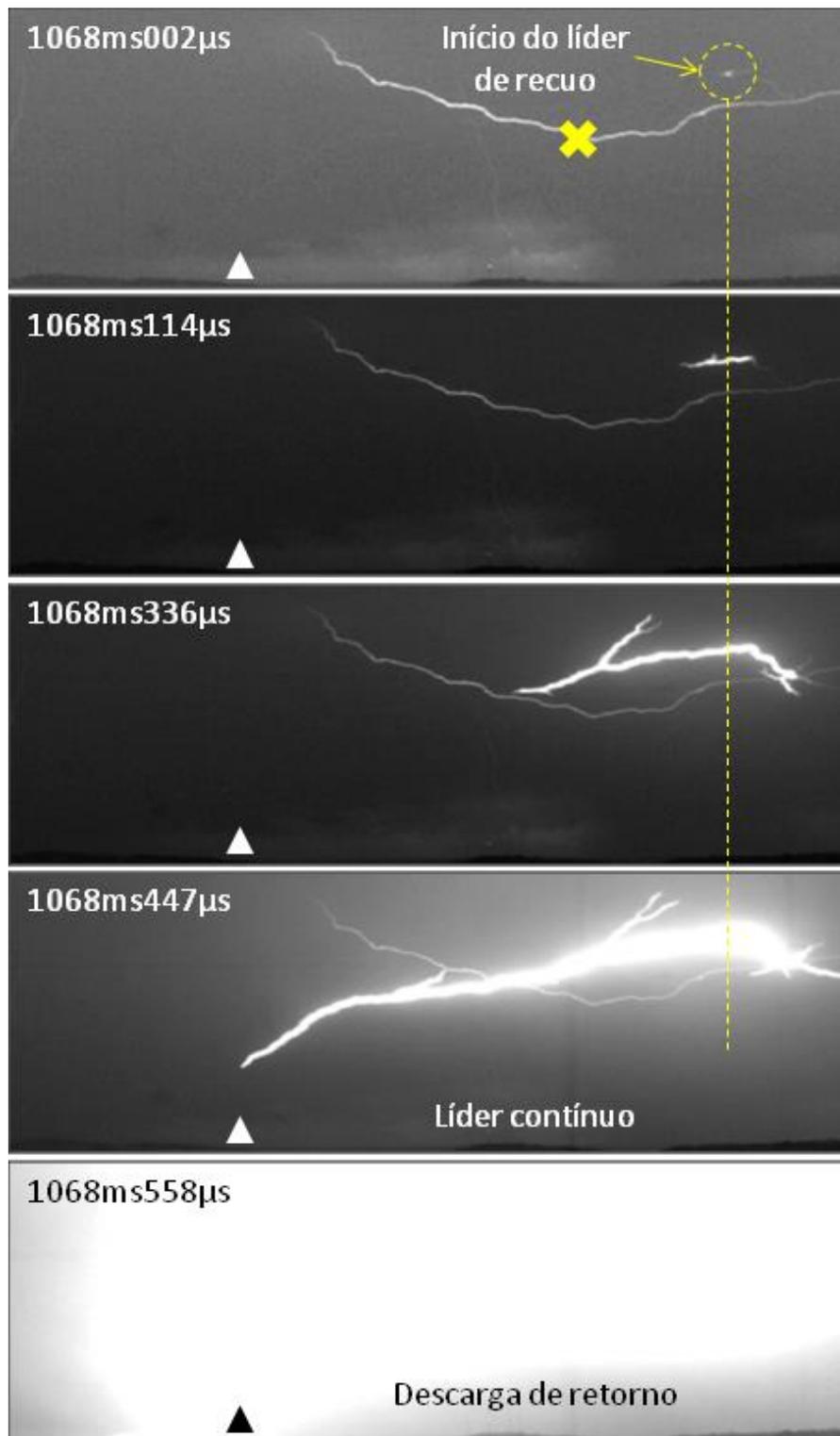


Figura 3.8 – Sequência contínua de quadros (9.000 qps, exposição de 110 µs) mostrando a formação e propagação de um líder de recuo após a interrupção da corrente no tronco do canal de um relâmpago ascendente negativo, ocasionando uma nova descarga de retorno (último quadro).

Fonte: vídeo 4387 de Weathervideohd (2014).

### **3.2.4. Registro de grupos de líderes de recuo simultâneos**

Um único quadro do vídeo, diversas vezes, registrou vários líderes de recuo aninhados em um mesmo ramo do líder positivo. Pôde-se observar claramente tal situação quando trechos de canal aparecem iluminados e desconectados de seu ramo originário. Exemplos evidentes deste comportamento são mostrados na Figura 3.5 (exceto primeiro quadro) e na Figura 3.10 (1040,784-1040,895 ms).

### **3.2.5. Interatividade do líder de recuo com outros processos**

Esta seção apresenta algumas sequências concatenadas de líderes de recuo com outros processos, que foram assim categorizados: *(i)* desenvolvimento progressivo do líder positivo; *(ii)* geração da descarga de retorno subsequente; *(iii)* geração da componente M; e *(iv)* interatividade cíclica entre líderes de recuo e outros processos. Nestes casos, o líder de recuo desenvolveu-se e propagou até encontrar seu ramo primário iluminado ou foi observado algum efeito local subsequente e imediato.

#### **3.2.5.1. Desenvolvimento progressivo do líder positivo**

Houve casos onde o desenvolvimento retrógrado do líder de recuo foi seguido por uma onda de luminosidade no mesmo ramo do líder positivo em sentido progressivo. A Figura 3.9 mostra um exemplo desta sequência. Iniciada com um líder de recuo (primeiro quadro) que reativa a propagação progressiva do ramo (1) do líder positivo em que ocorre. No quadro 457,994 ms, ao menos um líder de recuo oculto na nuvem se inicia e é seguido pelo desenvolvimento do ramo (2) do líder positivo (458,549 ms a 459,381 ms). Outro líder de recuo ocorre em 459,104 ms.

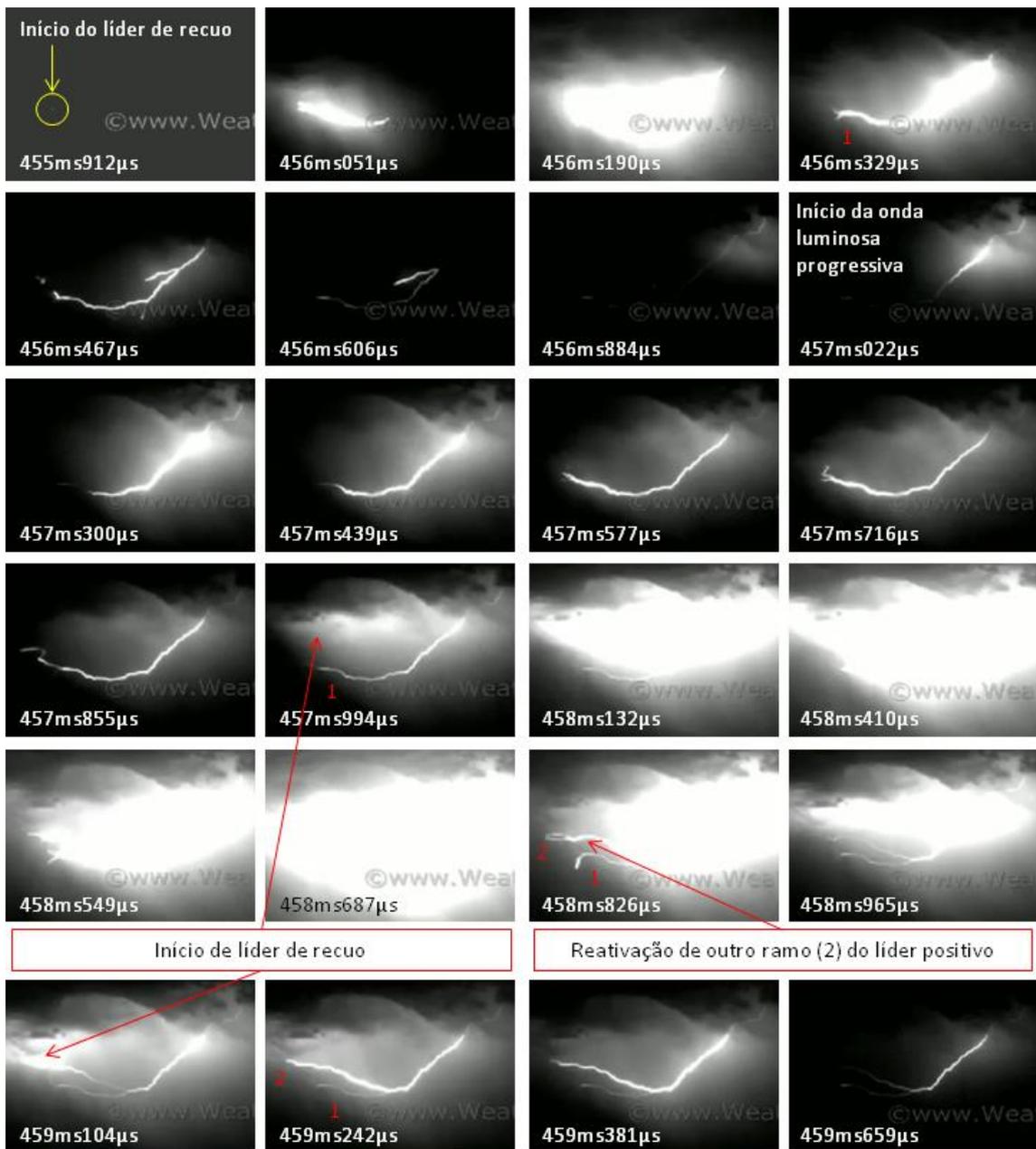


Figura 3.9 – Sequência descontinuada de quadros (7.207 qps, exposição de 135µs) mostrando um caso de múltipla interação entre ramos após a descarga de retorno de um relâmpago nuvem-solo positivo.

Fonte: vídeo 4345 de Weathervideohd (2014).

### 3.2.5.2. Geração de descarga de retorno

Nos relâmpagos ascendentes, o líder de recuo foi, por vezes, capaz de se desenvolver como um líder contínuo e alcançar a torre na base do canal. Nos casos onde a corrente

contínua já havia terminado, o líder contínuo provocou uma descarga de retorno subsequente. Exemplos são mostrados nas Figuras 3.8, 3.10 e 3.11.

Na Figura 3.10, inicialmente um líder de recuo se desenvolve bidirecionalmente até atingir a forma de um líder contínuo. Uma componente M ocorre logo em seguida da descarga de retorno. Podem-se observar nos quadros seguintes vários líderes de recuo disparados, embora sem aparente conexão com o tronco.

A maioria dos líderes de recuo se desenvolve pouco e não é capaz de se conectar ao tronco principal. Dentre a minoria restante, parte dela corresponde a líderes contínuos falhos, que não alcançam a torre. Somente a outra parte é capaz de gerar uma descarga de retorno.

### **3.2.5.3. Geração de componente M**

Foram observados também diversos casos onde o líder de recuo se propagou até se conectar ao tronco portando corrente contínua. Em muitos desses casos, pode-se observar como consequência a geração de uma componente M, pelo aumento súbito e transitório da luminosidade em todo o restante do tronco até a torre. As Figuras 3.10, 3.11 e 3.14 ilustram claramente casos onde foi possível perceber um incremento de luminosidade no canal principal.

Na Figura 3.11, o líder de recuo na forma de líder contínuo (primeiro quadro) gera a descarga de retorno que, por sua vez, ativa os ramos associados ao canal comum (tronco). É possível identificar a iniciação de um líder de recuo (círculo amarelo em 1030,785 ms) que propaga até o tronco. Este líder, em seguida, gera uma componente M.

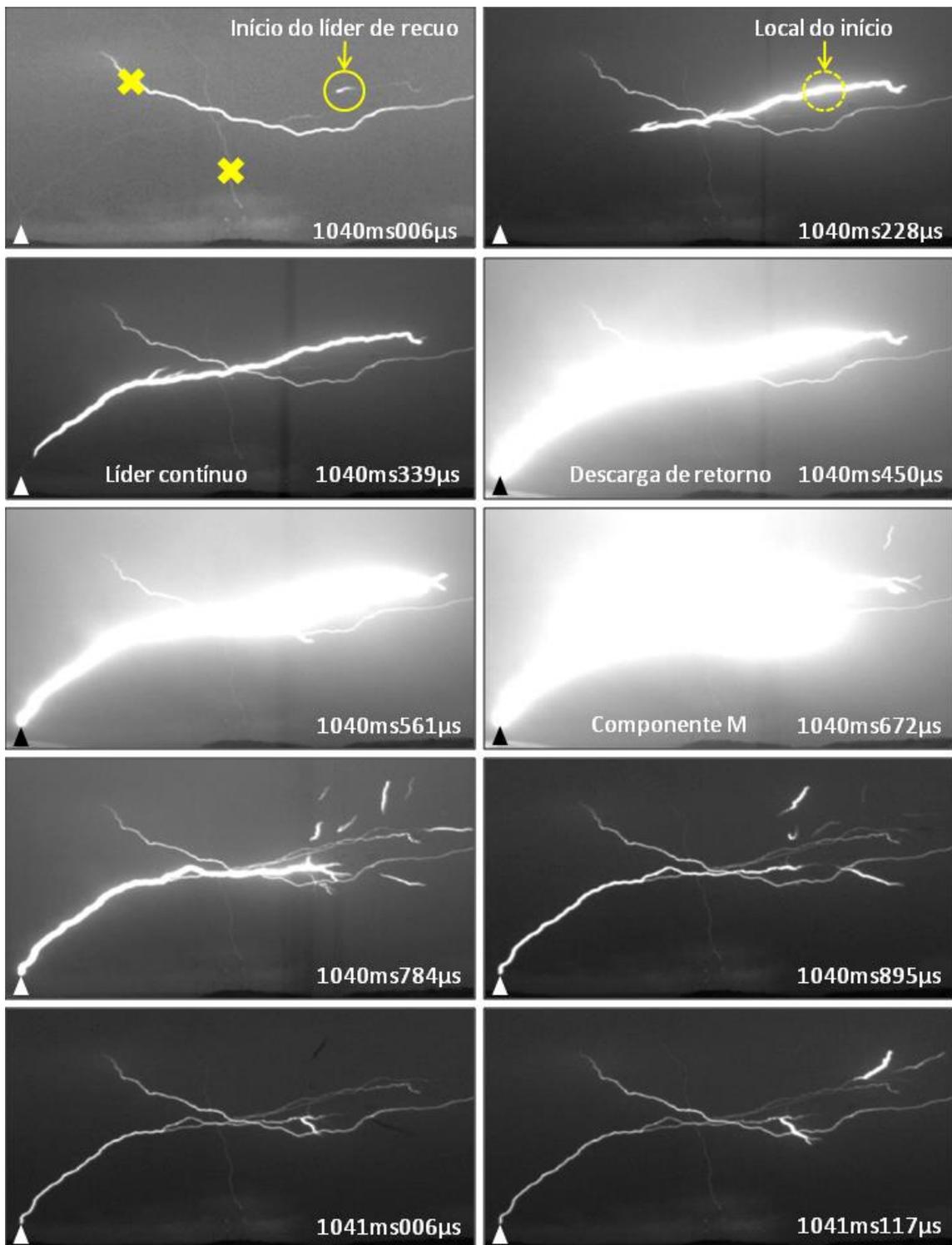


Figura 3.10 – Sequência descontínua de quadros (9.000 qps, exposição de 110  $\mu$ s) mostrando um caso de múltipla interação entre ramos envolvendo a quarta descarga de retorno de um relâmpago ascendente negativo.  
 Fonte: vídeo 4387 de Weathervideohd (2014).

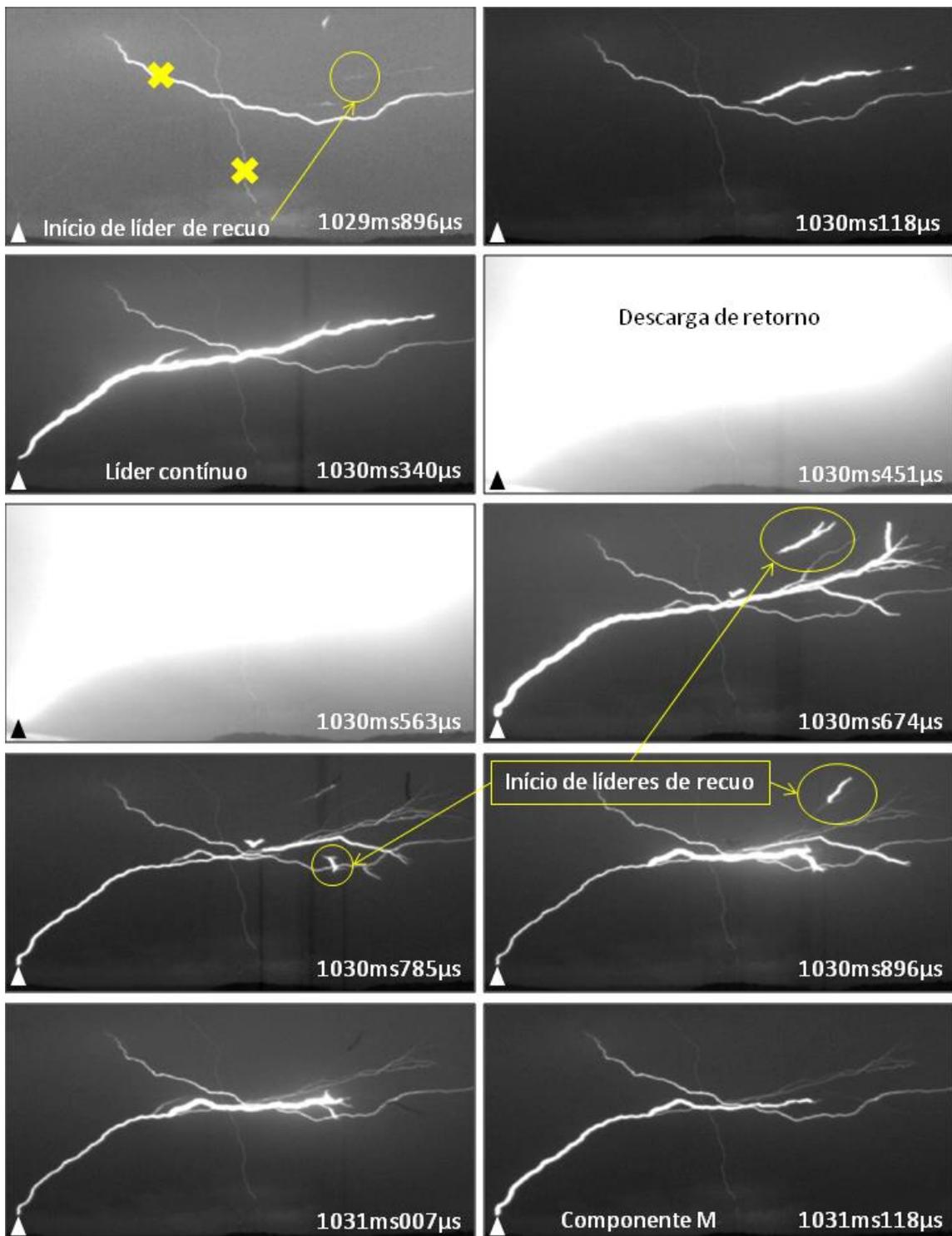


Figura 3.11 – Sequência descontinuada de quadros (9.000 qps, exposição de 110  $\mu$ s) mostrando um caso de múltipla interação entre ramos envolvendo a terceira descarga de retorno de um relâmpago ascendente negativo.  
 Fonte: vídeo 4387 de Weathervideohd (2014).

#### **3.2.5.4. Interatividade cíclica entre líderes de recuo e outros processos**

Uma característica interessante observada foi a repetida alternância entre líderes de recuo com algum outro processo, chamada aqui de interatividade cíclica. Este outro processo foi observado como sendo: (i) componente M (Figuras 3.10 a 3.12); (ii) elevação da luminosidade/corrente em um ramo do líder positivo (Figura 3.9); (iii) descarga de retorno (Figuras 3.10 e 3.11), podendo ser uma combinação de dois ou três desses processos intercalada com líderes de recuo (Figuras 3.10 e 3.11).

Vale notar que devido à saturação de luminosidade no quadro que contém a descarga de retorno (iii), tornou-se bastante limitada a identificação dos líderes de recuo registrados no mesmo quadro, ou seja, que teriam sido disparados ou seguidos pela descarga de retorno. Assim, somente em alguns casos esse caso particular de interatividade de processos ficou evidente.

A Figura 3.12 mostra outro caso de interatividade cíclica, durante a corrente contínua inicial de um ascendente negativo, onde um líder de recuo é disparado (LR1) e se conecta no tronco (975,118 ms), provocando uma componente M (M1). Um líder de recuo (LR2) é disparado em outro ramo em seguida (975,563 ms), provocando uma segunda componente M (M2). Nos quadros seguintes (975,785 e 975,896 ms), é possível identificar outros líderes de recuo que são disparados, mas não são capazes de se conectar ao tronco. Os canais marcados com uma cruz pertencem a outros relâmpagos que ocorreram simultaneamente e que, aparentemente, se desenvolvem de maneira independente.

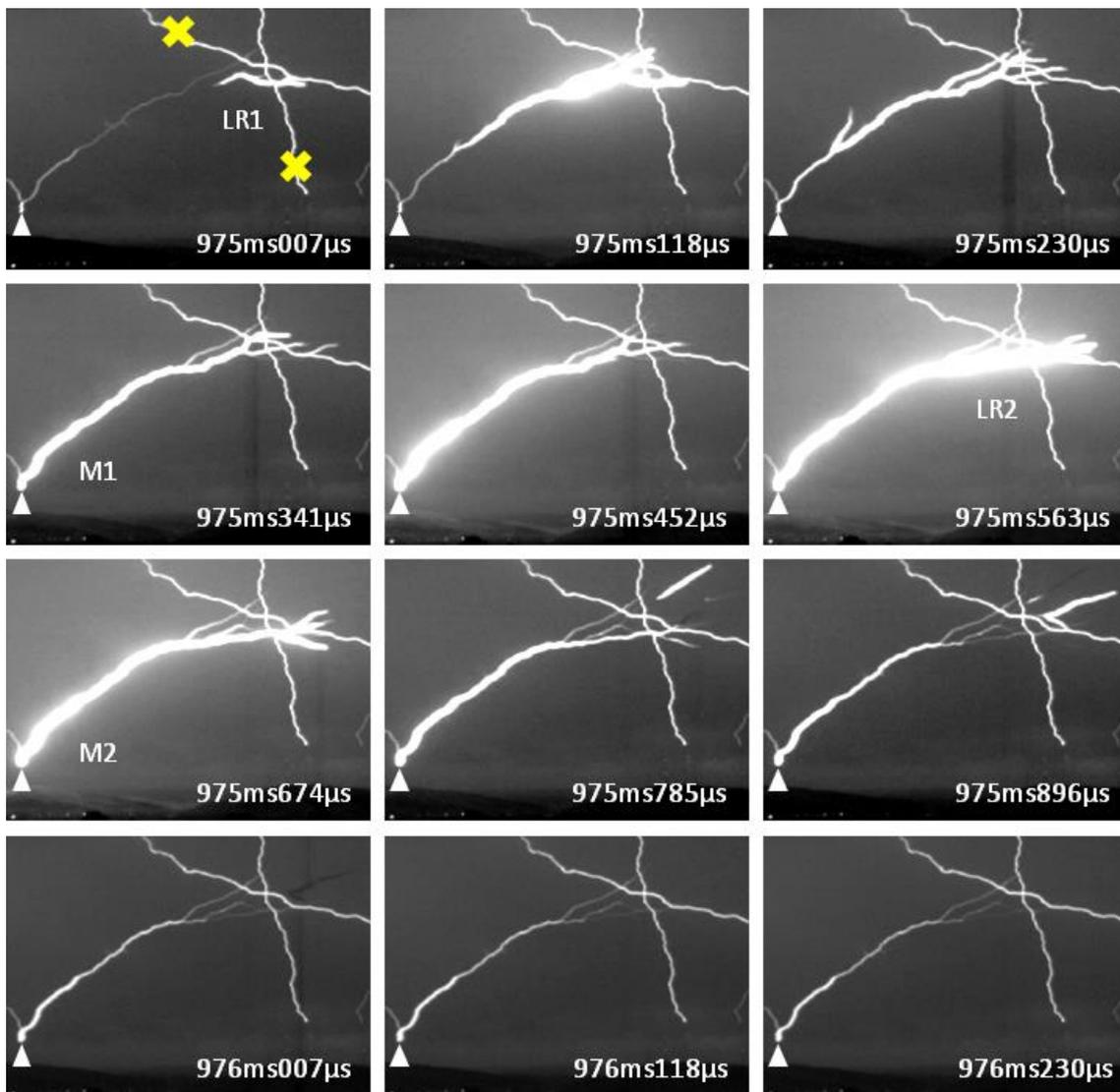


Figura 3.12 – Sequência contínua de quadros (9.000 qps, exposição de 110  $\mu$ s) mostrando um caso de interação cíclica entre ramos durante a corrente contínua inicial (antes da primeira descarga de retorno) de um relâmpago ascendente negativo.  
 Fonte: vídeo 4387 de Weathervideohd (2014).

As Figuras 3.13 e 3.14 mostram fluxogramas generalizados da sequência de processos observados em relâmpagos nuvem-solo e ascendentes, respectivamente. A separação temporal observada entre cada um dos processos é da ordem de unidades de milissegundos e o ciclo pode se repetir  $n$  vezes. A interatividade cíclica observada, nos ascendentes negativos, foi iniciada por uma descarga de retorno, ou por um líder de recuo durante a corrente contínua.



Figura 3.13 – Fluxograma da interatividade cíclica observada entre líderes de recuo e a elevação da corrente em outro ramo do líder positivo de relâmpagos nuvem-solo positivos.

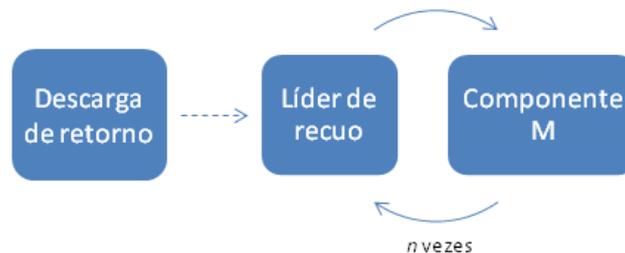


Figura 3.14 – Fluxograma da interatividade cíclica observada entre líderes de recuo e outros processos em relâmpagos ascendentes negativos.

### 3.3. Estatísticas de ocorrência

Dentre os casos registrados em vídeos considerados neste estudo, foram escolhidos quatro relâmpagos que obedecessem às seguintes condições: (i) registrados com as elevadas taxas de aquisição (acima de 7.000 qps); (ii) vídeos disponíveis sem integração de quadros, possibilitando uma análise quadro a quadro; e (iii) com uma visão global da estrutura do líder, excluindo eventos próximos e diminuindo as possibilidades de perder os líderes de recuo que ocorressem fora do ângulo de visão da câmera. Os quatro relâmpagos são: dois nuvem-solo positivos (presentes nos vídeos 4345 e 4387) e dois ascendentes negativos (presentes nos vídeos 4348 e 4387). No vídeo 4387, dentre os três ascendentes registrados (vide Figura 3.1), foi escolhido o n. 1 por apresentar melhor visibilidade e estar contida a quase a sua totalidade no campo de visão da câmera.

Os líderes de recuo foram contados quadro a quadro e as taxas de ocorrência dos líderes de recuo foram calculadas em relação ao ms ( $10^{-3}$  s). A quantidade total de líderes de recuo identificados em cada evento também está indicada. A Figura 3.15 mostra a evolução temporal da ocorrência dos líderes de recuo (LRs) observados nos dois

relâmpagos nuvem-solo. A taxa média de ocorrência e a quantidade de LRs observados estão indicadas para os períodos anterior ( $t < 0$ ) e posterior ( $t > 0$ ) à descarga de retorno.

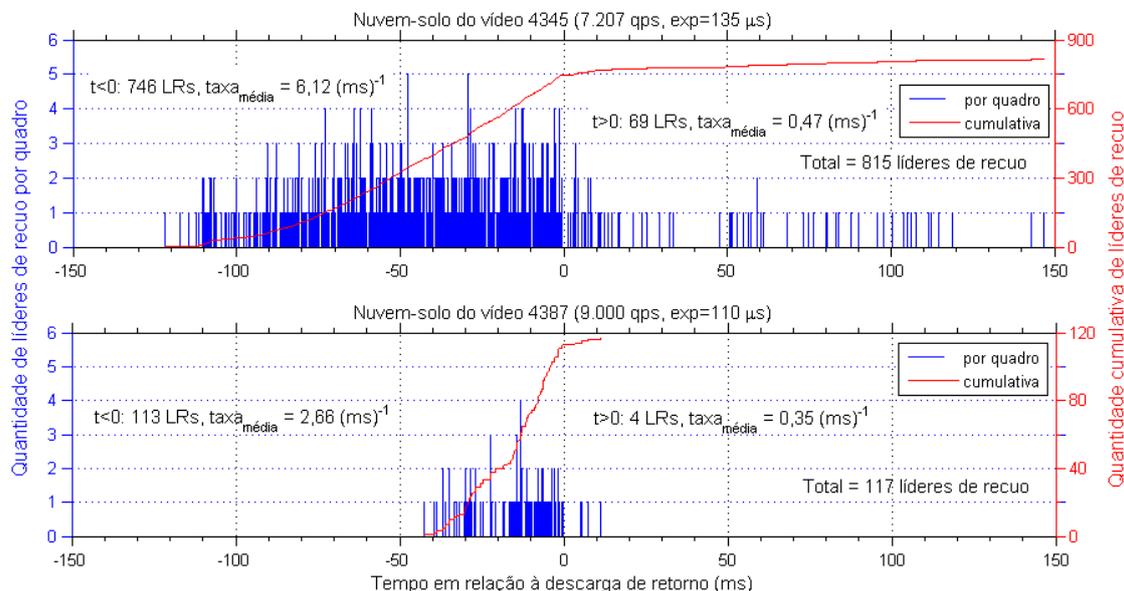


Figura 3.15 – Evolução da ocorrência de líderes de recuo em dois relâmpagos nuvem-solo positivos, calculados a partir do número de líderes de recuo (LRs) e do tempo do quadro.

Nos relâmpagos nuvem-solo positivos analisados (Figura 3.15), em geral e bastante representativa nestes dois casos, a característica mais evidente é a grande queda de ocorrência dos LRs após a conexão do líder com o solo e da consequente descarga de retorno (DR). A maioria dos líderes de recuo que ocorreram após a DR se deu em ramos horizontalizados e a minoria nos verticalizados.

Tal variação abrupta da taxa não ocorreu nos ascendentes negativos analisados (Figura 3.16), mas sim uma variação suave até o final do relâmpago. A taxa média de ocorrência e a quantidade total de LRs observados estão indicadas em cada caso. O relâmpago do vídeo 4348 não apresentou descarga de retorno, mas somente componentes impulsivas do tipo  $\alpha$ . As nove descargas de retorno do ascendente presente no vídeo 4387 estão indicadas como linhas pretas.

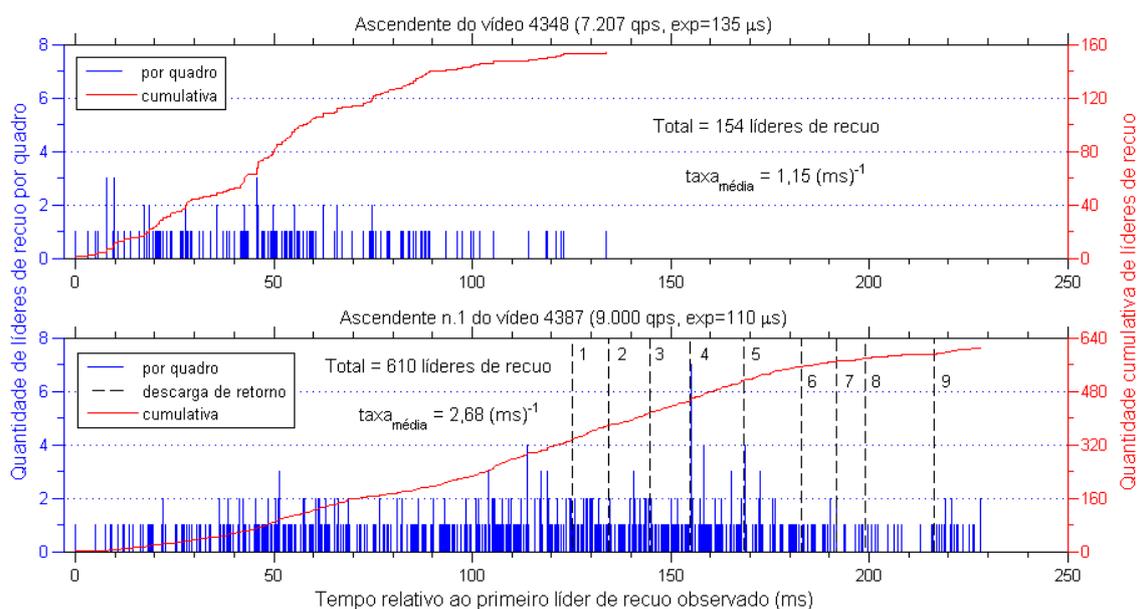


Figura 3.16 – Evolução da ocorrência de líderes de recuo em dois relâmpagos ascendentes negativos, calculados a partir do número de líderes de recuo (LRs) e do tempo do quadro.

As Tabelas 3.2 e 3.3 mostram as principais estatísticas dos casos analisados, respectivamente, de relâmpagos nuvem-solo e ascendentes. Todas as taxas médias nestes casos são da ordem de poucas unidades de  $(\text{ms})^{-1}$  ( $\sim 10^3$  Hz).

Tabela 3.2 – Estatística de ocorrência dos líderes de recuo observados nos relâmpagos nuvem-solo positivos analisados.

Vídeo do relâmpago	Antes da descarga de retorno			Depois da descarga de retorno			Geral		
	Quantidade	Duração (ms)	Taxa média $((\text{ms})^{-1})$	Quantidade	Duração (ms)	Taxa média $((\text{ms})^{-1})$	Quantidade	Duração (ms)	Taxa média $((\text{ms})^{-1})$
4345	746	121,82	6,12	69	146,81	0,47	815	268,62	3,03
4387	113	42,45	2,66	4	11,33	0,35	117	53,78	2,18

Tabela 3.3 – Estatística de ocorrência dos líderes de recuo observados nos relâmpagos ascendentes negativos analisados.

Vídeo do relâmpago	Durante a corrente contínua inicial			Durante as descargas de retorno			Geral		
	Quantidade	Duração (ms)	Taxa média ((ms) <sup>-1</sup> )	Quantidade	Duração (ms)	Taxa média ((ms) <sup>-1</sup> )	Quantidade	Duração (ms)	Taxa média ((ms) <sup>-1</sup> )
4348	154	133,76	1,15	-	-	-	154	133,76	1,15
4387	334	125,34	2,66	276	102,66	2,69	610	227,99	2,68

Sobre o intervalo de tempo de reincidência de líderes de recuo que se formam em um mesmo ramo parece existir um valor mínimo, observado neste estudo da ordem de unidades de ms. Como o ramo não é estático e se desenvolve entre cada ocorrência, é difícil a identificação do mesmo ramo. Entretanto, não foi observada nenhuma reincidência de líder de recuo em um mesmo ramo em um tempo da ordem de várias centenas de microssegundos ou inferior.



## 4 ANÁLISE DE REGISTROS DO LÍDER DE RECUO EM LÍDER POSITIVO DENTRO NA NUVEM

Nesta seção, é apresentada uma análise das assinaturas dos líderes de recuo de relâmpagos nuvem-solo negativos que ocorreram em seu líder positivo contido na nuvem, através de registros de câmeras rápidas e antenas de campo elétrico.

### 4.1. Metodologia

Os dados utilizados nesta análise pertencem ao banco de dados do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do INPE e foram obtidos em diferentes campanhas de observação na Dakota do Sul (EUA) em colaboração com Tom Warner. Tais dados são provenientes de basicamente dois tipos de instrumentos: antenas de campo elétrico e câmeras de alta velocidade. Os dados de ambos os instrumentos foram sincronizados por GPS e podem ser comparados na escala de submilissegundo, onde o mesmo evento pode ser facilmente identificado em ambos os registros de cada instrumento. O campo elétrico, porém, é o instrumento principal e mais sensível aos líderes, os quais nem sempre emitem luminosidade suficiente para atravessar a nuvem e sensibilizar a câmera rápida.

As antenas de campo elétrico são do tipo prato capacitiva de banda-larga para medição do campo vertical. Os dados de campo elétrico são provenientes de integradores amplificadores com duas constantes de tempo diferentes: (i) 310  $\mu$ s, chamado “campo rápido”, este com dois ganhos diferentes (1x e 10x), e (ii) 1,5 s, chamado “campo lento”. O sinal de saída dos integradores foi adquirido por um único sistema de aquisição de dados na taxa de aquisição de 5 MS/s<sup>19</sup> em 12 bits (Placa National Instruments NI6111)<sup>20</sup>.

---

<sup>19</sup> MS/s refere-se a milhões de amostras por segundo.

<sup>20</sup> A largura de banda em 3 dB resultante do integrador é de 17 Hz a 1,5 MHz (ULF a MF) (ALDIS, 2003). Pelo critério de amostragem de Nyquist, a maior frequência que pode ser adequadamente representada é 2,5 MHz ( $f_{\text{máx.}}$ ), metade da frequência de amostragem (5,0 MHz). As emissões do relâmpago em frequências superiores (basicamente HF em diante) são, portanto, subamostradas e representadas como sendo no máximo  $f_{\text{máx.}}$ .

Os vídeos de alta velocidade foram obtidos na taxa de 10.000 qps por uma ou duas câmeras com tempos de exposição de cada quadro de 89,4 a 99,4  $\mu$ s (~89-99% de exposição entre cada início de quadro). O tempo indicado em cada quadro refere-se ao final de sua exposição. A câmera rápida, como instrumento complementar da antena de campo elétrico, foi fundamental para identificar os processos ocorridos entre o solo e a base da nuvem, como a ocorrência de corrente contínua e também as descargas de retorno. Os quadros mostrados neste capítulo são apresentados em sequências descontínuadas (ou seja, foram selecionados alguns quadros da sequência original do vídeo e arranjados de modo a ilustrar mais evidentemente certas características de cada caso com o mínimo espaço de página).

Os casos selecionados foram 16 relâmpagos nuvem-solo negativos observados em ambos os instrumentos, com boa visibilidade de canal para o solo e razão sinal/ruído no campo elétrico superior a 20. A identificação individual de cada líder de recuo se deu principalmente através de sua assinatura de campo elétrico. Não foram contabilizados eventuais líderes de recuo ocorridos antes da primeira descarga de retorno. Líderes de recuo que ocorreram quase simultaneamente, e cujas assinaturas de campo elétrico se sobrepuseram e se confundiram, foram classificados como um único evento.

A Tabela 4.1 mostra informações gerais dos registros utilizados. A razão sinal/ruído do campo elétrico rápido foi calculada pela divisão da média dos picos de campo elétrico das descargas de retorno pelo nível do ruído (pico até zero) para o integrador de maior ganho.

Tabela 4.1 – Conjunto dos 16 relâmpagos nuvem-solo negativos analisados neste estudo.

n.	Identificação do relâmpago	Data da observação	Quant. de câmeras utilizadas	Tempo de exposição do quadro ( $\mu$ s)	Condições de luminosidade	Razão sinal/ruído do campo elétrico	Total de líderes de recuo identificados
1	M12P95	21/07/2012	2	99,4/98,4	Entardecer com luz difusa no	57,9	90
2	M12P91	17/07/2012	2	99,4/98,4	Noturna sem luminosidade da Lua	82,6	103
3	M12P90					99,0	77
4	M12P35	23/06/2012	2	99,4/89,4	Noturna sem luminosidade da Lua	169,6	256
5	M10P32	01/07/2011	1	99,4	Noturna com a luminosidade da Lua difusa de atrás da nuvem	60,6	36
6	M10P31					46,5	27
7	M10P30					64,5	59
8	M10P26	26/06/2011	1	99,4	Noturna sem luminosidade da Lua	40,4	339
9	M10P20					113,8	235
10	M10P19					61,6	42
11	M10P18					47,9	96
12	M10P17					109,5	76
13	M10P16	25/06/2011	1	99,4	Entardecer com luz difusa no horizonte	38,9	178
14	M10P15					22,1	141
15	M10P14					26,4	215
16	M10P11					69,9	38

A Figura 4.1 traz um gráfico relacionando a taxa média e a quantidade total de líderes de recuo em termos da razão sinal/ruído. Cada par de variáveis possui um mesmo valor na abscissa e representa um mesmo evento. O nível de ruído foi medido como o valor entre zero e o seu máximo. Apesar de um reduzido nível de ruído no campo elétrico proporcionar a observação dos líderes de recuo de menor intensidade, tanto a quantidade total quanto a taxa média de líderes de recuo não se mostraram dependentes da razão sinal/ruído nos casos analisados.

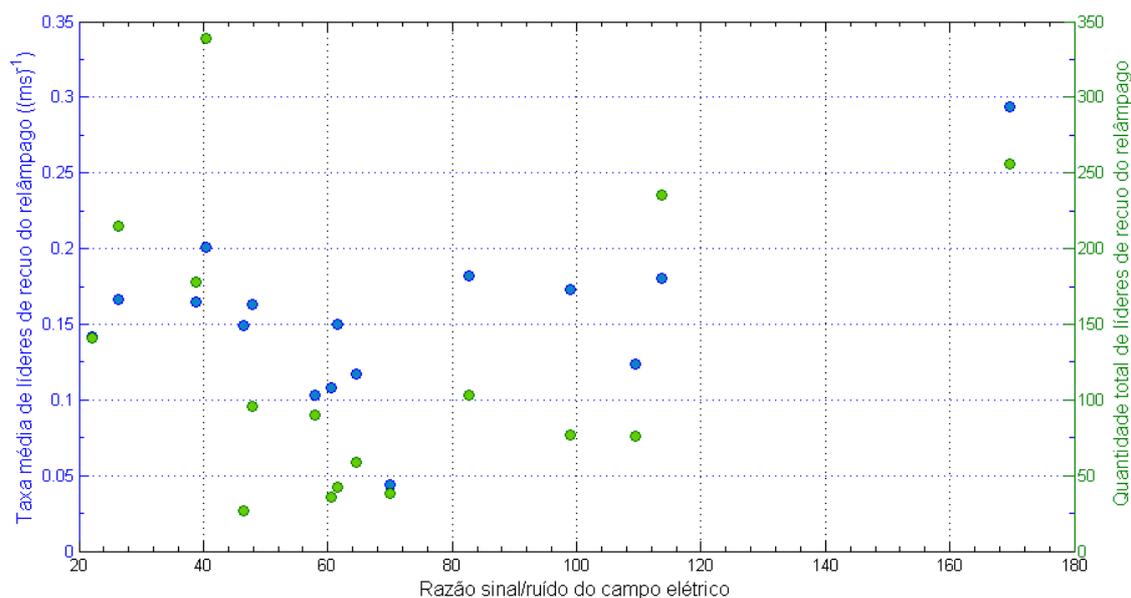


Figura 4.1 – Taxa média (azul) e quantidade total (verde) de líderes de recuo em relação à razão sinal/ruído do campo elétrico para cada um dos 16 relâmpagos nuvem-solo negativos analisados.

#### 4.1.1. Limitações da técnica utilizada

As limitações mais relevantes da técnica conjugada utilizada (campo elétrico e vídeo de alta velocidade) nesta análise foram:

- a) Luminosidade do líder de recuo atenuada e difusa na nuvem: como a maioria dos líderes de recuo ocorreram dentro da nuvem, sua visualização foi limitada (ao contrário da análise do cap.3), prejudicando especialmente aqueles de baixa intensidade ou que ocorreram próximos e simultâneos; tal limitação subestima a quantidade de líderes de recuo;
- b) Resolução temporal da câmera rápida (como na análise do cap.3), que impediu a identificação do sentido de propagação de líder de recuo de curta duração e comprimento ou o confundiu com uma mera intensificação (desenvolvimento progressivo) de certo ramo de líder;
- c) Razão sinal/ruído do campo elétrico rápido, que despreza a identificação de líderes de recuo de baixa intensidade e/ou cuja disposição geométrica de sua

trajetória em relação à antena (de campo elétrico vertical) faça a variação de campo elétrico vertical ser abaixo do nível de ruído.

## **4.2. Características observadas do líder de recuo**

Nesta seção foram analisadas as características do líder de recuo em termos de: (i) suas assinaturas, os fenômenos de (ii) agrupamento e de (iii) interatividade cíclica entre líderes de recuo.

### **4.2.1. Assinaturas dos líderes de recuo**

Dentre os 2.008 líderes de recuo observados, 1.185 (59%) tiveram pulsos de luminosidade associados registrados; e em 719 casos (61% de 1.185 ou 36% de 2.008) foi possível identificar um pulso luminoso propagando em direção ao ponto de conexão no solo (retrógrado, que é característico do líder de recuo), incluindo os casos de subsequente componente M, que revelou também a propagação retrógrada em direção ao solo. A antena de campo elétrico e a câmera rápida nem sempre são sensibilizados ao mesmo tempo devido às variações das condições de observação de cada relâmpago.

A assinatura do líder de recuo no campo elétrico rápido mostrou-se muito diversificada e pouco padronizada. Entretanto, o elemento mais comum na assinatura dos eventos observados foi uma variação transitória, suave, unipolar e com decaimento exponencial no campo elétrico, podendo ser de qualquer polaridade, com duração de centenas de microssegundos a poucas unidades de milissegundos. Essa variação transitória apareceu sozinha ou agrupada com outras e assemelha-se ao registro de campo elétrico do evento M de Mazur e Ruhnke (2013) (Figura 2.39), bem como o deslocamento de cargas presente em outros processos do relâmpago, como o da Figura 2.18 (AL1) e da Figura 2.21 (M<sub>1</sub>-M<sub>4</sub>).

Outros elementos da assinatura que foram observados combinados à variação transitória ou, por vezes, sozinhos: (i) picos de amplitude comparável ou maior do que o da variação; e/ou (ii) trens de pulsos de alta frequência no início, no meio ou no final da variação.

As Figuras 4.2 e 4.3, bem como os demais registros de campo elétrico desta seção, mostram eventos de líderes de recuo que ilustram variações de assinaturas. O triângulo branco indica a posição de contato do canal na descarga de retorno anterior. É possível identificar o sentido retrógrado da luminosidade em direção ao tronco do relâmpago. No campo elétrico, pulsos de altas frequências aparecem sobrepostos à variação relativamente suave de cada líder de recuo.

A Figura 4.2 mostra um exemplo de registro que possivelmente corresponde a um único líder de recuo. Sua assinatura de campo elétrico é formada por uma única variação impulsiva, porém suave, sobreposta por alguns pulsos de altas frequências.

Na Figura 4.3, é possível identificar o líder de recuo (LR a) iniciado em ~820 ms, que se desenvolve como líder contínuo até ocasionar a descarga de retorno (822,922 ms, quadro 823,000 ms). Após a componente estática (saturada) da descarga de retorno (DR3), outro líder de recuo (LR b) ocorre logo após a DR, em 823,827 ms. Neste registro, em relação ao da Figura 4.2, aparecem mais pulsos de altas frequências, bem como trem de pulsos (após o pico de LR a).

A polaridade<sup>21</sup> da variação comum aos pulsos (ignorando qualquer pulso em alta frequência) se mostrou estar associada principalmente à trajetória do líder de recuo em relação à antena, como pode observado nas Figuras 4.4 e 4.5.

---

<sup>21</sup> Os registros de campo elétrico aqui apresentados estão de acordo com a convenção de sinal da eletricidade atmosférica, *i.e.*, o vetor de campo elétrico apontado para baixo é considerado positivo.

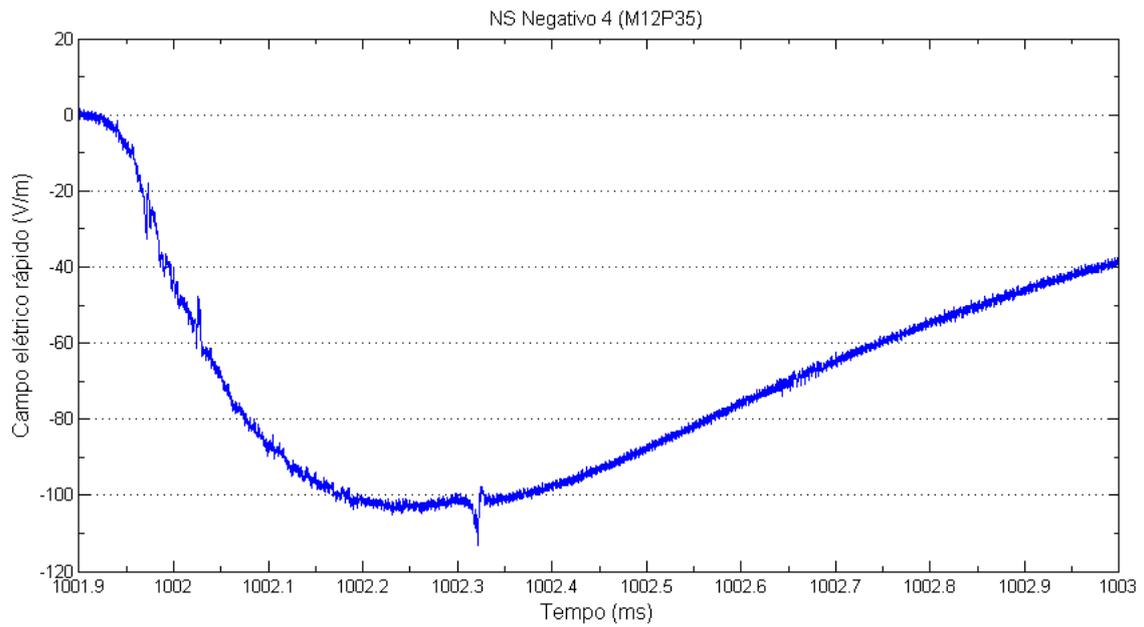
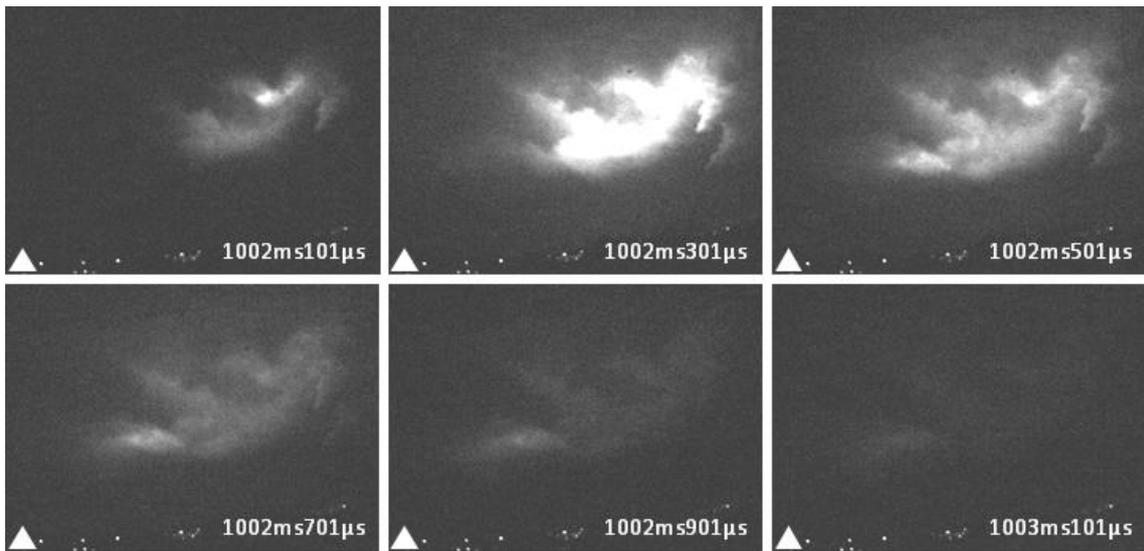


Figura 4.2 – Líder de recuo que ocorreu após a quarta e última descarga de retorno do relâmpago nuvem-solo negativo 4 (M12P35).  
 Fonte: Banco de dados do ELAT (2014).

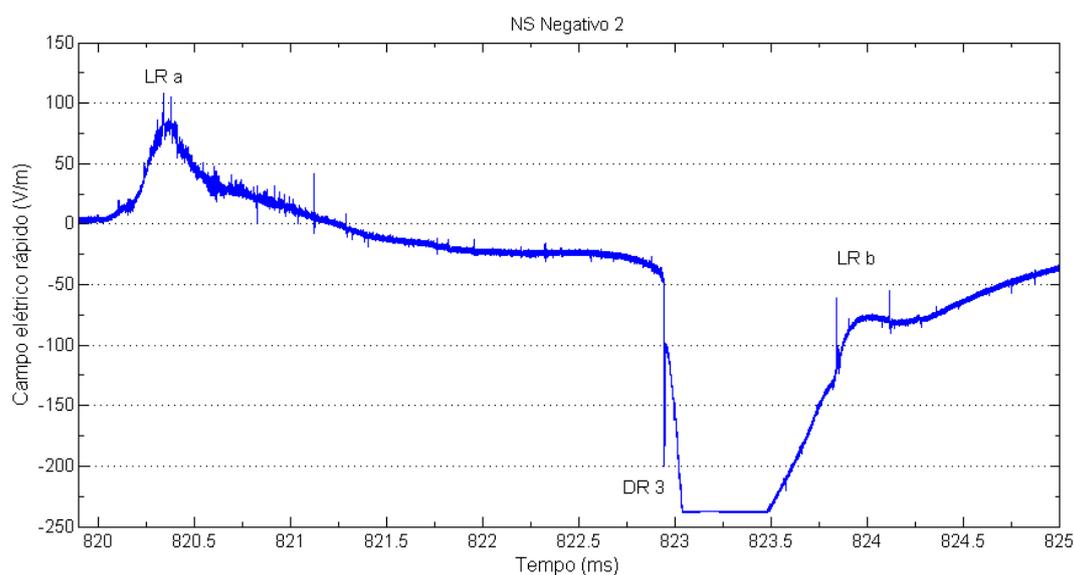


Figura 4.3 – Líderes de recuo ocorridos ao redor da terceira descarga de retorno (DR 3) do relâmpago NS negativo 2 (M12P91) mostrados na sequência descontinuada de quadros da câmera rápida (10.000 qps, exp. de 99  $\mu$ s) e no campo elétrico rápido.

Fonte: Banco de dados do ELAT (2014).

#### 4.2.2. Agrupamento de líderes de recuo

Os líderes de recuo, com bastante frequência, apresentaram-se agrupados, não ocorrendo nesses casos de modo independente e aleatório. As Figuras 4.4 a 4.7 mostram exemplos deste comportamento onde ambos os instrumentos puderam registrar claramente.

No caso da Figura 4.4, pode-se observar um líder de recuo que se inicia ( $\sim 716,8$  ms) e propaga em direção ao canal conectado ao solo durante a corrente contínua que se seguiu após a única descarga de retorno (quadros 716,890 a 717,390 ms). Logo em seguida ( $\sim 718,4$  ms), um líder de recuo é disparado e propaga vindo de outra direção. Este líder, ou grupo de líderes, conecta-se ao canal principal e provoca uma componente M ( $\sim 719,0$  ms). Pode-se notar que, enquanto houve inversão de polaridade das assinaturas, um líder se aproximou e o outro se afastou da antena, evidenciando uma relação direta entre os fatos. É possível que as variações ocorridas após  $\sim 718,4$  ms se devam a um grupo de líderes de recuo por causa da intensa e persistente luminosidade na mesma região da nuvem e pela complexa assinatura de campo elétrico composto por dois ou mais pulsos sobrepostos.

A Figura 4.5 exhibe eventos que ocorreram em seguida aos contidos na Figura 4.4, ainda durante a corrente contínua do mesmo raio. Neste caso, entretanto, os líderes de recuo registrados no vídeo são provenientes da mesma região. É possível identificar três fases de líderes de recuo iniciados em 721,2 ms, 721,8 ms e 722,4 ms, respectivamente. Tais líderes de recuo provavelmente contribuíram para a componente M. O primeiro líder de recuo produziu pouca luminosidade e somente um trem de pulsos de alta frequência. Já os líderes seguintes produziram maior luminosidade e maior deslocamento de cargas, além de trens de pulsos e picos em alta frequência, e que provavelmente produziram a subsequente componente M.

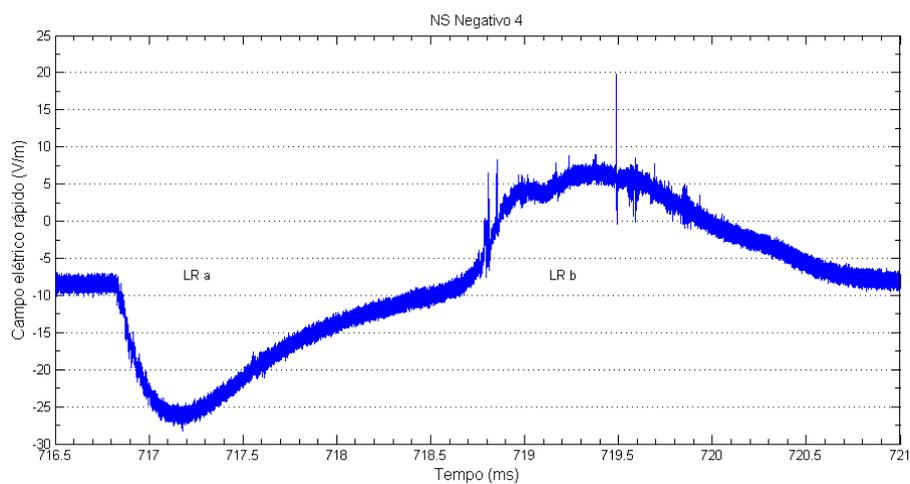
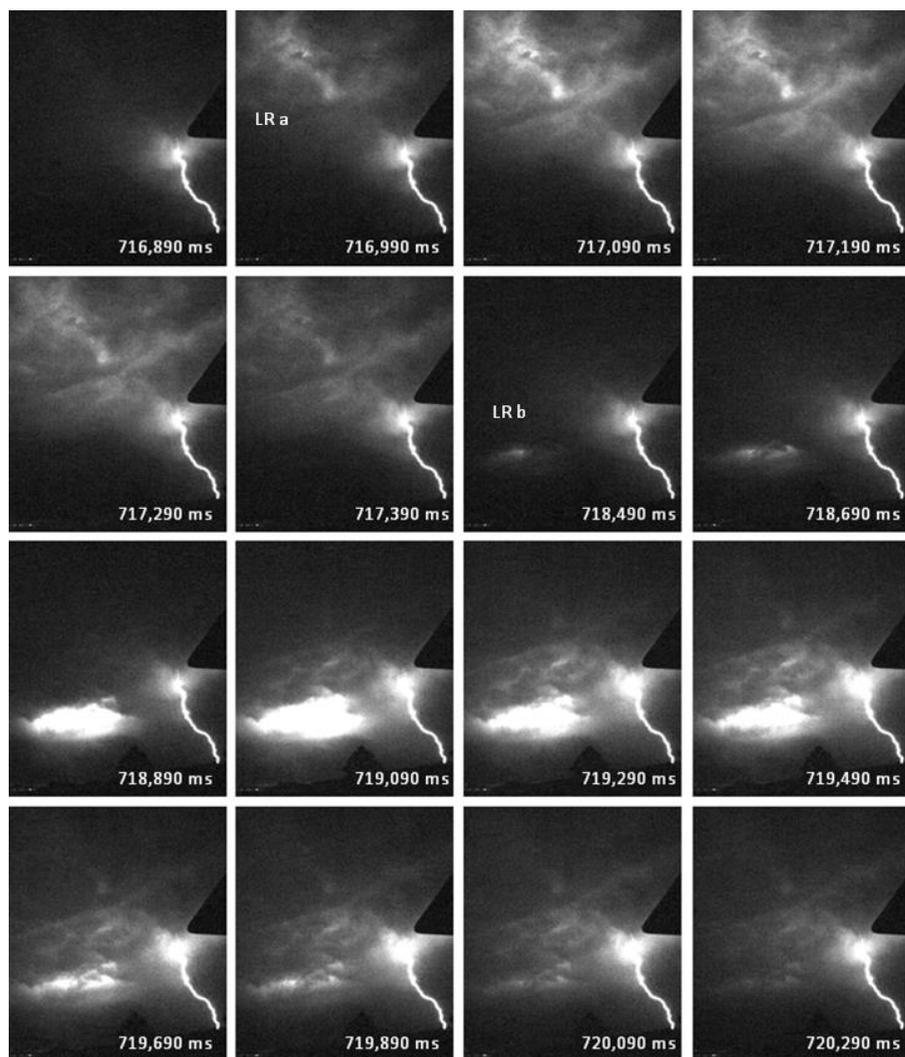


Figura 4.4 – Líderes de recuo ocorridos em regiões diferentes da nuvem durante a corrente contínua que se seguiu após a única descarga de retorno do relâmpago NS Negativo 4 (M12P35). Tempo de exposição do quadro de 99,4  $\mu$ s. Fonte: Banco de dados do ELAT (2014).

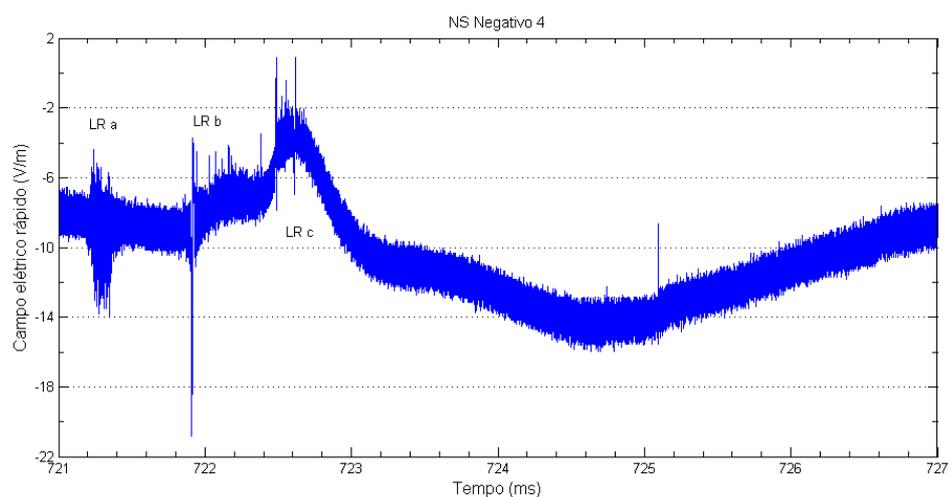
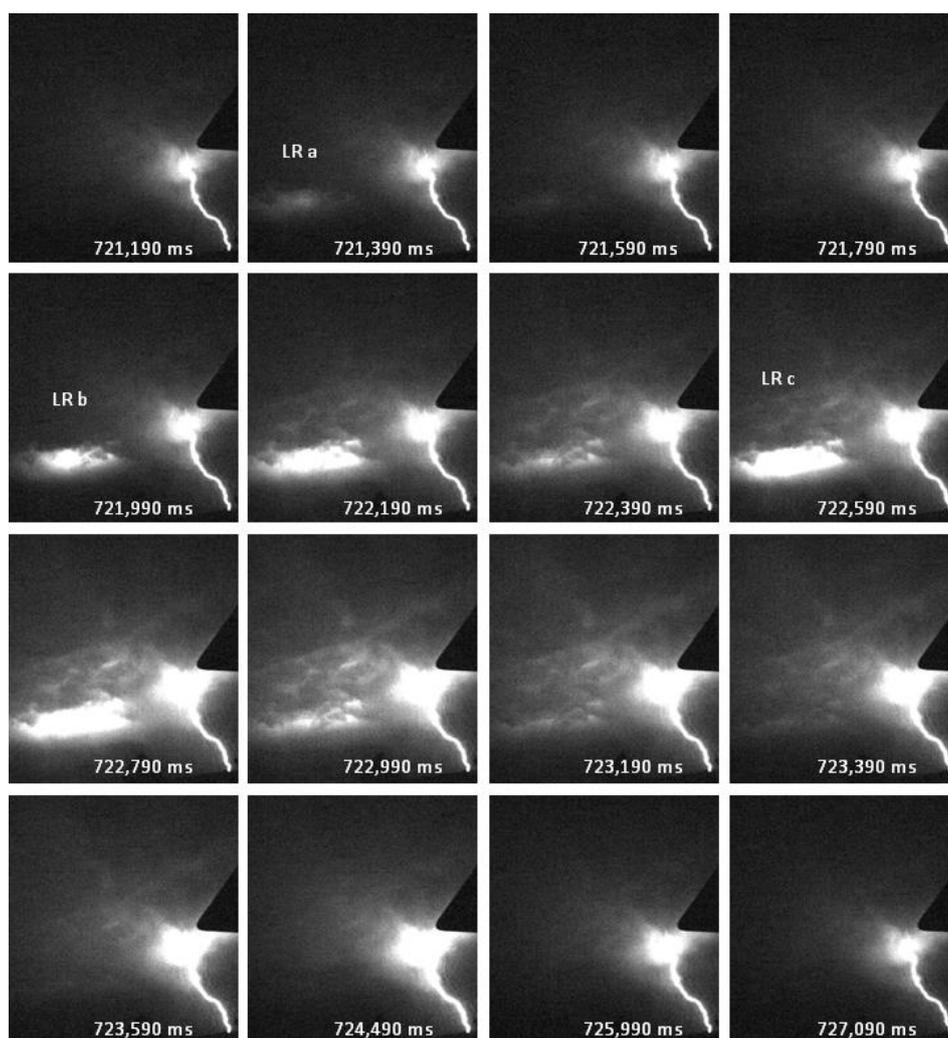


Figura 4.5 – Sequência de líderes de recuo ocorrida durante a corrente contínua do relâmpago NS Negativo 4 (M12P35), originados na mesma região da nuvem (continuação da série apresentada na Figura 4.4). Tempo de exposição do quadro de 99,4  $\mu$ s. Fonte: Banco de dados do ELAT (2014).

Na Figura 4.6, ainda para o mesmo relâmpago, mas após a corrente contínua, dois líderes de recuo ocorreram um após o outro. É possível notar pelo padrão de luminosidade que ambos procedem da mesma região da nuvem, provavelmente envolvendo trechos da árvore em comum. Suas assinaturas de campo elétrico iniciam-se em  $\sim 1225,1$  ms e  $\sim 1227,2$  ms, respectivamente.

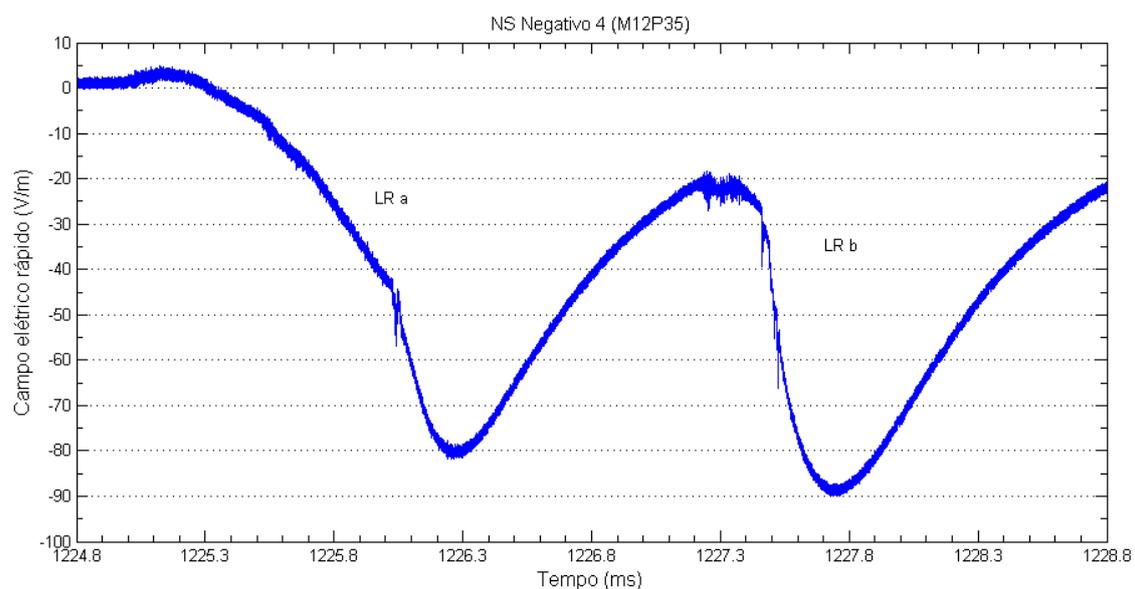
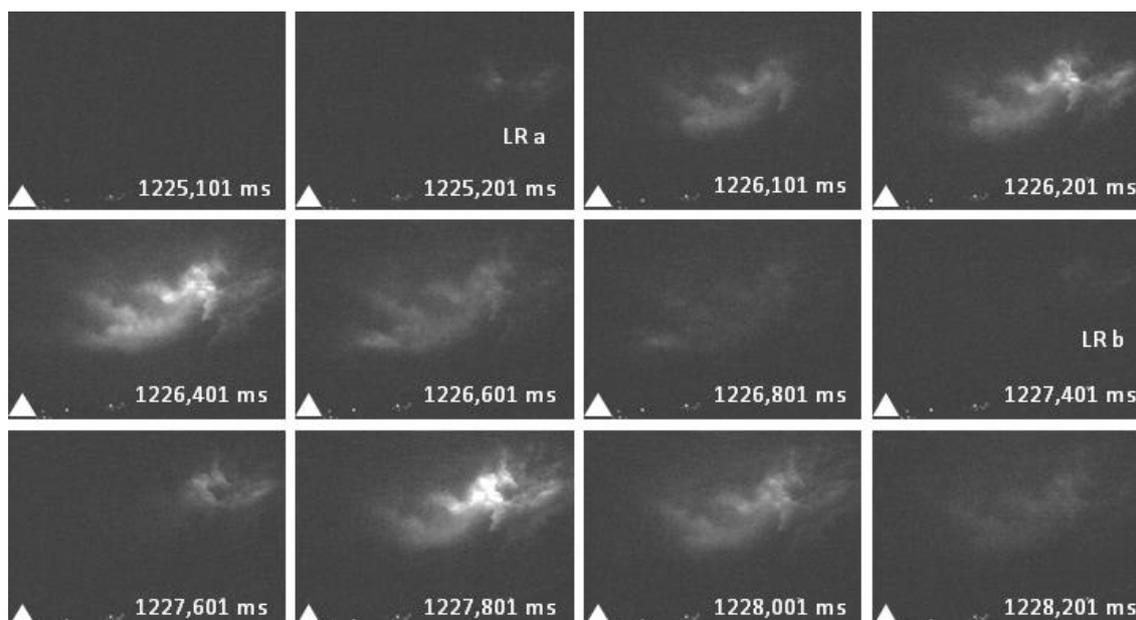


Figura 4.6 – Sequência de dois líderes de recuo ocorrida após o término da corrente contínua do relâmpago NS negativo 4 (M12P35), originados na mesma região da nuvem. Tempo de exposição do quadro de 99,4  $\mu$ s. Fonte: Banco de dados do ELAT (2014).

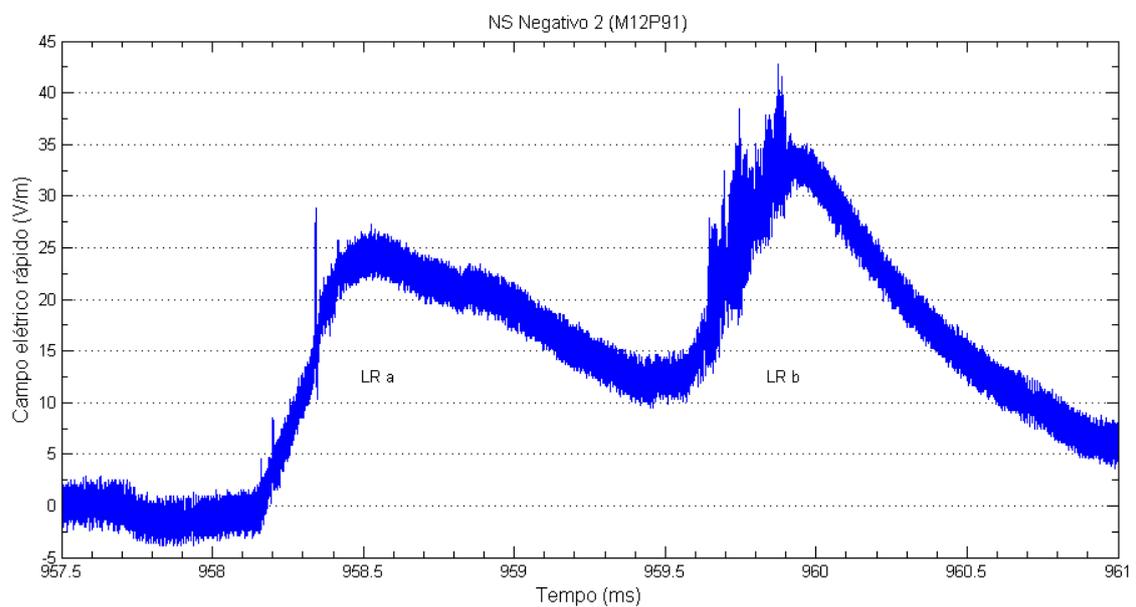
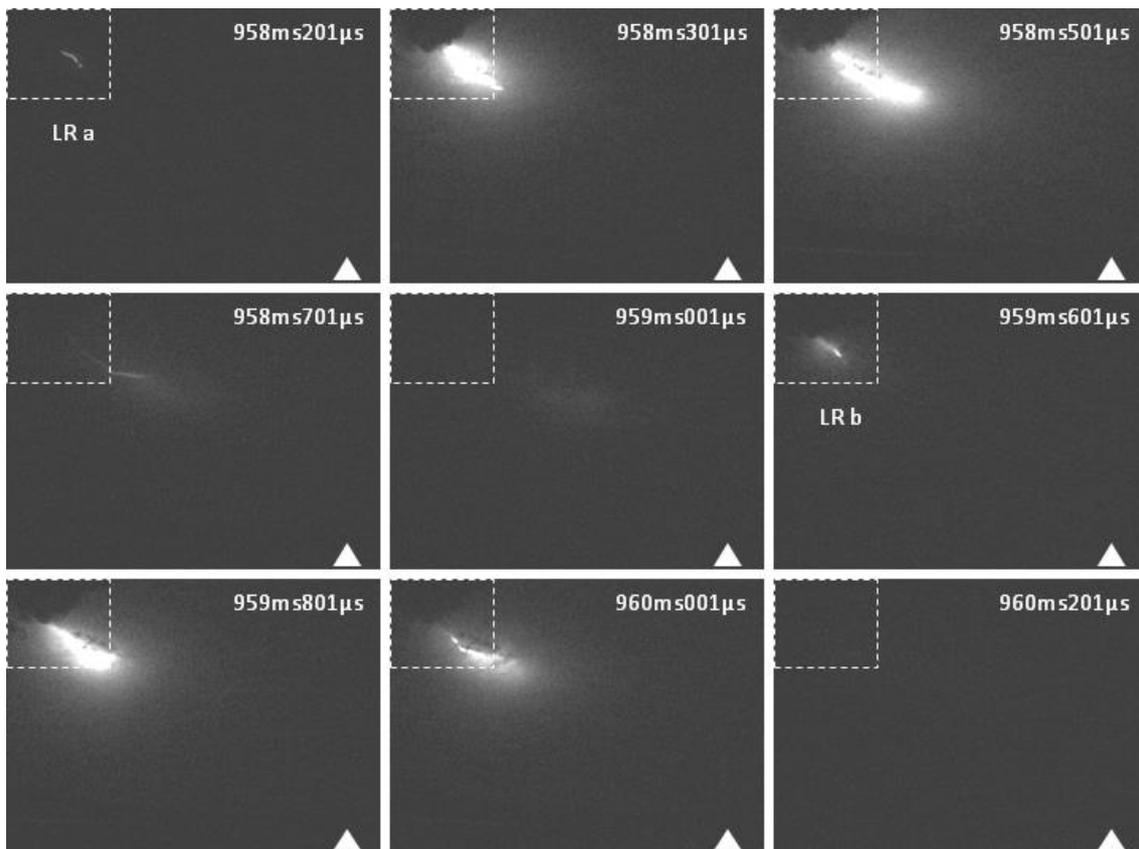


Figura 4.7 – Dois líderes de recuo formados em ramos próximos e distintos no relâmpago NS negativo 2 (M12P91).

Fonte: Banco de dados do ELAT (2014).

A sequência de líderes de recuo da Figura 4.7, ocorridos em outro relâmpago, também procedem da mesma região limítrofe da nuvem. Neste caso, é possível identificar os diferentes ramos que recebem os líderes de recuo. O primeiro aparece claramente fora da nuvem, enquanto o segundo está levemente encoberto. Cada transiente luminoso é acompanhado variações similares no campo elétrico, iniciadas em ~958,1 ms e ~959,5 ms, respectivamente. Pela proximidade dos ramos, é possível que possuam entroncamento comum.

Nos casos das Figuras 4.6 e 4.7, o par de líderes possui assinaturas de campo elétrico e padrões de luminosidade semelhantes.

#### 4.2.3. Interatividade cíclica entre líderes de recuo

Foi observado um comportamento característico em diferentes relâmpagos onde os líderes de recuo foram disparados alternadamente com processos de intensificação da corrente no canal conectado ao solo, particularmente descarga de retorno e componentes M, com intervalo de tempo da ordem de unidades de milissegundos. Ao invés de uma mera sequência aleatória, este comportamento sugere uma interatividade dos processos (processos em cadeia) e, portanto, que o processo *a* (*e.g.*, descarga de retorno) foi responsável por disparar o processo *b* (*e.g.*, líder de recuo), que, por sua vez, provoca *c* (*e.g.*, componente M), e assim por diante ( $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow \dots$ ). A Figura 4.8 ilustra a sequência observada. A separação temporal observada entre cada um dos processos é da ordem de unidades de milissegundos. O ciclo indicado pode repetir *n* vezes.

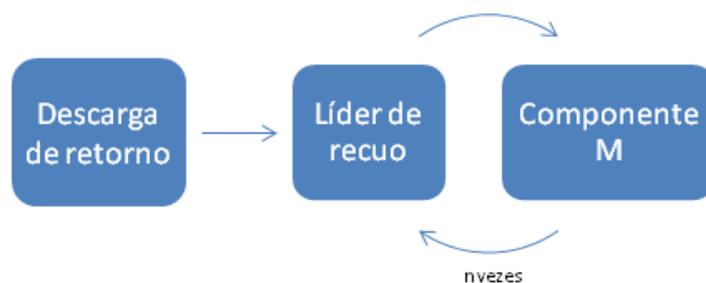


Figura 4.8 – Fluxograma dos processos observados na interatividade cíclica entre de líderes de recuo em alguns relâmpagos nuvem-solo negativos.

São apresentados nesta seção dois casos onde foi observada de maneira mais expressiva a interatividade cíclica, embora também tenha sido observada em outros casos (*e.g.*, M10P16, M10P26, M12P35). No caso M10P14 (Figura 4.9), foram observados quatro líderes de recuo concatenados ( $n = 4$ ), enquanto que no caso M10P18 (Figura 4.10) foram observados seis líderes de recuo concatenados ( $n = 6$ ). Em ambos os casos, todos os líderes de recuo, incluindo o líder contínuo, originaram-se aparentemente da mesma região da nuvem em cada caso.

Outros líderes de recuo eventualmente ocorreram durante a sequência de processos, porém de intensidade próxima ao nível de ruído dos equipamentos. Possivelmente tais líderes participaram da cadeia dos processos identificados, disparando e/ou sendo disparados por estes, mas não foi possível a identificação clara de suas assinaturas.

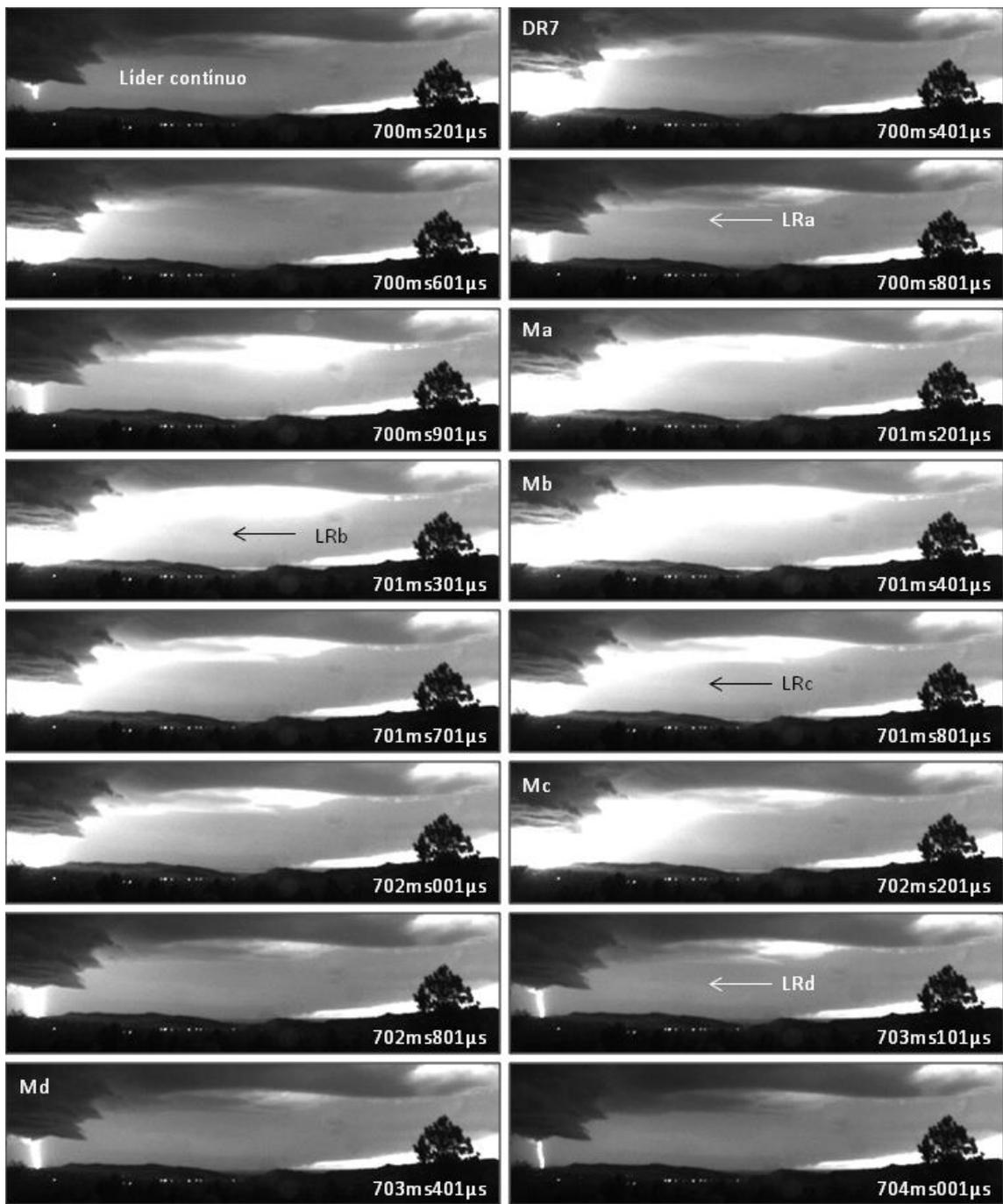


Figura 4.9 – Sequência de quatro líderes de recuo (LRa-LRd) intercalados por componentes M (Ma-Md) após a sétima descarga de retorno (DR7) do relâmpago NS negativo 15 (M10P14). (Continua)  
 Fonte: Banco de dados do ELAT (2014).

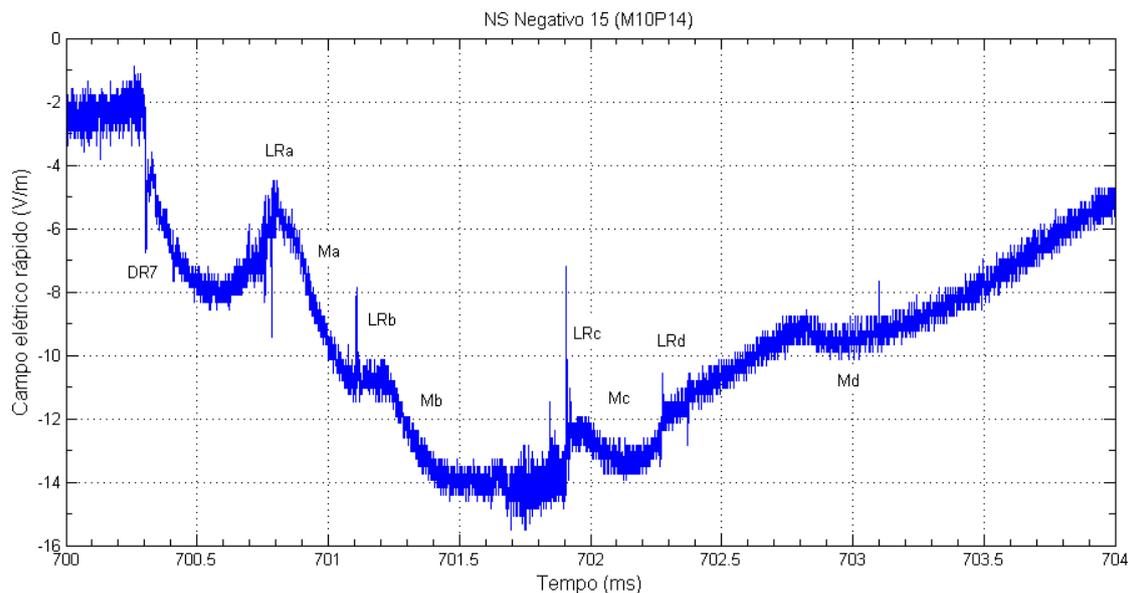


Figura 4.9 – Conclusão.

Na Figura 4.10, pode-se notar uma assinatura sobreposta à do líder de recuo LRA, provavelmente de outro líder de recuo. O líder de recuo LRB ocorreu quase simultaneamente à componente M Ma e suas assinaturas de campo e na câmera não apareceram muito distintas. Todos os líderes de recuo, incluindo o líder contínuo, originaram-se aparentemente da mesma região da nuvem (oval tracejada).

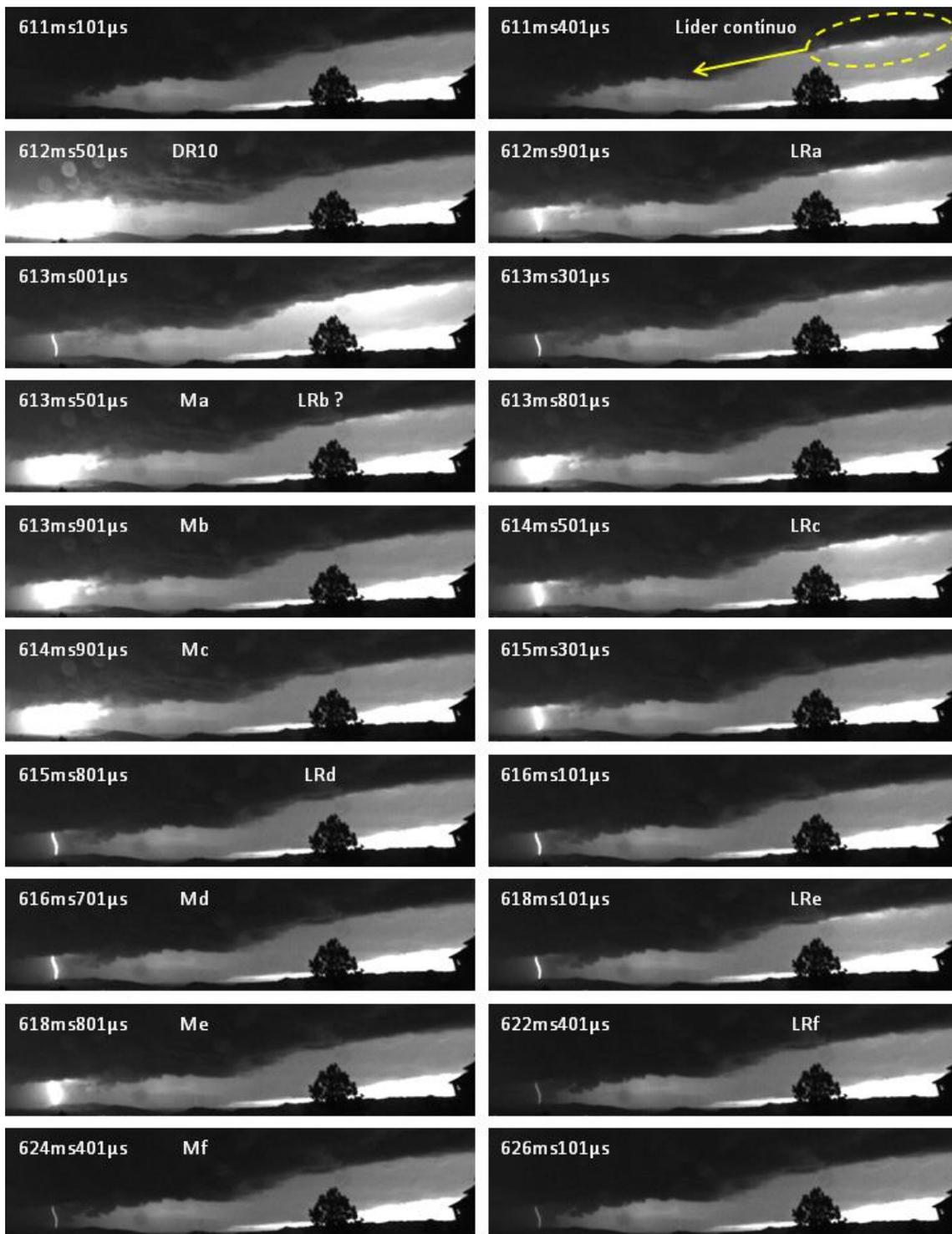


Figura 4.10 – Sequência de seis líderes de recuo (LRa-LRf, defletindo para cima) intercalados por componentes M (Ma-Mf, defletindo para baixo) após a décima descarga de retorno (DR10) do relâmpago NS negativo 11 (M10P18). (Continua)  
 Fonte: Banco de dados do ELAT (2014).

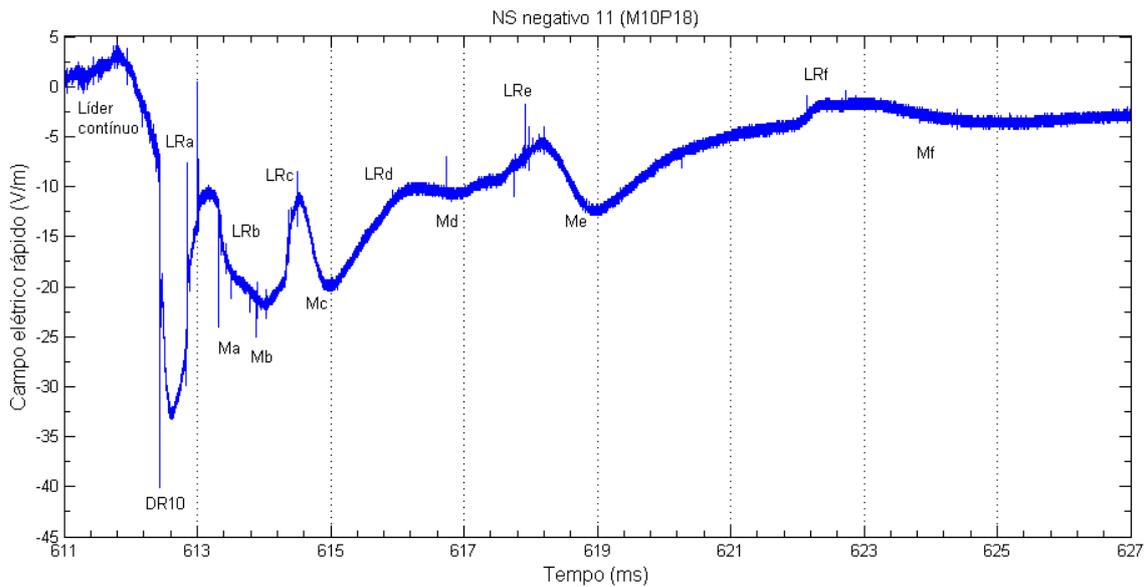


Figura 4.10 – Conclusão.

### 4.3. Evolução cumulativa e temporal dos líderes de recuo

Nesta seção, é apresentada a evolução cumulativa e temporal dos líderes de recuo para todos os 16 relâmpagos nuvem-solo negativos analisados, paralelamente às ocorrências de suas descargas de retorno e correntes contínuas. Na Figura 4.11, pode-se comparar todos os relâmpagos juntos, porém separados em dois grupos, os de baixa multiplicidade ( $M=1$  a 4) e os de alta multiplicidade ( $M=5$  a 14). O grupo de altas multiplicidades de descargas de retorno apresenta tendências para maiores valores de duração e de quantidade total de líderes de recuo em comparação com o grupo de baixas multiplicidades. Entretanto, percebe-se grande variabilidade da quantidade total de líderes de recuo em termos de multiplicidade, apesar da pequena amostragem (16 eventos). Como foi mencionado na § 4.1 (Figura 4.1), a contagem de líderes de recuo (LRs) não parece depender da razão sinal/ruído do campo elétrico e, portanto, a variação da quantidade total de LRs de cada relâmpago provavelmente depende de outros fatores e condições (*e.g.*, ambiente elétrico, estrutura e geometria dos canais).

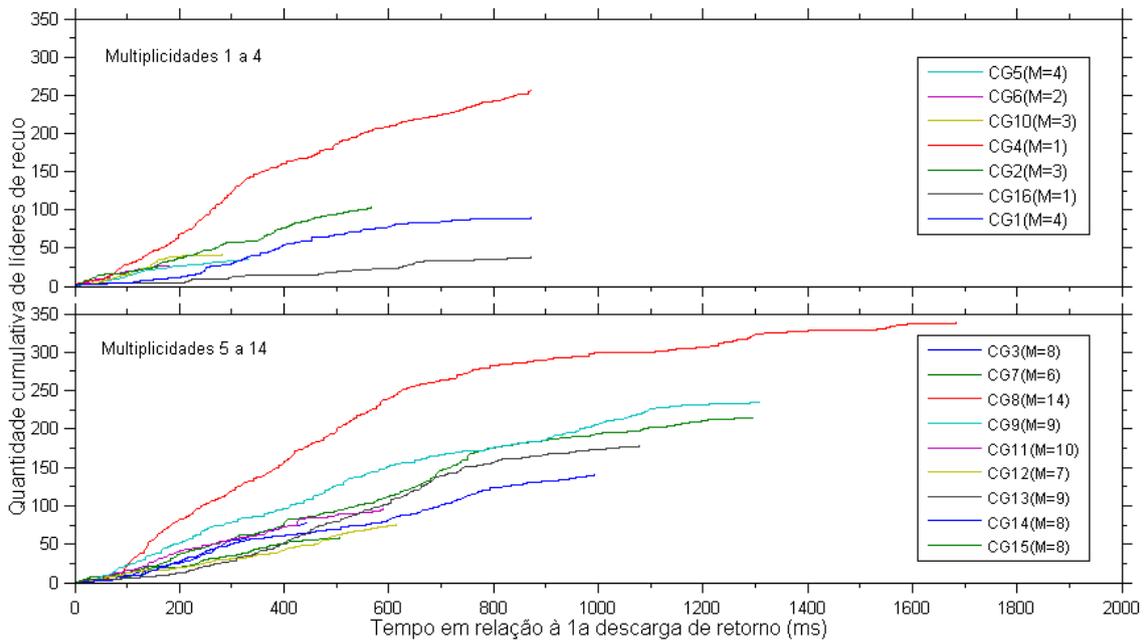


Figura 4.11 – Quantidade cumulativa de líderes de recuo ao longo da vida dos 16 relâmpagos nuvem-solo negativos analisados, separada em dois grupos de acordo com o valor de multiplicidade de descargas de retorno (M).

#### 4.3.1. Casos individuais

Nesta seção é mostrada a evolução da quantidade cumulativa de líderes de recuo ao longo do tempo de vida de cada um dos 16 relâmpagos nuvem-solo negativos analisados em comparação aos eventos de descarga de retorno e corrente contínua (Figura 4.12 até Figura 4.27). A Figura 4.12, por exemplo, mostra o relâmpago 1 (M12P95), que possui quatro descargas de retorno, cada uma delas seguida por corrente contínua de considerável duração.

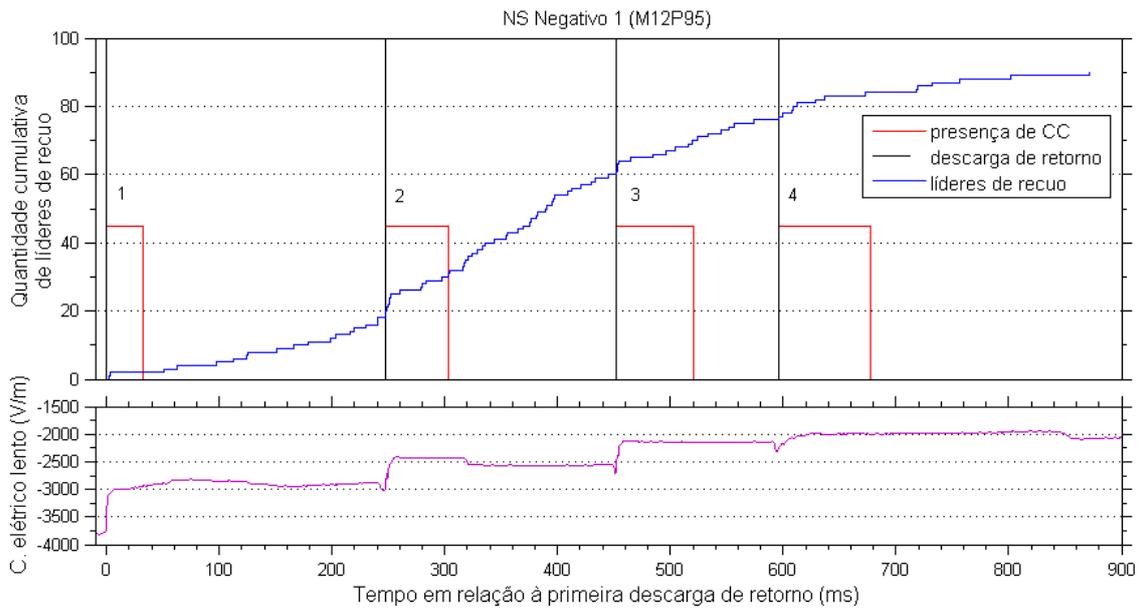


Figura 4.12 – Quantidade cumulativa de líderes de recuo (azul), descargas de retorno (preto), presença de corrente contínua (vermelho) observados através da câmera rápida e do campo elétrico rápido e campo elétrico lento do relâmpago nuvem-solo negativo 1 (M12P95).

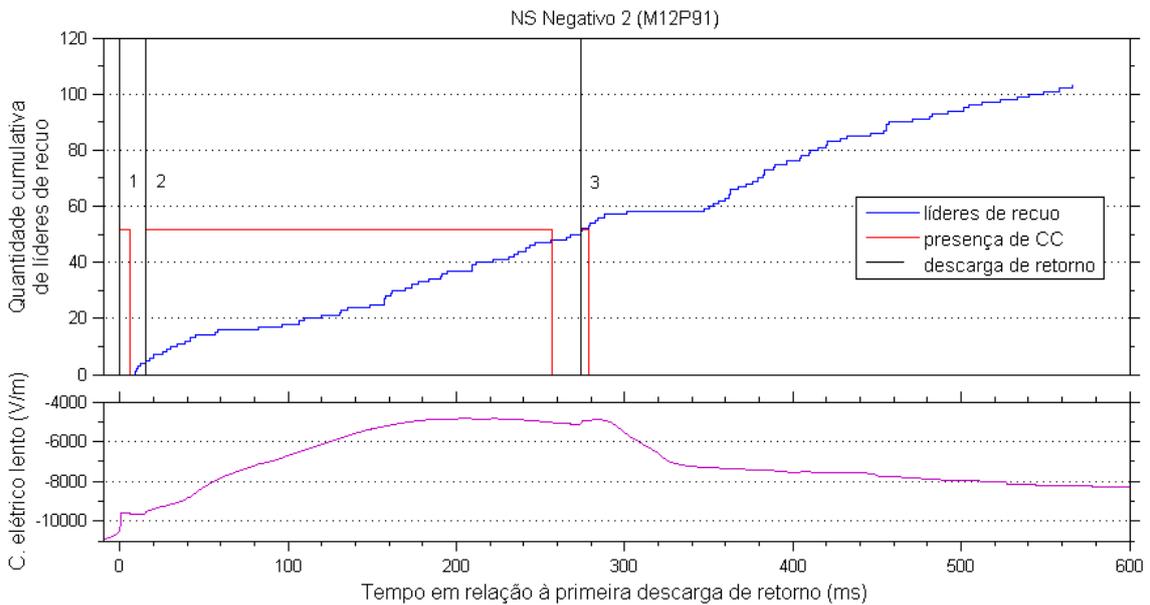


Figura 4.13 – Relâmpago nuvem-solo negativo 2 (M12P91) com três descargas de retorno e corrente contínua longa após a segunda. Detalhes na Figura 4.12.

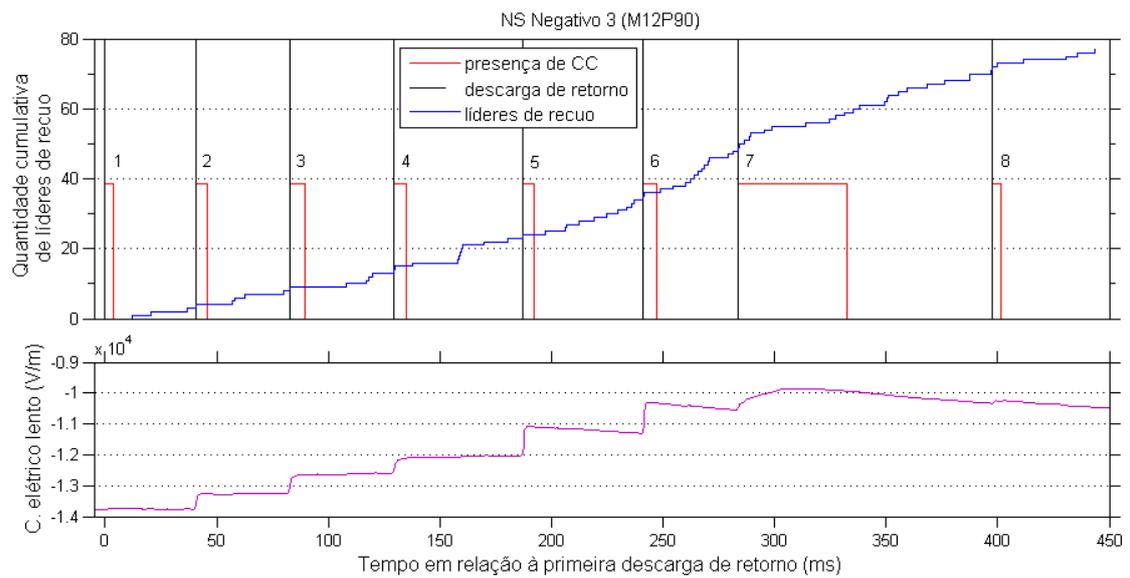


Figura 4.14 – Relâmpago nuvem-solo negativo 3 (M12P90) com oito descargas de retorno e corrente contínua longa após a sétima. Detalhes na Figura 4.12.

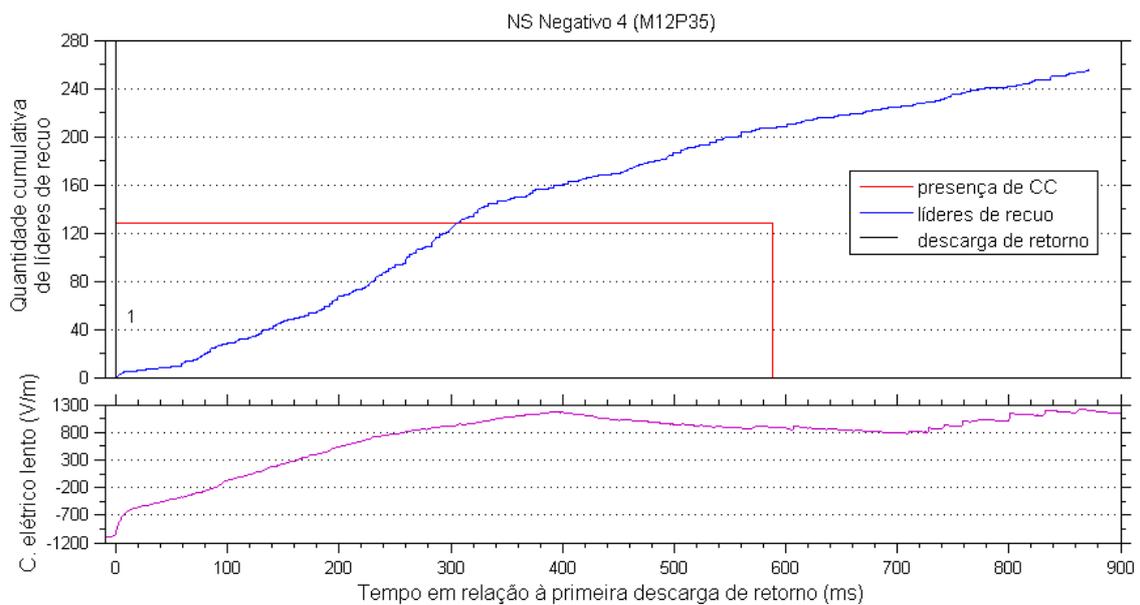


Figura 4.15 – Relâmpago nuvem-solo negativo 4 (M12P35) com uma descarga de retorno seguida por uma corrente contínua longa. Detalhes na Figura 4.12.

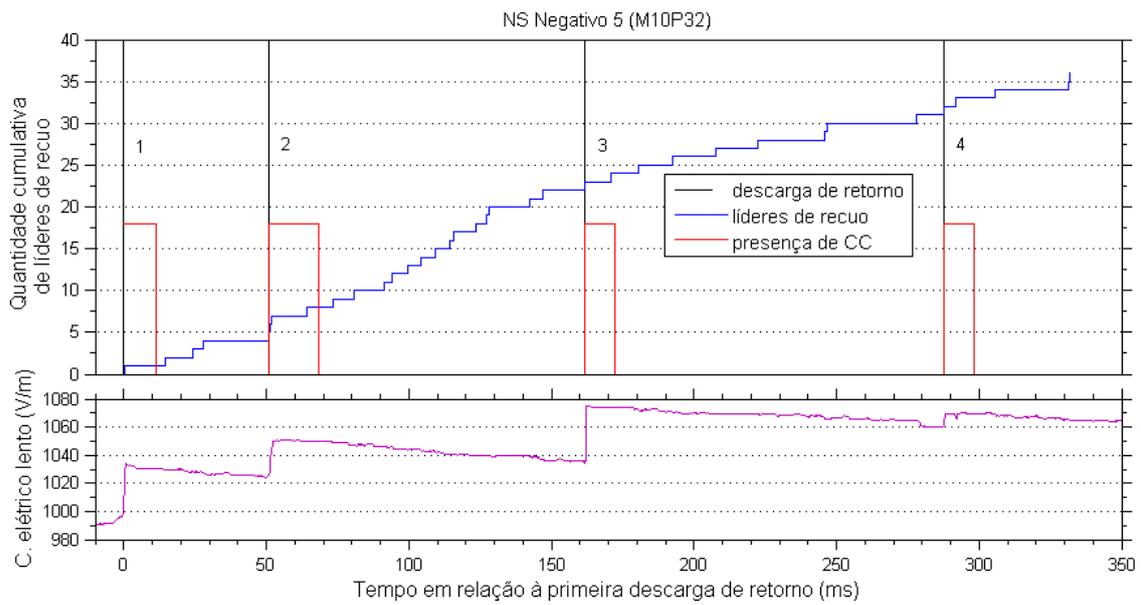


Figura 4.16 – Relâmpago nuvem-solo negativo 5 (M10P32) com quatro descargas de retorno. Detalhes na Figura 4.12.

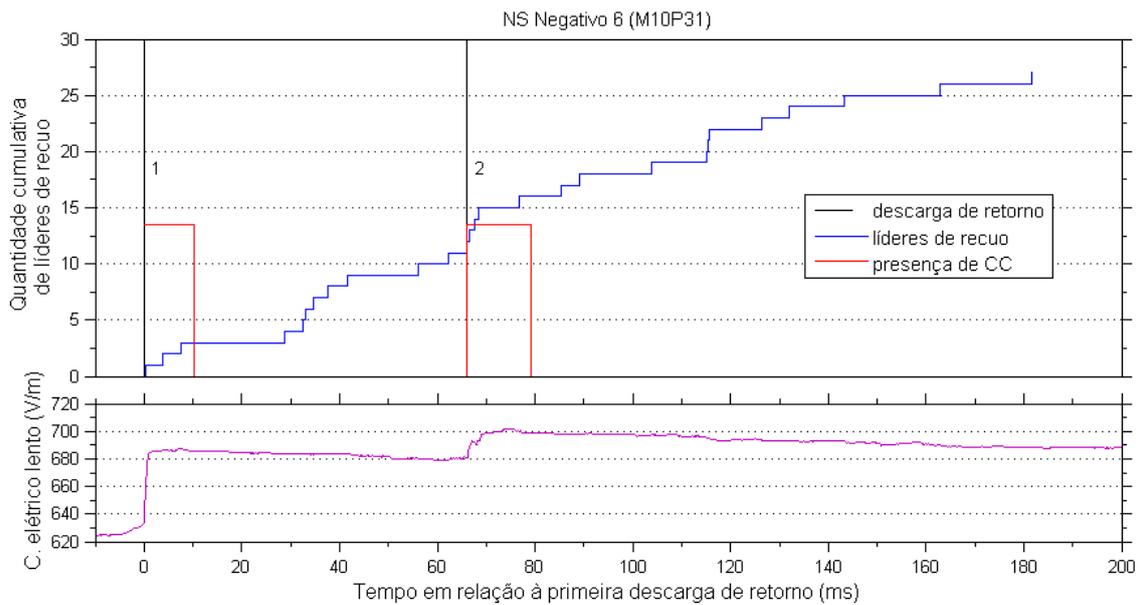


Figura 4.17 – Relâmpago nuvem-solo negativo 6 (M10P31) com duas descargas de retorno. Detalhes na Figura 4.12.

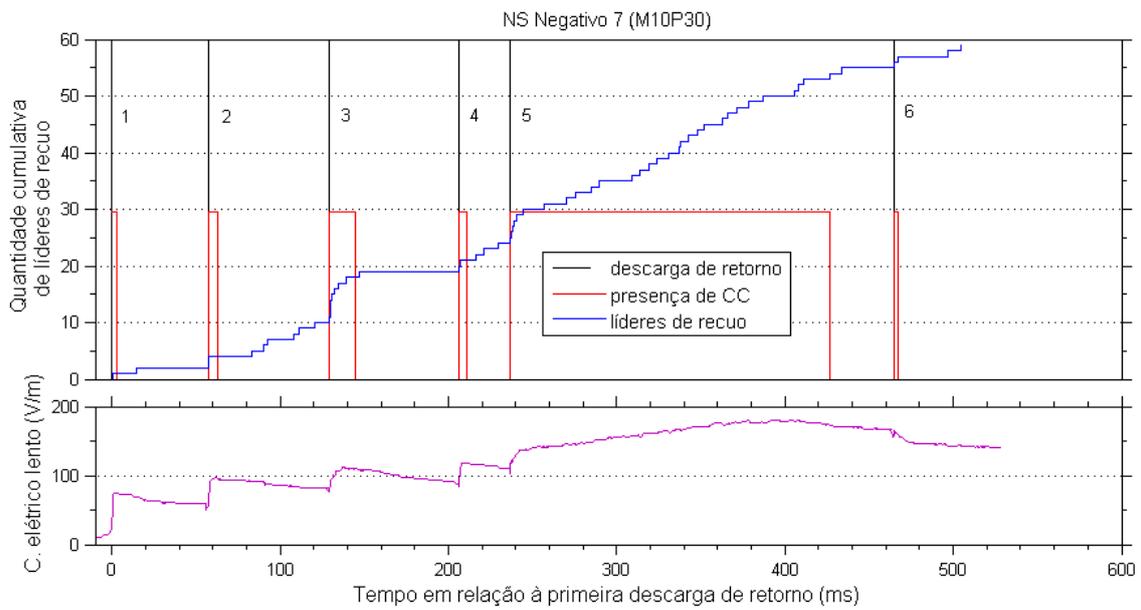


Figura 4.18 – Relâmpago nuvem-solo negativo 7 (M10P30) com seis descargas de retorno e corrente contínua longa após a quinta. Detalhes na Figura 4.12.

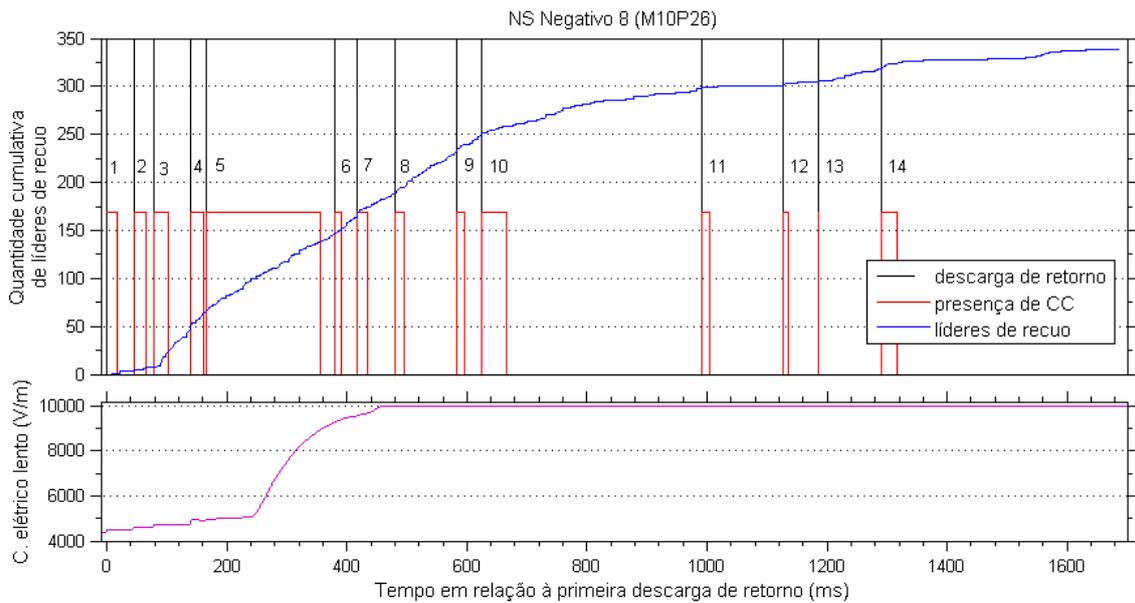


Figura 4.19 – Relâmpago nuvem-solo negativo 8 (M10P26) com 14 descargas de retorno e corrente contínua longa após a quinta. Detalhes na Figura 4.12.

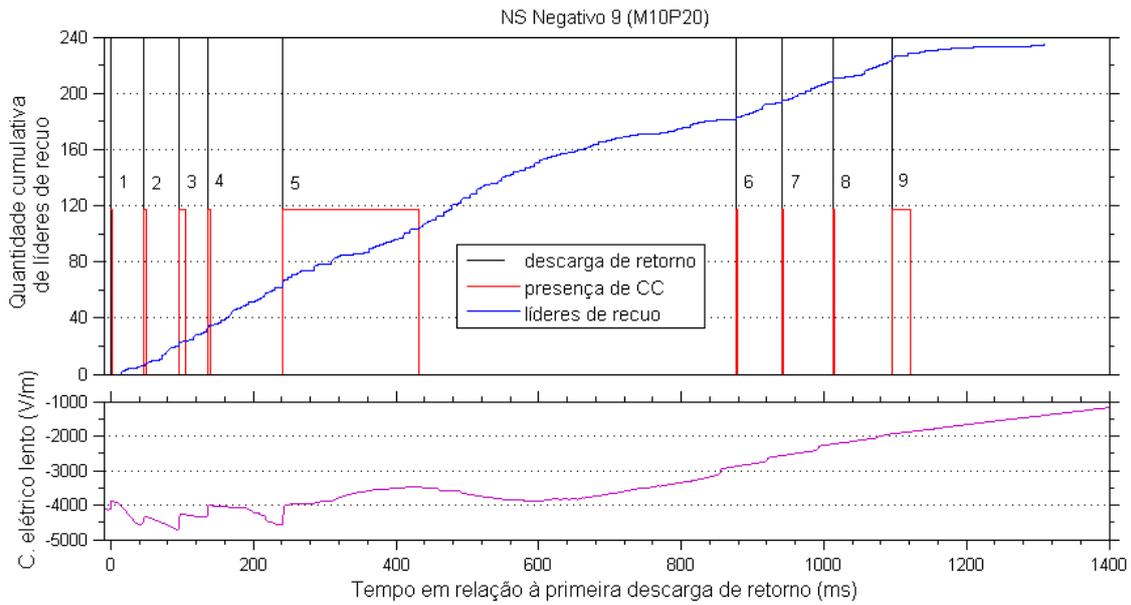


Figura 4.20 – Relâmpago nuvem-solo negativo 9 (M10P20) com nove descargas de retorno e corrente contínua longa após a quinta. Detalhes na Figura 4.12.

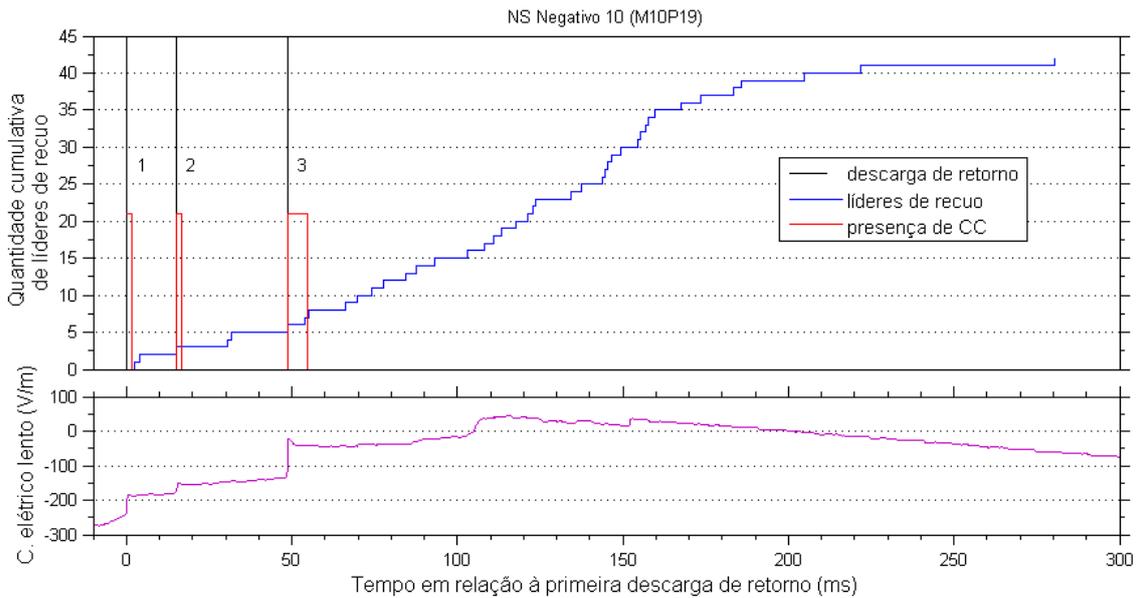


Figura 4.21 – Relâmpago nuvem-solo negativo 10 (M10P19) com três descargas de retorno. Detalhes na Figura 4.12.

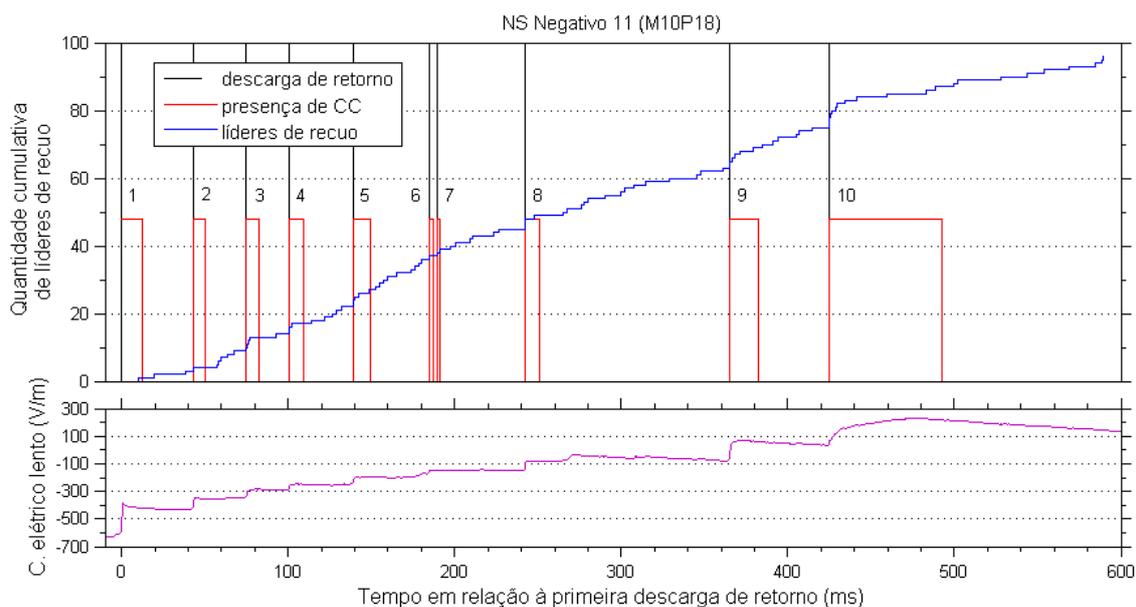


Figura 4.22 – Relâmpago nuvem-solo negativo 11 (M10P18) com 10 descargas de retorno e corrente contínua longa após a décima. Detalhes na Figura 4.12.

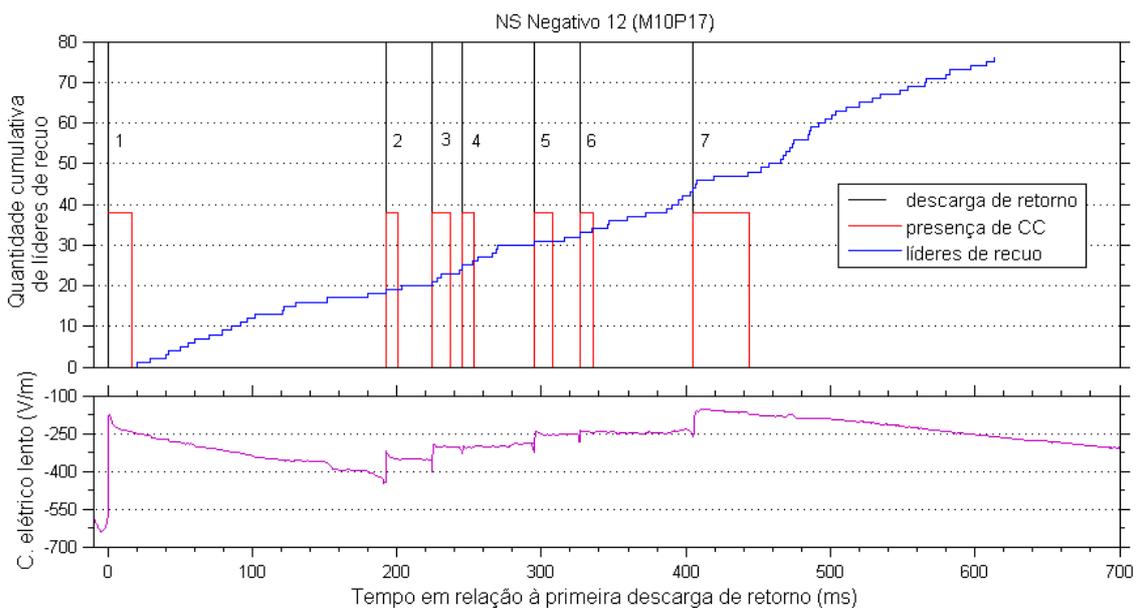


Figura 4.23 – Relâmpago nuvem-solo negativo 12 (M10P17) com sete descargas de retorno. Detalhes na Figura 4.12.

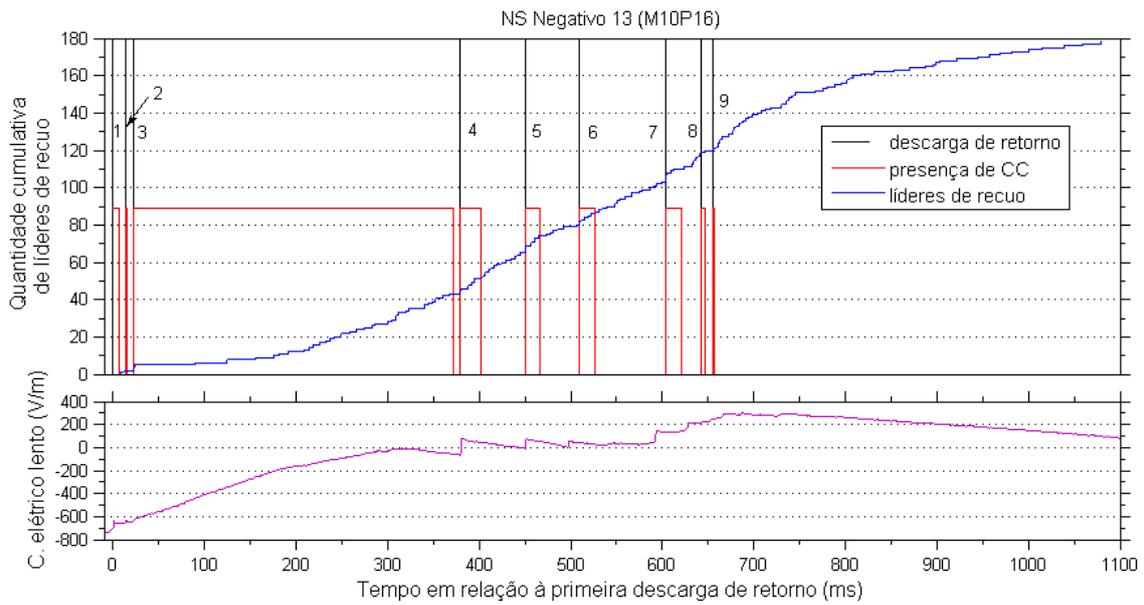


Figura 4.24 – Relâmpago nuvem-solo negativo 13 (M10P16) com nove descargas de retorno e corrente contínua longa após a terceira. Detalhes na Figura 4.12.

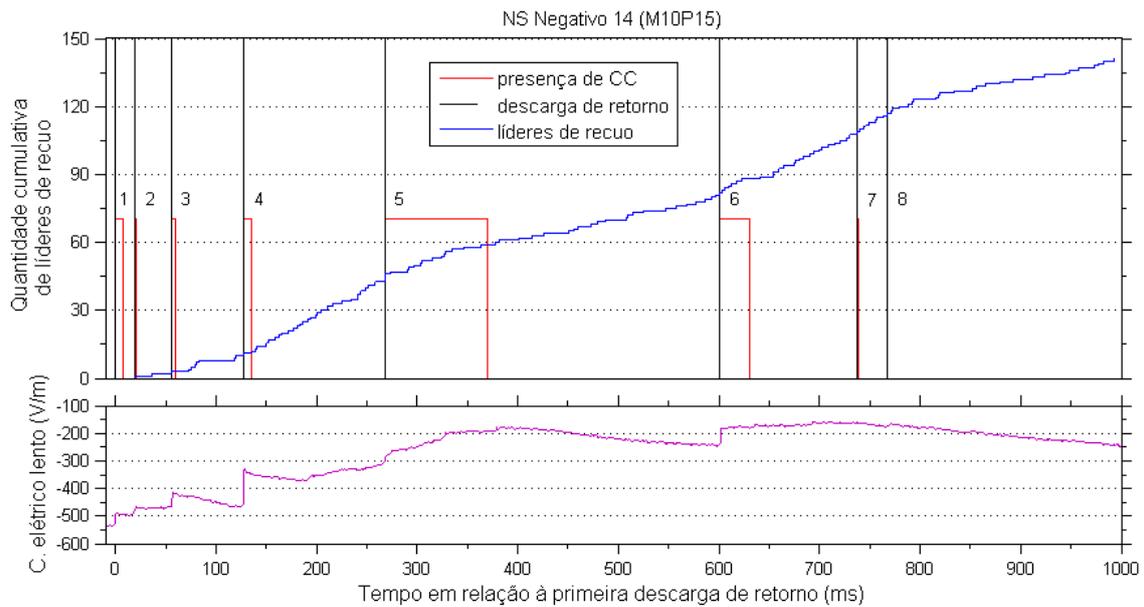


Figura 4.25 – Relâmpago nuvem-solo negativo 14 (M10P15) com oito descargas de retorno e corrente contínua longa após a quinta. Detalhes na Figura 4.12.

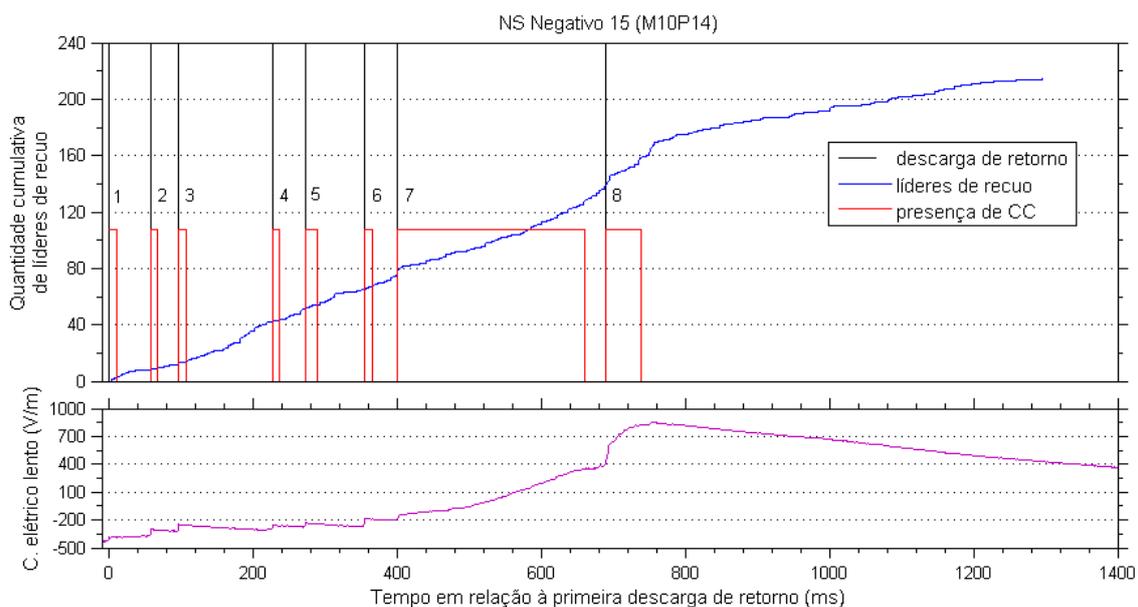


Figura 4.26 – Relâmpago nuvem-solo negativo 15 (M10P14) com oito descargas de retorno e corrente contínua longa após a sétima. Detalhes na Figura 4.12.

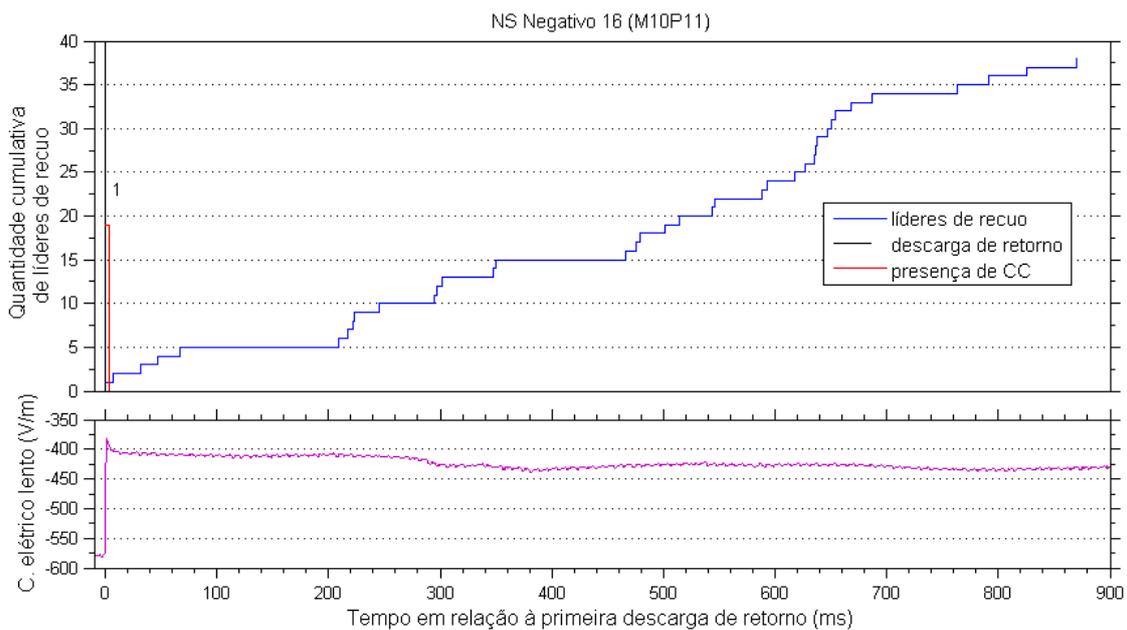


Figura 4.27 – Relâmpago nuvem-solo negativo 16 (M10P11) com uma descarga de retorno. Detalhes na Figura 4.12.

#### 4.4. Estatísticas de ocorrência

A Tabela 4.2 mostra a estatística geral dos líderes de recuo observados nos 16 relâmpagos analisados. A duração total do relâmpago (D) foi medida como sendo o

tempo desde a primeira descarga de retorno até o último líder de recuo. A razão R/D, assim, refere-se à taxa média de líderes de recuo para cada relâmpago.

Tabela 4.2 – Estatística geral do grupo de relâmpagos nuvem-solo negativos analisados em termos de líderes de recuo.

n.	Identificação do relâmpago	Razão sinal/ruído (S/R)	Multiplicidade (M)	Total de líderes de recuo (R)	Total de variações K (K)	Duração total do relâmpago (D, ms)	R/M	K/M	$\frac{R/M}{S/R}$	$\frac{R}{D}$ ((ms) <sup>-1</sup> )
1	M12P95	57,9	4	90	57	871,6	22,5	14,3	0,39	0,103
2	M12P91	82,6	3	103	56	566,2	34,3	18,7	0,42	0,182
3	M12P90	99,0	8	77	57	443,8	9,6	7,1	0,10	0,173
4	M12P35	169,6	1	256	49	870,7	256,0	49,0	1,51	0,294
5	M10P32	60,6	4	36	27	331,9	9,0	6,8	0,15	0,108
6	M10P31	46,5	2	27	19	181,6	13,5	9,5	0,29	0,149
7	M10P30	64,5	6	59	15	504,6	9,8	2,5	0,15	0,117
8	M10P26	40,4	14	339	185	1.684,7	24,2	13,2	0,60	0,201
9	M10P20	113,8	9	235	171	1.308,5	26,1	19,0	0,23	0,180
10	M10P19	61,6	3	42	39	280,3	14,0	13,0	0,23	0,150
11	M10P18	47,9	10	96	57	589,0	9,6	5,7	0,20	0,163
12	M10P17	109,5	7	76	62	613,3	10,9	8,9	0,10	0,124
13	M10P16	38,9	9	178	103	1.078,5	19,8	11,4	0,51	0,165
14	M10P15	22,1	8	141	112	993,1	17,6	14,0	0,80	0,142
15	M10P14	26,4	8	215	131	1.296,1	26,9	16,4	1,02	0,166
16	M10P11	69,9	1	38	37	870,3	38,0	37,0	0,54	0,044
	<b>Mínimo</b>	22,1	1	27	15	181,6	9,0	2,5	0,10	0,044
	<b>Média</b>	69,4	6,1	125,5	73,6	780,3	33,9	15,4	0,45	0,154
	<b>Mediana</b>	61,1	6,5	93	57,0	741,8	18,7	13,1	0,34	0,156
	<b>Máximo</b>	169,6	14	339	185	1.684,7	256,0	49,0	1,51	0,294
	<b>Soma</b>	-	97	2.008	1.177	-	-	-	-	-

#### 4.4.1. Taxas médias de líderes de recuo durante os três regimes

Na presente análise foram categorizados três regimes ou períodos ao longo do tempo de vida do relâmpago nuvem-solo negativo que estão relacionados a três de seus diferentes

processos: (i) aquele imediatamente após o pico da descarga de retorno, (ii) durante um tempo considerável de corrente contínua e (iii) na ausência da mesma. A hipótese relacionada é de que cada regime pode influenciar a ocorrência dos líderes de recuo de modos distintos.

A delimitação da categoria (i) foi escolhida como a duração máxima estimada de uma descarga de retorno em 3 ms (RAKOV; UMAN, 2003). Mesmo que sua duração típica seja  $\sim 100 \mu\text{s}$ , parece razoável supor que seus efeitos imediatos no canal/tronco principal em termos de corrente e condutividade perdurem nos próximos milissegundos. Quanto à delimitação da categoria (ii), foram escolhidas somente períodos de corrente contínua com duração maior do que 10 ms (curtas e longas), que possuem duração mínima para envolver uma carga mínima de tipicamente 1 C e considerável para interagir com diversos possíveis líderes de recuo.

A Figura 4.28 ilustra os valores da taxa média de líderes de recuo identificados em cada um dos três tipos de períodos de um relâmpago nuvem-solo negativo com quatro descargas de retorno. Os valores entre parênteses referem-se à taxa média de líderes de recuo durante a corrente contínua incluindo o período de 3 ms pós descarga de retorno.

Dentre os 2.008 líderes de recuo observados, 1.258 (63%) ocorreram durante intervalos sem corrente contínua (variações K), e 750 (37%) ocorreram durante a corrente contínua ou a cauda da descarga de retorno.

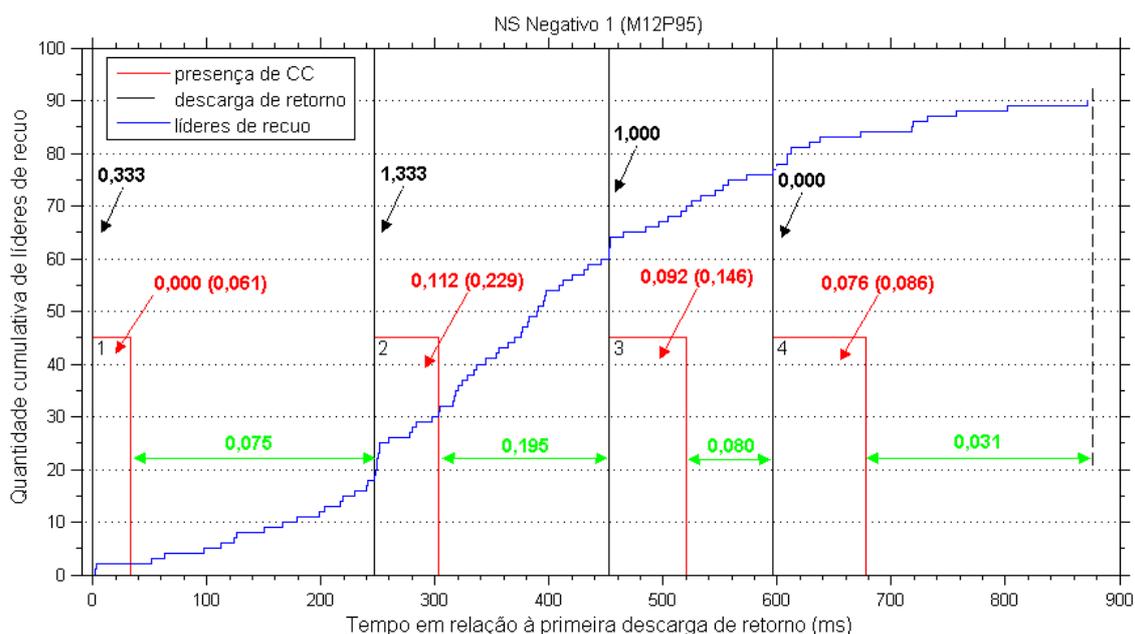


Figura 4.28 – Exemplo de caso (M12P95) mostrando a quantidade acumulada de líderes de recuo com as taxas médias de líderes de recuo ( $(\text{ms})^{-1}$ ) indicadas para os três períodos: 3 ms pós descarga de retorno (preto), com (vermelho) e sem corrente contínua (verde).

A Tabela 4.3 mostra a estatística básica das taxas médias para os intervalos de tempo referentes aos três processos categorizados.

Tabela 4.3 – Estatística básica das taxas médias de líderes de recuo (em  $(\text{ms})^{-1}$ ) durante os três processos ou estados do canal conectado ao solo: imediatamente após a descarga de retorno (DR), durante qualquer corrente contínua (CC) mais longa que 10 ms desconsiderando os primeiros 3 ms, e na ausência de CC.

Processo	Nos próximos 3 ms após o pico da descarga de retorno			Durante CC > 10 ms e sem os primeiros 3 ms			Na ausência de CC		
	Todas	1 <sup>a</sup>	Subsequentes	Todas	1 <sup>a</sup>	Subsequentes	Todas	1 <sup>a</sup>	Subsequentes
<b>N. de eventos</b>	97	16	81	50	8	42	97	16	81
<b>Mínimo</b>	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
<b>Média</b>	0,361	0,167	0,399	0,155	0,098	0,169	0,150	0,115	0,157
<b>Mediana</b>	0,333	0,000	0,333	0,133	0,091	0,140	0,120	0,104	0,129
<b>Máximo</b>	1,667	0,667	1,667	0,701	0,348	0,701	0,706	0,425	0,706

As Figuras 4.29 a 4.31 contêm os histogramas das taxas médias de líderes de recuo para cada um dos três regimes em três distribuições: todos os eventos (vermelho), somente

aqueles ocorridos logo após (até 3 ms) após a primeira descarga de retorno (amarelo) e aqueles após as descargas de retorno subsequentes (azul).

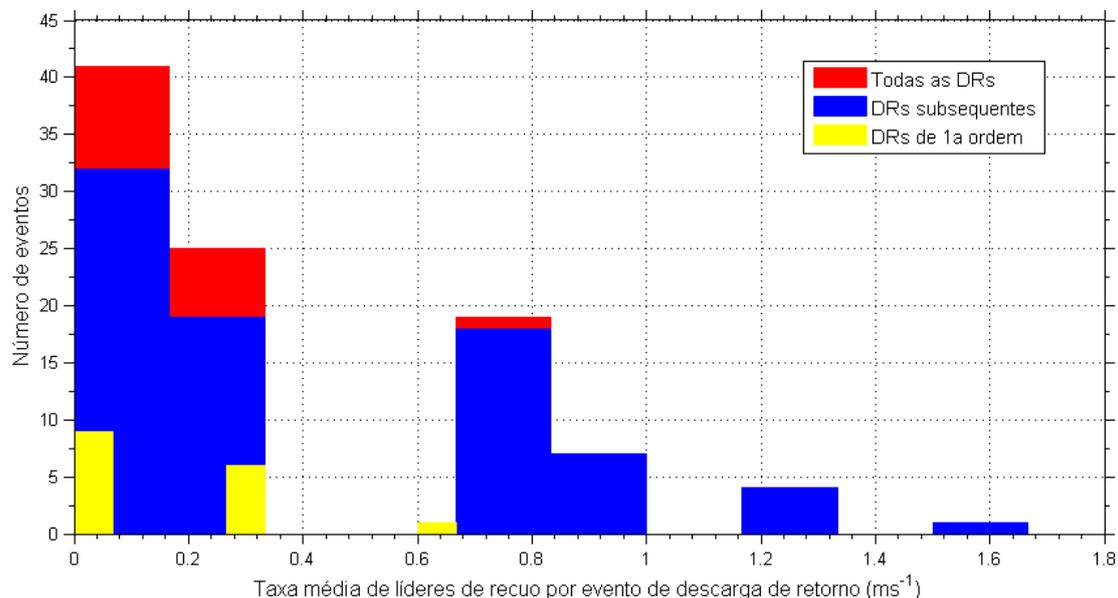


Figura 4.29 – Histogramas das taxas médias de líderes de recuo durante os 3 ms pós descarga de retorno (DR) para todas as ordens, somente subsequentes e somente primeiras.

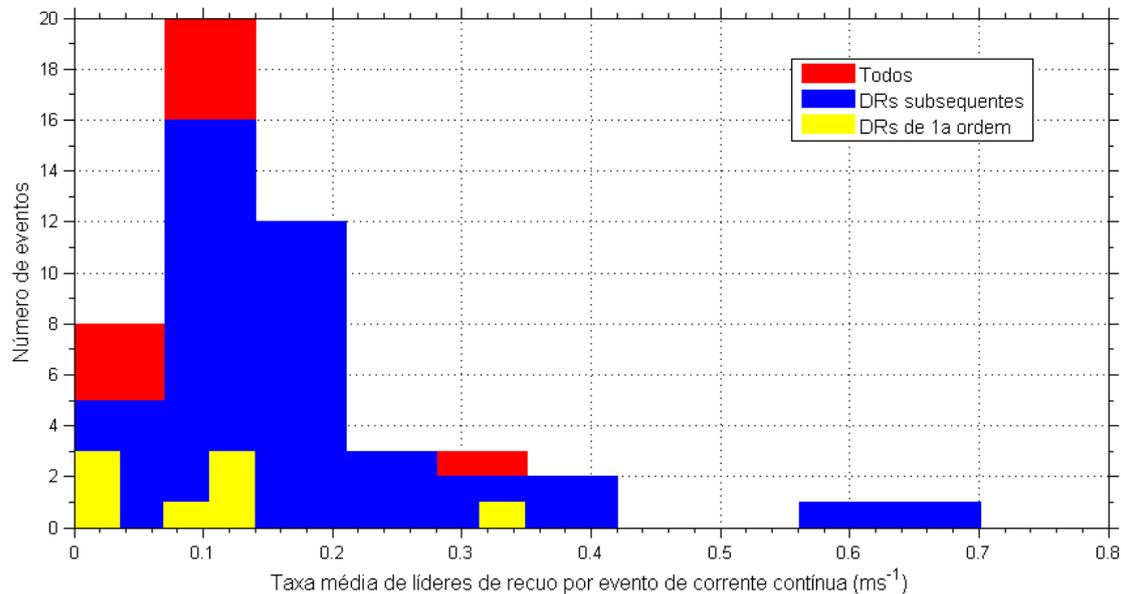


Figura 4.30 – Histogramas das taxas médias de líderes de recuo durante eventos de corrente contínua mais longa que 10 ms excluindo-se os primeiros 3 ms, para todas as ordens, somente subsequentes e somente primeiras.

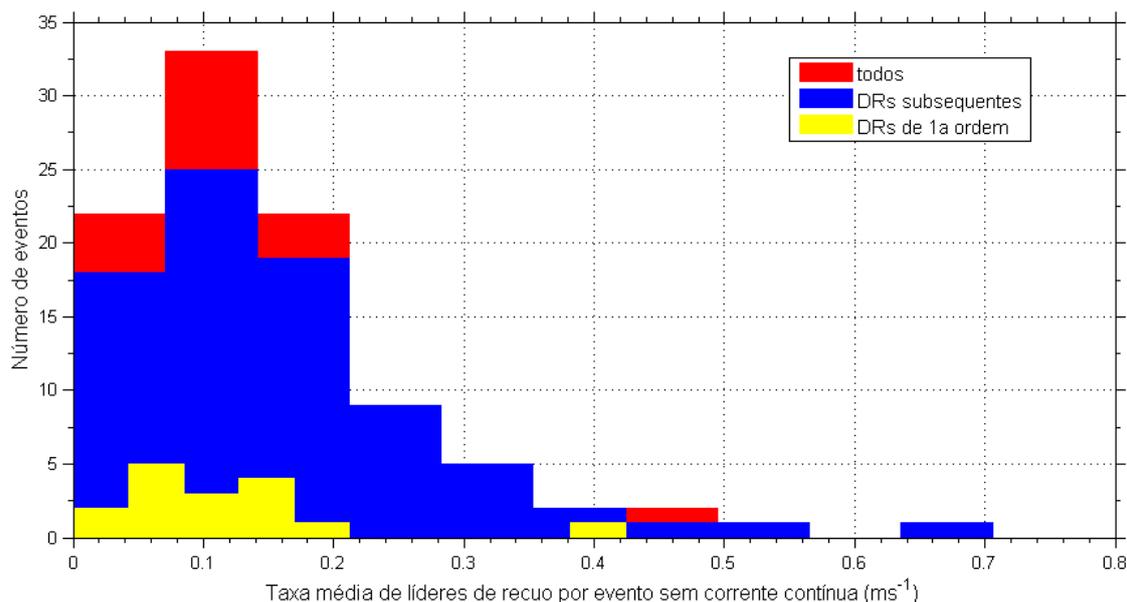


Figura 4.31 – Histogramas das taxas médias de líderes de recuo nos intervalos sem corrente contínua para todas as ordens, somente subsequentes e somente primeiras.

#### 4.4.1.1. Comparação das taxas médias de líderes de recuo entre os três regimes

As comparações das distribuições das taxas médias para cada estado do canal conectado ao solo (logo após a DR, durante a CC e na ausência de CC) foram realizadas em duas etapas, de acordo com diferentes critérios de agrupamento:

1. Considerando os eventos envolvendo todas as ordens de DR;
2. Considerando os eventos envolvendo somente as DRs de ordens subsequentes.

O teste comparativo utilizado nesta análise foi o Kruskal-Wallis<sup>22</sup> (no nível de probabilidade padrão de 5%,  $p < 0,05$ ), que é o equivalente da ANOVA de uma via para distribuições independentes não paramétricas. A hipótese nula testada é a de que as distribuições provêm de uma mesma população (ou, equivalentemente, de diferentes populações com uma mesma distribuição). O resultado  $p$  indica entre 0 e 1 a probabilidade de a hipótese nula ser verdadeira. Foi usada a função pronta correspondente no ambiente MATLAB<sup>®</sup>.

<sup>22</sup> Corder, G. W.; Foreman, D. I. Nonparametric Statistics for Non-Statisticians: A Step-by-Step Approach. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

Na etapa 1, consideraram-se as taxas envolvendo todas as ordens de descargas de retorno (desde a primeira até a última). As Figuras 4.32 e 4.33 mostram respectivamente os histogramas de cada grupo e o resultado do teste Kruskal-Wallis para os três grupos.

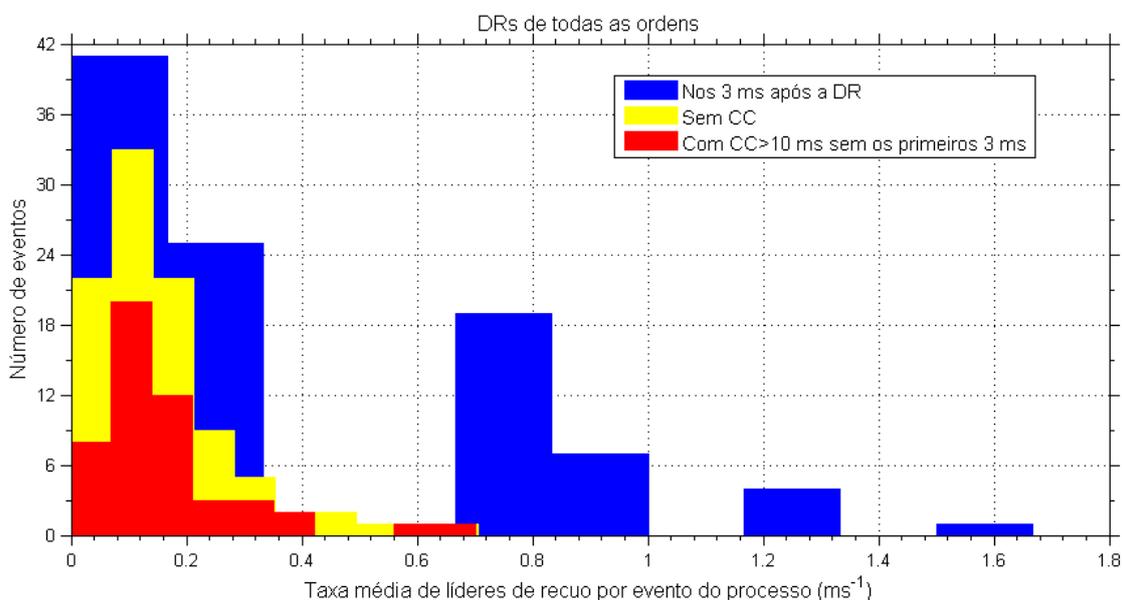


Figura 4.32 – Histogramas das taxas médias de líderes de recuo para os três períodos: 3 ms após a descarga de retorno (DR), na ausência de corrente contínua (“sem CC”, equivalente à taxa de Ks), e durante a ocorrência de corrente contínua mais longa que 10 ms excluindo o período inicial de 3 ms.

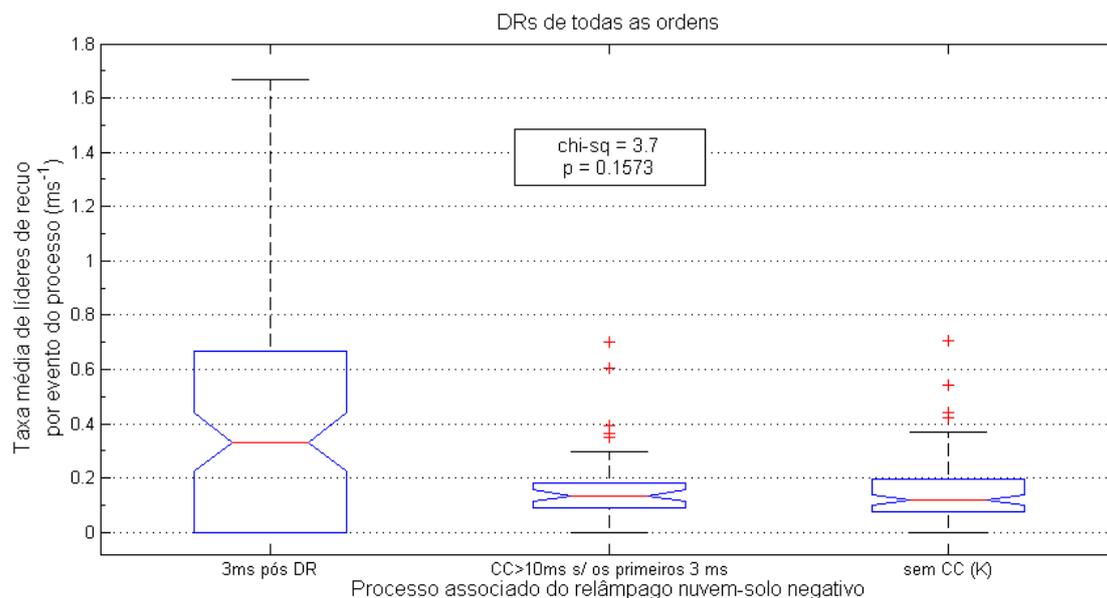


Figura 4.33 – Resultado do teste Kruskal-Wallis para as taxas médias de líderes de recuo incluindo eventos de todas as ordens de descarga de retorno (DR), para os três períodos: 3 ms após a descarga de retorno (DR), na ausência de corrente

contínua (“sem CC”, equivalente à taxa de Ks), e durante a ocorrência de corrente contínua mais longa que 10 ms excluindo o período inicial de 3 ms.

O mesmo teste foi feito também para os três grupos aos pares (Figuras 4.34 a 4.36).

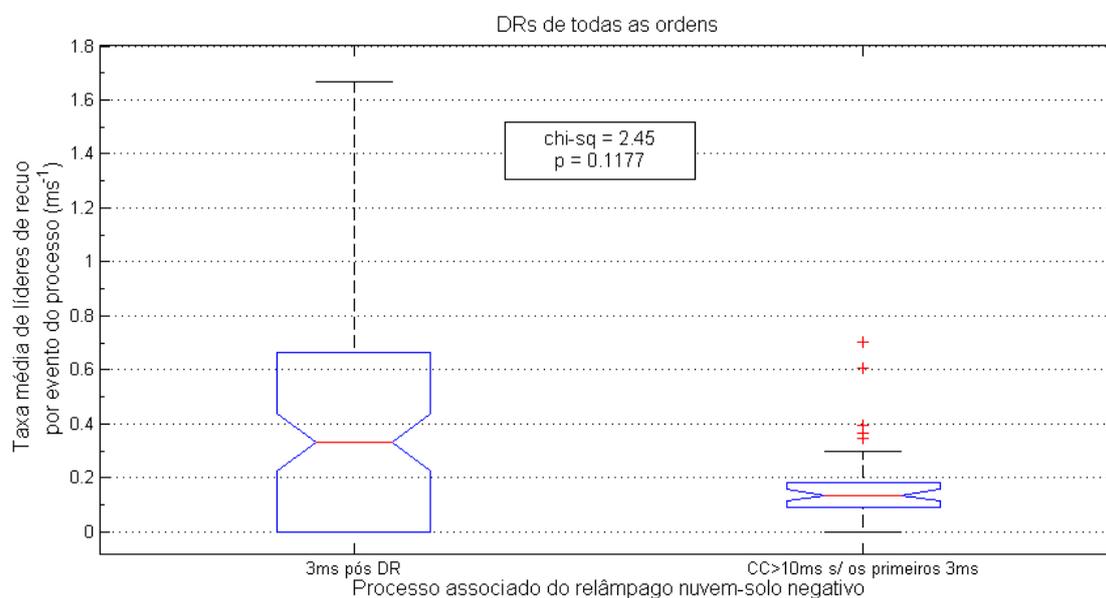


Figura 4.34 - Resultado do teste Kruskal-Wallis para as taxas médias de líderes de recuo durante os períodos de 3 ms após a descarga de retorno (DR) e os períodos de corrente contínua (CC) mais longas que 10 ms excluindo-se os primeiros 3 ms, para eventos de todas as ordens de descarga de retorno.

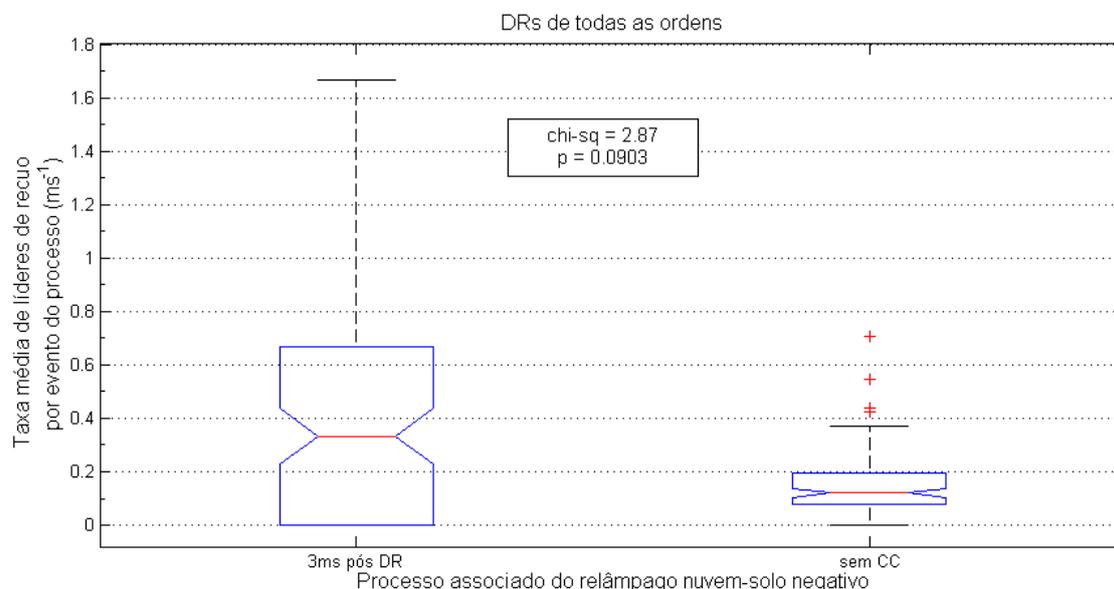


Figura 4.35 - Resultado do teste Kruskal-Wallis para as taxas médias de líderes de recuo durante os períodos de 3 ms após a descarga de retorno (DR) e os períodos sem corrente contínua (CC), para eventos de todas as ordens de descarga de retorno.

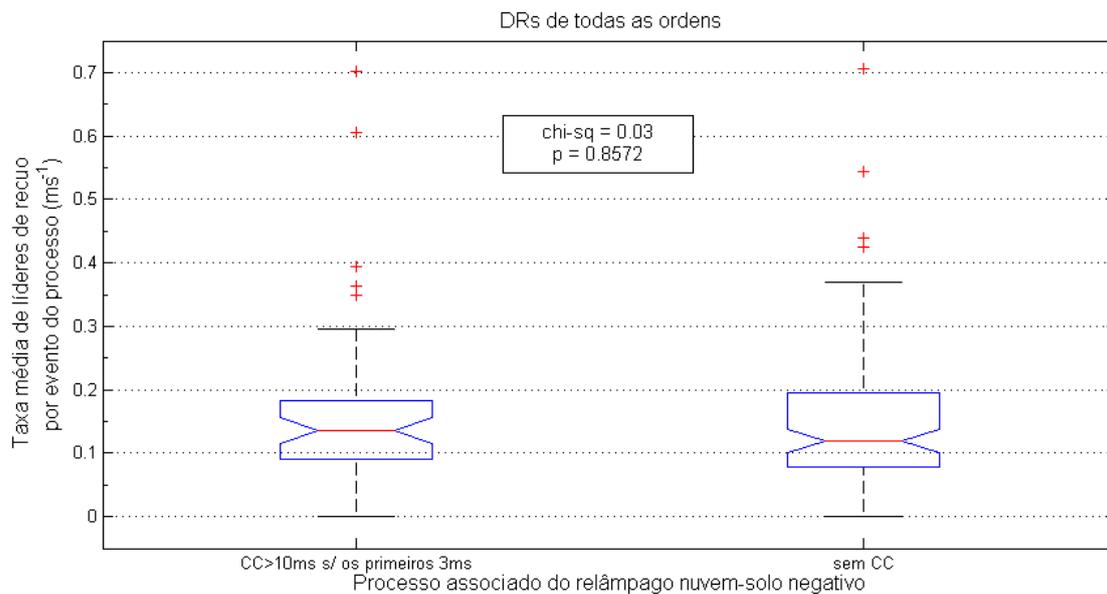


Figura 4.36 - Resultado do teste Kruskal-Wallis para as taxas médias de líderes de recuo durante os períodos de corrente contínua (CC) mais longas que 10 ms excluindo-se os primeiros 3 ms e os períodos sem CC, para eventos de todas as ordens de descarga de retorno.

Pode-se notar que, considerando os líderes de recuo envolvendo todas as ordens de descargas de retorno, nenhum teste comparativo resultou em uma probabilidade menor do que 5% ( $p < 0.05$ ) das distribuições serem iguais, não sendo possível distingui-las entre si com o teste utilizado.

Na etapa 2, foi realizado o mesmo procedimento da etapa 1 exceto a consideração de somente líderes de recuo envolvendo ordens subsequentes de descarga de retorno. Os histogramas de cada distribuição são mostrados na Figura 4.37. Os resultados dos testes comparativos das distribuições são mostrados na sequência Figura 4.38 a Figura 4.41.

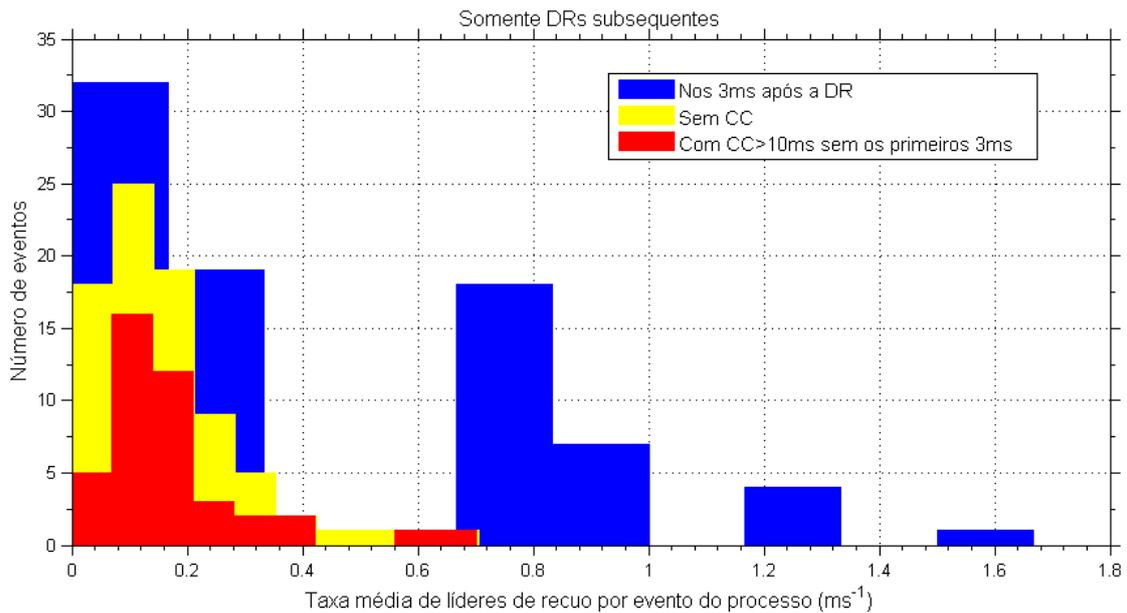


Figura 4.37 – Histogramas das taxas médias de líderes de recuo para os três períodos: 3 ms após a descarga de retorno (DR), na ausência de corrente contínua (“sem CC”, equivalente à taxa de Ks), e durante a ocorrência de corrente contínua mais longa que 10 ms excluindo o período inicial de 3 ms.

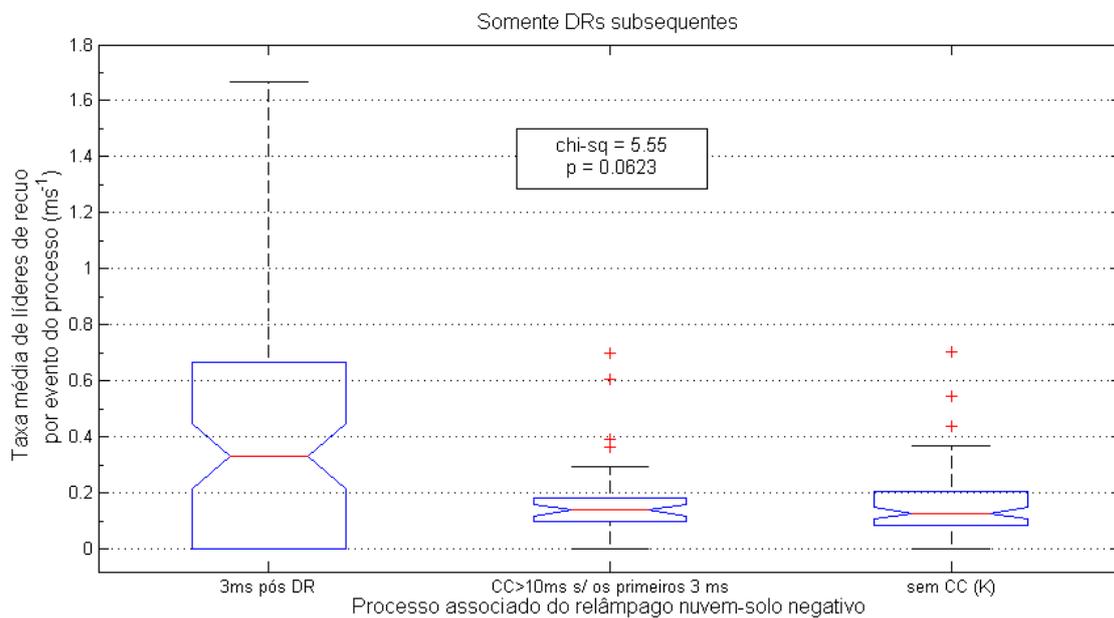


Figura 4.38 – Resultado do teste Kruskal-Wallis para as taxas médias de líderes de recuo incluindo eventos somente de descargas de retorno (DR) subsequentes, para os três períodos: 3 ms após a descarga de retorno (DR), na ausência de corrente contínua (“sem CC”, equivalente à taxa de Ks), e durante a ocorrência de corrente contínua mais longa que 10 ms excluindo o período inicial de 3 ms.

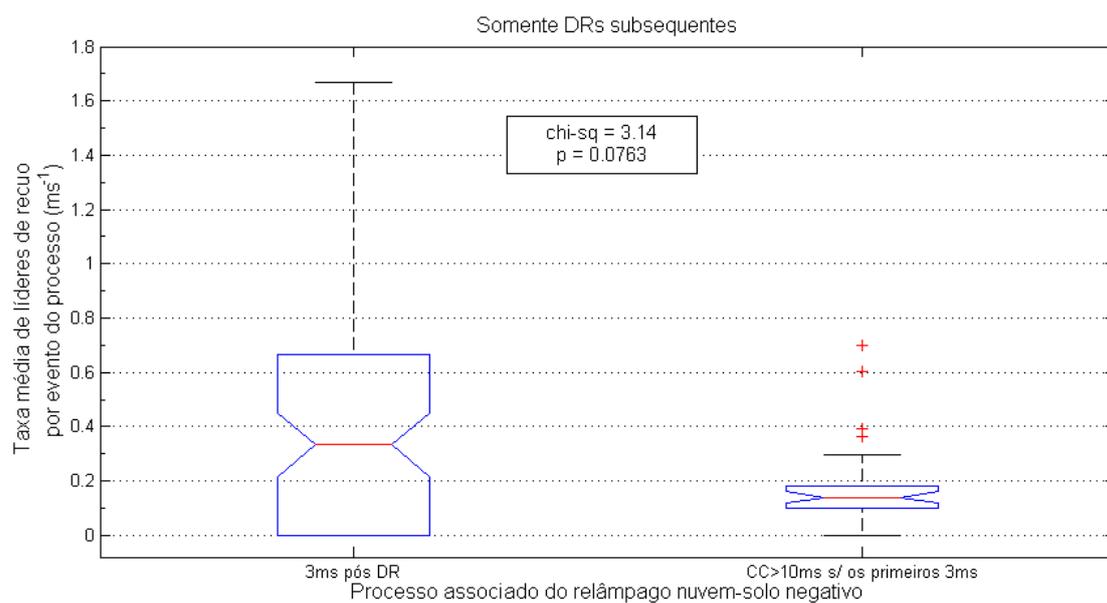


Figura 4.39 – Resultado do teste Kruskal-Wallis para as taxas médias de líderes de recuo durante os períodos de 3 ms após a descarga de retorno (DR) e os períodos de corrente contínua (CC) mais longas que 10 ms excluindo-se os primeiros 3 ms, somente para eventos de descarga de retorno subsequente.

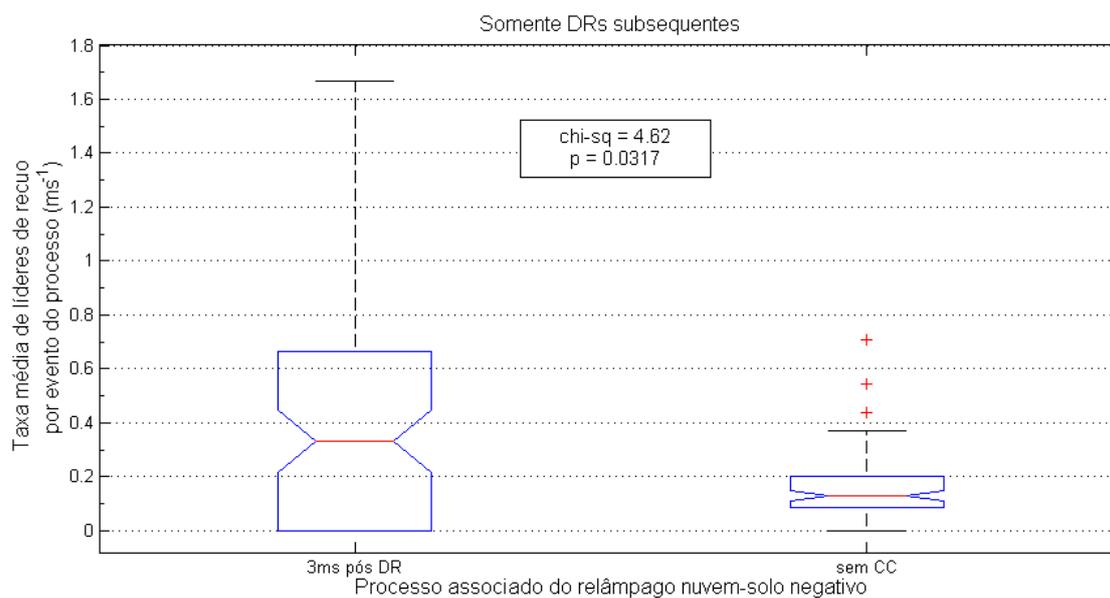


Figura 4.40 – Resultado do teste Kruskal-Wallis para as taxas médias de líderes de recuo durante os períodos de 3 ms após a descarga de retorno (DR) e os períodos sem corrente contínua (CC), somente para eventos de descarga de retorno subsequente.

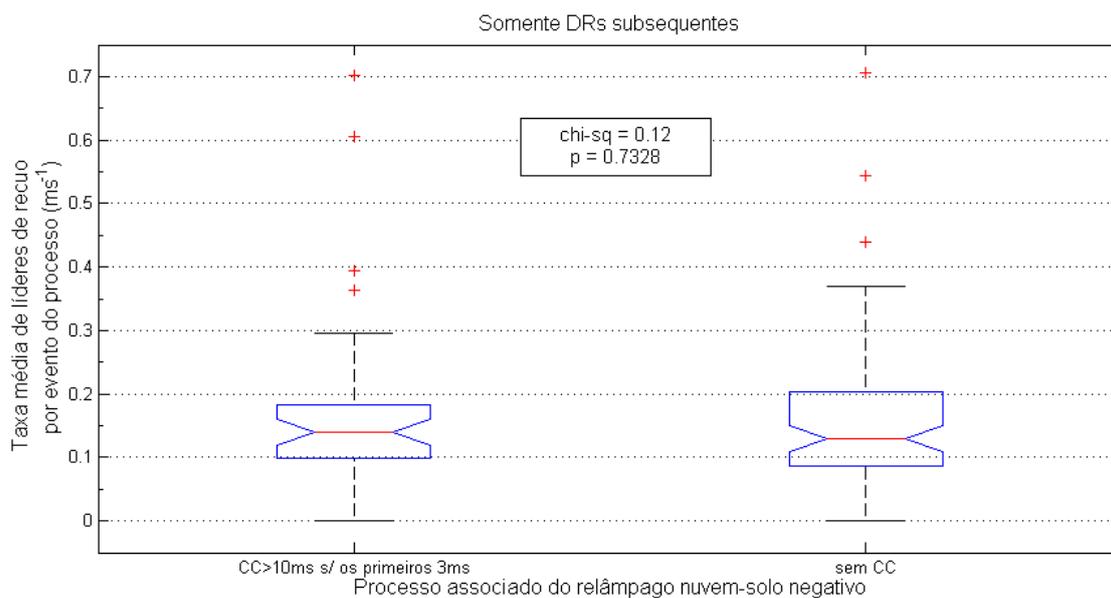


Figura 4.41 – Resultado do teste Kruskal-Wallis para as taxas médias de líderes de recuo durante os períodos de corrente contínua (CC) mais longas que 10 ms excluindo-se os primeiros 3 ms e os períodos sem CC, somente para eventos de descarga de retorno subsequente.

A diferença entre os grupos “3 ms pós DR” e “sem CC” (0,0317 ou 3,17%) foi a única significativa (< 0,05) dentre os pares testados.



## 5 DISCUSSÃO

São discutidas nesta seção as análises dos capítulos 3 e 4 em termos de: caracterização do líder de recuo (LR), seu desempenho na estrutura do líder positivo, sua interação com outros processos e condições que propiciam o disparo do mesmo.

### 5.1. Características do líder de recuo

O líder de recuo apresentou em todos os registros de vídeo analisados um regime de natureza transitória e intermitente comparada ao relâmpago como um todo, apresentando elevada velocidade de propagação (superior a do líder positivo e às vezes não muito inferior à da descarga de retorno). Tais características concordam com as observações de Shao et al. (1995), Saba et al. (2008, 2012, 2013), Mazur e Ruhnke (2011, 2013), Warner et al. (2012a, 2012b) e Mazur et al. (2013).

Seu sentido de propagação é marcadamente retrógrado. Por causa de sua elevada velocidade de propagação e seu sentido predominantemente apontado para o entroncamento do líder positivo, deduz-se que retraçam ramos decaídos. Porém, frequentemente foi observada sua propagação bidirecional, sendo que a parte progressiva foi, em geral, pouco expressiva. Embora a parte retrógrada já houvesse sido observada em vídeo em vários trabalhos, *e.g.*, Ogawa e Brook (1964), Saba et al. (2008) e Warner et al. (2012) e por mapeamento de fontes de radiação, *e.g.*, Shao et al. (1995), o desenvolvimento bidirecional foi somente observado mais recentemente em vídeo (WARNER et al., 2012a; MAZUR; RUHNKE, 2013). De fato, a observação da parte progressiva do líder de recuo é frequentemente dificultada devido às limitações de visualização (taxa limitada da câmera ou líderes encobertos na nuvem).

O local de iniciação observado do líder de recuo possui três características: (i) ausência de luminosidade nos registros, sugerindo ausência de corrente no segmento do ramo, conforme observado por outros autores (MAZUR, 2002; SABA et al., 2008; MAZUR; RUHNKE, 2011; KREHBIEL; WANG, 2011; WARNER, 2012; WARNER et al., 2012a, 2012b; MAZUR et al., 2013), embora segmentos próximos do mesmo ramo apresentaram eventualmente um nível mínimo de luminosidade; (ii) atrás da ponta do

ramo, observado claramente nos registros mostrados (Figuras 3.4, 3.8, 3.10, 3.11) e também deduzido a partir da elevada velocidade progressiva do líder de recuo nos casos de expressivo desenvolvimento bidirecional; e (iii) estava na região aparentemente mais exterior da estrutura do líder positivo, ou seja, nos ramos mais externos.

A assinatura de campo elétrico apresentou-se bastante variável, sendo o elemento mais comum uma variação transitória, suave, unipolar e com decaimento exponencial, podendo ser de qualquer polaridade, com duração de centenas de microssegundos a poucas unidades de milissegundos. Essa variação transitória apareceu sozinha ou agrupada com outras. Esta faixa de valores de duração concorda com a média geométrica de 0,7 ms encontrada tanto por Thottappillil et al. (1990) quanto por Zhu et al. (2014).

A grande variabilidade presente na assinatura da variação K relatada por Thottappillil et al. (1990), Rakov et al. (1992) e Zhu et al. (2014) concordam com as presentes observações, considerando que as variações K seriam líderes de recuo de maior magnitude. Trem de pulsos (ou pulsos isolados) de altas frequências acompanhando a variação foi observado frequentemente, que também foi relatado por outros autores, *e.g.*, Brook e Kitagawa (1964), Proctor et al. (1988) e Zhu et al. (2014).

## **5.2. O líder de recuo na árvore do relâmpago**

Nos vídeos analisados neste trabalho, foram identificados três modos básicos de propagação do líder positivo: (i) contínuo (intenso e estável), (ii) transitório (instável e evanescente), e (iii) intermitente. Um mesmo líder positivo pode experimentar mudanças em seu modo de propagação ao longo do seu tempo de vida, *e.g.*, (i) para (ii), (i) para (ii) para (iii), (ii) para (i), dentre outras combinações.

Como parte constituinte do líder positivo, o líder de recuo mostrou-se ser um processo importante que reativa a propagação no modo (iii) ou em eventos separados no modo (ii). Quanto à propagação do ramo que sofre ocorrências de LRs, esse normalmente progride entre cada ocorrência (impulsionado inicialmente por aqueles), visto que cada reiluminação proveniente do líder de recuo mostra-se a partir de locais distintos e

progressivos. A progressão dos ramos positivos que sofrem a ocorrência de líderes de recuo mostrou-se mais lenta e menos luminosa (modo *iii*) quando comparada à progressão dos ramos de intensa luminosidade (modo *i*).

Tais observações concordam com outras realizadas: Mazur (2002, p. 1403) e Mazur e Ruhnke (2011, p. 99) afirmam que o líder de recuo aconteceria nos ramos decaídos e sem corrente, apesar de não haver medições de corrente *in situ* nos ramos; Van der Velde e Montanyà (2013) observaram através de LMA e câmera de alta velocidade a ocorrência em ramos menos luminosos e velozes do líder positivo. Vale notar que na fase menos veloz de um líder há conseqüentemente um maior número de ramos que pouco ou nada progridem.

Foi observada uma forte tendência, especialmente nos vídeos rápidos, de que a localização de uma sequência de líderes de recuo na estrutura do líder positivo seja em suas extremidades conforme vai se desenvolvendo; ou seja, formando um (*i*) “perímetro expansivo” do líder positivo. Mazur (1989) e Williams e Heckman (2012) comentam sobre este comportamento. Tal característica apoia a ideia de que o líder de recuo se origina de modo geral nas extremidades da estrutura do líder, acompanhando o seu desenvolvimento e a propagação de seus ramos desde as pontas. Essa tendência geral de ocorrer em ramos externos da árvore sugere uma preferência de que o líder de recuo ocorra próximo da interface entre os canais em decaimento e o ar virgem externo à estrutura do líder positivo. Outra tendência é observada durante períodos mais longos: (*ii*) a consolidação de trajetos preferenciais na estrutura do líder, desde os ramos externos até entroncamentos internos.

Quanto à direção de propagação do líder de recuo, o líder de recuo ocorreu em praticamente qualquer uma (supondo que haja um canal do líder positivo decaído no trajeto), não sugerindo, até onde foi possível observar, qualquer influência externa (*e.g.*, campos estáticos como o elétrico da nuvem ou o geomagnético). Parece mais razoável supor que, localmente em cada ramo, o campo elétrico resultante entre o potencial do canal e o potencial na interface entre ponta do ramo e ambiente seja um parâmetro fundamental para o surgimento do LR.

Desse modo, as observações sugerem que o líder de recuo possui uma função básica de redesevolvimento do líder positivo quando sua propagação se torna dificultada<sup>23</sup>. Tal função básica envolveria dois aspectos:

- a) Reativação da propagação do ramo do líder positivo que teve sua progressão diminuída ou até anulada e que possui ao menos um trecho decaído (sem corrente);
- b) Recondicionamento do trecho da árvore que percorre: mantendo o nível de temperatura e condutividade e evitando que o decaimento seja irreversível.

O líder de recuo mostrou também duas funções específicas de geração de outros processos dentro do relâmpago. São estas:

- a) Descarga de retorno subsequente: quando atinge o solo na forma de líder contínuo, gera uma descarga de retorno subsequente nos raios múltiplos;
- b) Componente M: o líder de recuo que ocorre durante a corrente contínua e são capazes de propagar até o tronco da árvore produzem uma elevação da luminosidade (corrente) na terminação no solo.

Em ambas as situações, (a) e (b), somente uma minoria dos líderes de recuo foram capazes de desempenhar tais funções, a extensão de suas propagações foi pequena e não foram, em boa parte das vezes, capazes de atingir o primeiro entroncamento de ramos. Parte dos LRs que atingiram o tronco principal são líderes contínuos falhos (*attempted leaders*), que alcançam o tronco sem atingirem o solo.

A sequência do líder de recuo que provoca a descarga de retorno subsequente (líder contínuo) e a componente M, tanto no relâmpago nuvem-solo negativo quanto no ascendente negativo, é semelhante exceto que no último caso a estrutura de ramos do líder positivo (a copa da árvore) se encontra abaixada em relação à base da nuvem. Apesar de se tratar de outro tipo de relâmpago é razoável supor que o fenômeno possua

---

<sup>23</sup> De acordo com T. A. Warner in: "Lightning flash types and components observed with high-speed cameras and correlated electric field sensors". Apresentação na South Dakota School of Mines and Technology, Mar 26<sup>th</sup>, 2013.

essencialmente a mesma natureza, e que em ambos os tipos o líder de recuo se propague dos ramos superiores da “copa” da árvore do relâmpago (mais visível no caso dos ascendentes) em direção ao solo. As observações deste trabalho apoiam essa mesma ideia apresentada por Mazur (2002).

Nos ascendentes negativos observados, após um período inicial do líder positivo, o líder de recuo ocorreu em qualquer momento. Este tempo inicial talvez sirva para dois fatores se tornarem importantes na formação do líder de recuo: (i) decaimento de certos ramos; e (ii) a estrutura do líder tenha comprimento suficiente para experimentar uma diferença de potencial mínima entre o potencial do solo na base e um valor maior próximo à nuvem.

Nos nuvem-solo positivos observados, a grande maioria dos líderes de recuo ocorre nos ramos descendentes (bastante inclinados para baixo) do líder positivo antes da sua conexão no solo (e conseqüente descarga de retorno), ocorrendo apenas eventualmente após a conexão. Em ramos predominantemente horizontais do líder positivo, foram observados líderes de recuo ocorrendo tanto antes como após a descarga de retorno. O potencial do solo transferido para o canal do líder durante a descarga de retorno mudaria o regime de potencial no líder positivo e poderia ser responsável pela mudança observada.

O registro 4387 (Figura 3.2) mostra o relâmpago nuvem-solo positivo que, antes da conexão do líder com o solo, exibe um ramo principal propagando na vertical com vários líderes de recuo e outro na horizontal quase sem nenhum líder de recuo. É razoável supor que ambos possuíssem um entroncamento comum de mesmo potencial, mas suas pontas propagavam em campos elétricos diferentes.

Apesar do limitado número de casos analisados neste trabalho, tanto a queda abrupta da taxa de LRs nos nuvem-solo positivos, quanto a evolução suave da taxa nos ascendentes representam comportamentos gerais ou comuns, conforme observado nos outros vídeos do presente conjunto de dados, bem como por outros registros de Saba (2014). Quanto à quantificação dos líderes de recuo, valores totais máximos de várias centenas foram encontrados durante a vida do líder positivo.

Sobre a taxa média de líderes de recuo ao longo do tempo de vida do líder positivo, foram encontrados valores da ordem de unidades de  $(\text{ms})^{-1}$  para os líderes positivos fora da nuvem (ref. ao nuvem-solo positivo e ao ascendente negativo), e o valor médio de  $0,2 (\text{ms})^{-1}$  para os líderes positivos dentro da nuvem (ref. ao nuvem-solo negativo). O fator de aproximadamente 10 vezes encontrado se deve provavelmente à diferença de metodologia empregada em cada grupo de eventos, visto que a antena de campo elétrico tende a registrar somente eventos com uma magnitude mínima. Outra possibilidade é que seja resultado das características próprias dos diferentes tipos de relâmpagos. Até onde se pôde verificar, não existem estatísticas publicadas sobre a taxa ou frequência de ocorrência dos líderes de recuo para qualquer tipo de relâmpago.

O intervalo de tempo de reincidência de líderes de recuo que se formam em um mesmo ramo parece possuir um valor mínimo, possivelmente da ordem de unidades de milissegundos. Tal intervalo de tempo pode ser resultado dos tempos de decaimento da corrente e da condutividade no local em questão, o que permitiria a transição do estado de condutor para dielétrico (decaído), necessário para a quebra de rigidez a ser feita pelo líder de recuo. Pode ser resultado também, em seguida, de um tempo mínimo para o apropriado rearranjo de cargas e restauração do campo elétrico no canal do ramo decaído, que seria uma condição básica para a ocorrência, em concordância com o mecanismo sugerido por Mazur (1993).

M. Saba e A. Saraiva<sup>24</sup>, utilizando câmeras rápidas idênticas ou similares de outros estudos (todas com milhares de quadros/s) onde foram registrados líderes de recuo, relatam dezenas de casos de líderes positivos de relâmpagos nuvem-solo no Brasil onde não foi observado nenhum LR, mesmo em condições de visibilidade similares (pouca chuva entre o líder e a câmera). A ausência de registro de líderes de recuo poderia se dar por basicamente duas razões: (i) ausência de fato, por não haver condições de ocorrência (ausência de ramos decaídos ou campo elétrico ambiente insuficiente devido à diferente estrutura elétrica da nuvem); (ii) incapacidade de registro (*i.e.*, limitação de

---

<sup>24</sup> M. Saba e A. Saraiva, comunicação privada, São José dos Campos – SP, 2014.

sensibilidade da câmera, atenuação da luminosidade emitida pelo meio como distância, chuva e nuvem).

Quanto à nomenclatura, a expressão “líder de recuo” (*recoil leader*) ou mesmo “líder retrógrado” (*retrograde leader*) não parecem apropriadas, pelo fato de não haver retrocesso algum do líder positivo, bem como a parte progressiva (positiva) não ser contemplada. O termo “líder de redesenvolvimento” (*redevelopment leader*) sugerido por T. Warner parece mais representativo e geral. Um termo menos prático, porém mais preciso, que pode ser usado é “líder de redesenvolvimento por quebra de rigidez” com o intuito de distingui-lo de qualquer outro processo de reativação da propagação do líder sem quebra de rigidez interna dos ramos decaídos.

### **5.3. Interação do líder de recuo com outros processos**

#### **5.3.1. Agrupamento, interatividade e interatividade cíclica entre os líderes de recuo**

Os líderes de recuo observados foram frequentemente registrados de modo agrupado ao invés de estarem distribuídos aleatoriamente no tempo. Este fenômeno de agrupamento foi identificado de três formas diferentes nos instrumentos:

- i) Câmera rápida: ocorrência simultânea de dois ou mais líderes de recuo sobre ramos decaídos e originados de um entroncamento comum, com ou sem luminosidade, nos líderes expostos;
- ii) Campo elétrico: ocorrência de dois ou mais líderes de recuo nos registros, com assinaturas juntas ou sobrepostas;
- iii) Câmera rápida e campo elétrico: pulsos luminosos em regiões distintas e próximas da nuvem acompanhados de assinaturas de campo juntas ou sobrepostas.

Foi observada (caps. 3 e 4) também uma clara interatividade do líder de recuo com outros processos que, algumas vezes, se sustentou resultando em um ciclo de repetições,

chamado aqui de “interatividade cíclica” entre líderes de recuo. Os processos que interagiram com os líderes de recuo são:

- a) Descarga de retorno (independente da ordem);
- b) Componente M;
- c) Progressão e aumento de luminosidade (corrente) no ramo do líder positivo.

O que há em comum entre os três processos mencionados (a-c) é a elevação da corrente no canal ou entroncamento comum ao ramo que sofreu a ocorrência do líder de recuo (Figura 5.1). O único elemento que se manteria ao longo dos ciclos seria o entroncamento comum, podendo variar os ramos que sofrem a ocorrência dos líderes de recuo e os processos envolvidos (a-c). Os ciclos da interatividade se repetiram diversas vezes (até seis) com intervalo de tempo entre dois líderes de recuo seguidos da ordem de unidades de milissegundos. A brevidade da interatividade sugere um estado de equilíbrio instável, que estaria associada a um curto período de corrente especialmente elevada no entroncamento comum.

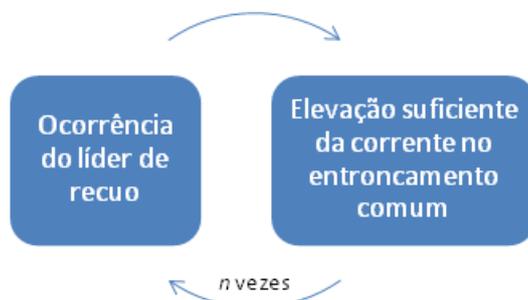


Figura 5.1 – Diagrama dos ciclos de interatividade cíclica entre líderes de recuo e outros processos que promovem a elevação da corrente no entroncamento comum ao ramo que sofreu ou sofrerá a ocorrência do líder de recuo.

### 5.3.2. Taxa de líderes de recuo dos diferentes processos do nuvem-solo negativo

A diferença significativa entre dois pares de regimes (§ 4.4.1.1) se deu somente na comparação do par “3 ms após o pico da descargas de retorno” (mediana =  $0,333 \text{ (ms)}^{-1}$ ) e “sem corrente contínua” (mediana =  $0,129 \text{ (ms)}^{-1}$ ), para descargas de retorno subsequentes ( $p = 0,0317 < 5\%$ ).

Essa comparação exclui os eventos que ocorreram logo entre as duas primeiras descargas de retorno de cada relâmpago. Neste período, o líder positivo na nuvem está menos desenvolvido do que no restante da duração, sugerindo uma quantidade menor de ramos decaídos e passíveis de sustentar a ocorrência de grande número de líderes de recuo. Ou seja, seja qual for o regime em questão, o primeiro intervalo entre descargas de retorno teria pouca expressão em termos de geração de líderes de recuo.

Resultado mais importante, no entanto, é que o efeito da descarga de retorno subsequente (3 ms após o pico de corrente) gera líderes de recuo em uma taxa mais alta do que o regime sem corrente contínua, ou seja, o líder positivo desconectado do solo. Isso é mais uma evidência sobre o papel do potencial do solo transportado pela descarga de retorno no disparo dos líderes de recuo.

A Tabela 5.1 relaciona a mediana das taxas médias de líderes de recuo, envolvendo todas as ordens de descargas de retorno (da Tabela 4.3), com o nível típico de corrente dos regimes ou processos categorizados do relâmpago nuvem-solo negativo (cap. 4). Nota-se certa proporcionalidade entre a taxa de líderes de recuo e o nível de corrente na base do canal junto ao solo. Quanto maior a corrente no canal, menor é sua resistência: ou seja, o potencial do canal dentro da nuvem torna-se mais próximo do potencial nulo do solo.

Tabela 5.1 – Mediana das taxas médias de líderes de recuo dos processos ou regimes do relâmpago nuvem-solo negativo relacionadas com seus respectivos níveis de corrente.

<b>Processo/Regime</b>	Nos próximos 3 ms após o pico da descarga de retorno	Durante a corrente contínua ( $t > 10$ ms e sem os primeiros 3 ms)	Na ausência de corrente contínua
<b>Taxa média de líderes de recuo (mediana, <math>(\text{ms})^{-1}</math>)</b>	0,333	0,133	0,120
<b>Ordem de grandeza da corrente junto ao solo (A)*</b>	Queda exponencial de $10^4$ a $10^1$	$10^2$	Nula ou desprezível

\* Rakov e Uman (2003).

#### 5.4. Sobre o mecanismo de disparo do líder de recuo

Um conjunto de evidências foi encontrado neste trabalho sugerindo que o regime de potencial no entroncamento do ramo do líder positivo é um dos fatores determinantes para o disparo de um líder de recuo no trecho decaído do mesmo ramo:

- i) A queda abrupta na geração de líderes de recuo após a descarga de retorno e consequente transmissão do potencial de terra no líder, em relâmpagos nuvem-solo positivos;
- ii) O agrupamento de líderes de recuo em torno de entroncamentos comuns;
- iii) A concatenação e a interatividade cíclica entre líderes de recuo com outros processos que promovem a elevação da corrente no entroncamento comum (descarga de retorno, componente M e progressão de ramo do líder positivo);
- iv) A maior taxa de líderes de recuo produzidos logo após o pico de corrente da descarga de retorno, seguida por uma taxa média referente aos períodos de corrente contínua, e a menor taxa durante a ausência de corrente contínua, nos nuvem-solo negativos. A transmissão mais efetiva do potencial de terra ao longo do canal favoreceu, portanto, uma maior ocorrência;
- v) A localização de iniciação preferencial na região mais exterior da estrutura do líder, incluindo a manifestação mais expressiva do perímetro expansivo, indicando de algum modo uma faixa de interface entre o potencial ambiente da nuvem e o potencial da estrutura interna do líder positivo.

Baseado nessas evidências, o regime de potencial em ramos decaídos do líder positivo foi modelado simplificadamente para as diferentes situações analisadas (Figura 5.2). Foram utilizados potenciais com base na ordem de grandeza dos valores típicos encontrados nos centros positivo e negativo (módulo de  $\sim 50 \times 10^6$  V em relação ao solo). Valores ou ordens de grandeza do potencial do entroncamento ( $U_E$ ), da ponta do líder positivo ( $U_{\text{ponta}}$ ) na interface com o ambiente da nuvem, da diferença de potencial no ramo decaído ( $\Delta U_{RD}$ ) e o potencial do solo ( $U_{\text{gnd}}$ ) estão indicados. As situações onde  $\Delta U_{RD} > 10^7$  V (ou  $\Delta U_{RD} > 0$  V, quando a magnitude não pôde ser estimada),

representam a iminência (possível para  $\Delta U_{RD} > 0$  V) de um líder de recuo. Nos nuvem-solo positivo e negativo, considera-se que o canal ou entroncamento principal está conectado ao centro de cargas indicado através da imersão de seu líder de polaridade oposta. No caso do ascendente negativo, considera-se que pode estar imerso ou em direção ao centro de cargas negativo.

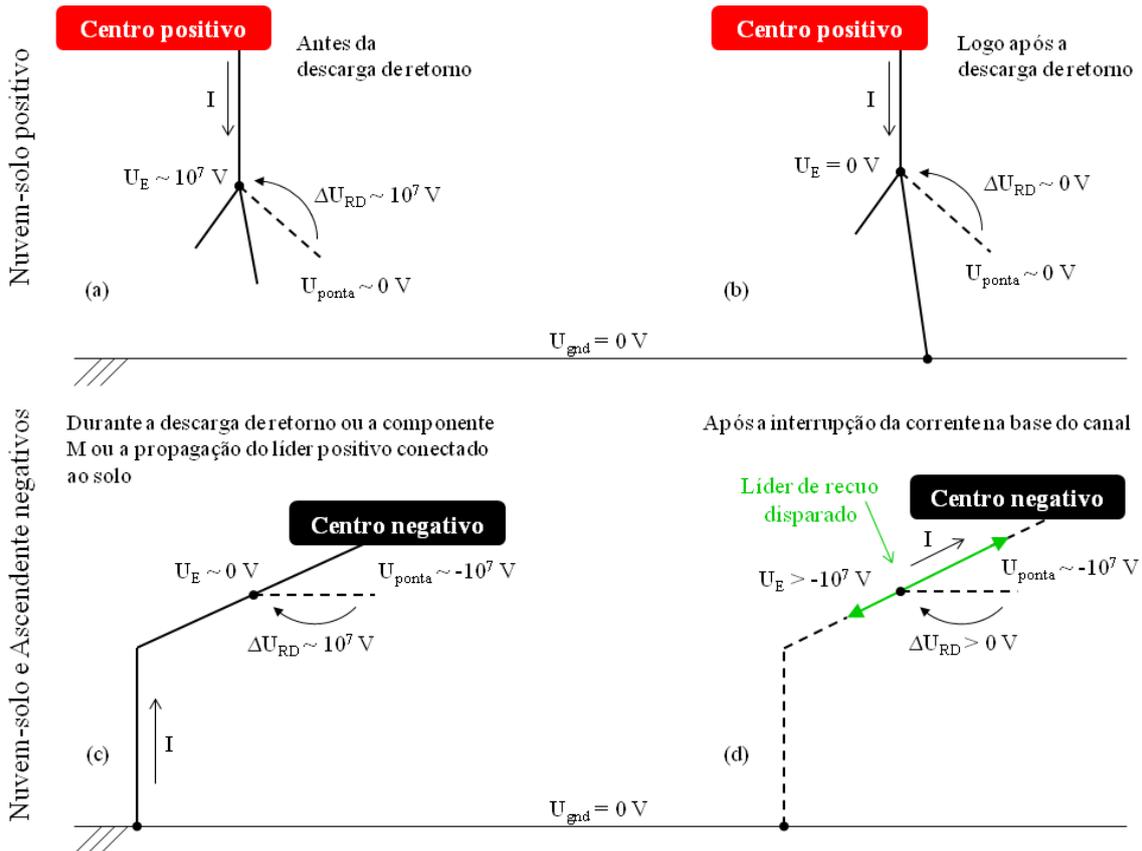


Figura 5.2 – Modelagem do regime de potencial em ramos decaídos do líder positivo para as diferentes situações analisadas.

O regime de potencial necessário para o disparo de um líder de recuo comum a todos esses casos seria a presença de uma diferença de potencial suficiente para a quebra de rigidez dielétrica do trecho decaído de um ramo, com o maior potencial no entroncamento do ramo. Especifica-se aqui “trecho decaído” do ramo para incluir a situação onde a ponta do líder está ativa e segmentos anteriores do canal estão sem luminosidade e supostamente sem corrente. O valor mínimo aproximado dessa diferença de potencial é dado pela Eq. (5.1).

$$\Delta U_{LR} \approx E_{QR} \cdot L_{RD} \quad \text{Eq. (5.1)}$$

Onde:

$\Delta U_{LR}$ : diferença de potencial sobre o trecho decaído do ramo capaz de disparar um líder de recuo (V);

$E_{QR}$ : campo elétrico de quebra de rigidez (V/m);

$L_{RD}$ : comprimento equivalente do trecho decaído do ramo (m).

A partir da modelagem para os tipos e situações, foi elaborado um modelo elétrico generalizado do disparo de líder de recuo no trecho decaído de um ramo do líder positivo (Figura 5.3). Neste modelo, são considerados um entroncamento qualquer e um de seus ramos que está, ou possui um trecho, decaído. Por decaído entende-se que não porta corrente e que possui relativo baixo valor de condutividade.

É considerada a possibilidade de haver trechos do ramo, anterior e posterior (juntos à ponta e ao entroncamento, respectivamente), com relativo alto valor de condutividade e até portando correntes remanescentes de algum nível. Tais trechos seriam capazes de transmitir eficazmente os potenciais do entroncamento e da ponta ao trecho decaído, tornando, por fim, o comprimento de canal do ramo a sofrer a quebra de rigidez menor do que o comprimento total do ramo. Essa consideração contempla os casos onde há luminosidade em trechos adjacentes do mesmo ramo, como aqueles observados e mostrados nas Figuras 3.4, 3.7, 3.8, 3.10 e 3.11.

O trecho decaído não possuiria um comprimento limitado nem haveria uma variação longitudinal abrupta de condutividade e temperatura no ramo. É razoável supor, portanto, que existam zonas de transição suave entre os trechos de baixa e alta condutividade e mesmo na junção ramo-entroncamento. Assim, considera-se um comprimento equivalente do trecho decaído, análogo ao comprimento de uma coluna homogênea de gás de mesmas constituição e condições (temperatura, pressão, densidade de portadores de cargas, etc.) do trecho decaído, de raio igual ao do ramo e entre dois eletrodos com potenciais  $U_E$  e  $U_{ponta}$ , resultando em um mesmo valor de rigidez dielétrica.

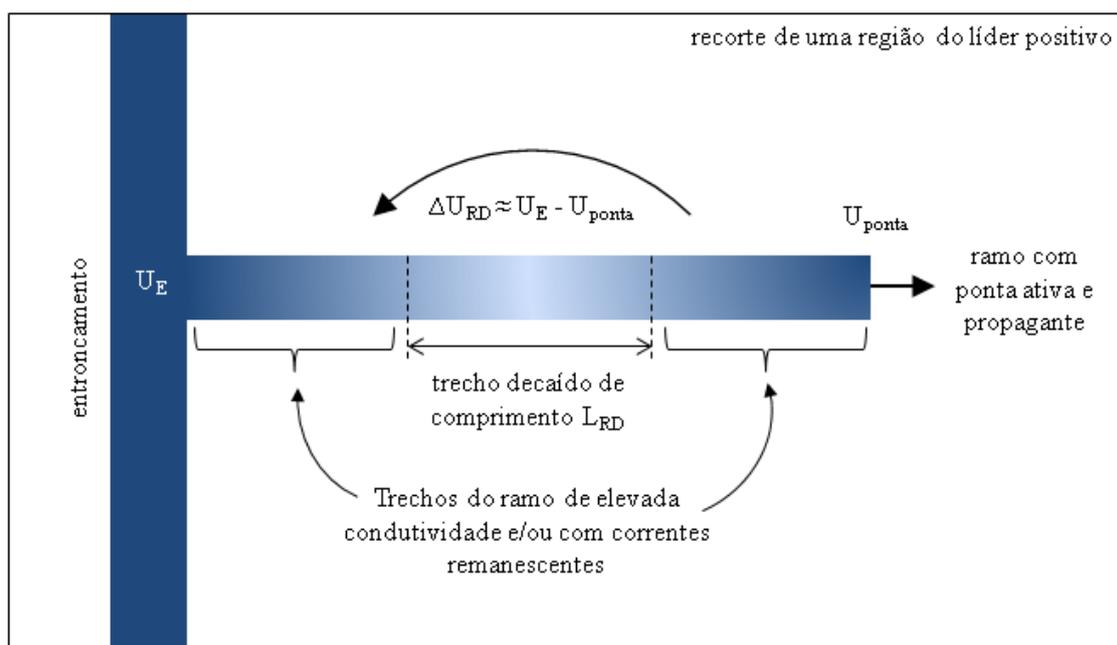


Figura 5.3 – Modelo elétrico generalizado de disparo do líder de recuo no trecho decaído de um ramo do líder positivo.

Em resumo, o conceito fundamental deste modelo é que o trecho decaído sofre a aplicação de uma tensão ( $\Delta U_{RD}$ ) resultante basicamente da diferença dos potenciais da ponta do ramo ( $U_{ponta}$ ), que está muito próximo do potencial ambiente (dentro ou fora da nuvem), e do entroncamento associado ( $U_E$ ). Se essa diferença for suficiente para a quebra de rigidez ( $\Delta U_{RD} \geq \Delta U_{LR}$ ), ocorreria um líder de recuo.

Combinando a Eq. (2.1) de Borovsky (1995), onde  $E_{QR}(T)$ , com a Eq. (5.1) tem-se a Eq. (5.2), que exprime o valor da diferença de potencial sobre o ramo ou trecho decaído suficiente para o disparo do líder de recuo, em função do seu comprimento equivalente e da sua temperatura média.

$$\Delta U_{LR} \approx \frac{6 \cdot 10^8 \cdot L_{RD}}{T_{RD}} \quad \text{Eq. (5.2)}$$

Onde:

$\Delta U_{LR}$ : diferença de potencial sobre o trecho decaído do ramo capaz de disparar um líder de recuo (V);

$L_{RD}$ : comprimento equivalente do trecho decaído do ramo (m);

$T_{RD}$ : temperatura média do trecho decaído do ramo (K).

Assim, quanto menor o segmento decaído e maior sua temperatura, menor a tensão exigida para a quebra de rigidez. Em um exemplo onde  $L_{RD} = 10^2$  m e a temperatura do trecho decaído  $T_{RD} = 10^3$  K (típica de um líder propagante), resultaria em  $\Delta U_{LR} = 6 \times 10^7$  V (60 MV). Em outro exemplo onde  $L_{RD} = 10^1$  m, considerando trechos adjacentes condutivos, e a temperatura do trecho decaído  $T_{RD} = 10^2$  K, o valor de  $\Delta U_{LR}$  seria o mesmo. Os valores encontrados são compatíveis com aqueles encontrados em uma nuvem de tempestade.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Foi realizada uma detalhada revisão dos processos constituintes dos relâmpagos que envolvem o solo (*ground flashes*). A revisão se aprofundou especialmente nos processos relacionados ao redesenvolvimento do líder positivo. Duas análises paralelas foram desenvolvidas baseadas em observações do líder positivo fora da nuvem (relâmpagos nuvem-solo positivo e ascendente negativo) e dentro da nuvem (relâmpago nuvem-solo negativo), respectivamente.

O resultado geral desta tese foi uma extensa caracterização do processo de redesenvolvimento do líder positivo através da quebra de rigidez, do então chamado líder de recuo, para diferentes tipos e situações de relâmpagos. A grande complexidade deste processo pôde ser constatada e este trabalho sugere que sua ocorrência seja determinante nas características do relâmpago como um todo.

Diversas características do líder de recuo relatadas na literatura puderam ser confirmadas neste trabalho: expressiva propagação retrógrada, desenvolvimento bidirecional, iniciação em trechos decaídos e sem luminosidade de ramos da região mais exterior do líder positivo e sua ocorrência na fase mais lenta do líder.

### **6.1. Contribuições desta tese**

Outras características observadas do líder de recuo não estão muito estabelecidas na literatura, como a diversidade e a estrutura de suas assinaturas de campo elétrico e as semelhanças entre a geração da descarga de retorno subsequente e da componente M nos relâmpagos nuvem-solo e ascendente negativos. Também o papel do líder de recuo ficou mais claro: este desempenha uma função básica de reativação da propagação do líder positivo em ramos decaídos e de condicionamento da estrutura ramificada do líder positivo, e duas funções específicas de geração dos processos da descarga de retorno e da componente M.

Os termos “líder de redesenvolvimento” ou “líder de redesenvolvimento por quebra de rigidez” descrevem melhor o processo do que “líder de recuo”, por não ocorrer retração do canal do líder e sim redesenvolvimento de um canal formado e decaído.

São descritas a seguir as contribuições inéditas deste trabalho. Pela primeira vez, foi analisada a interação entre os líderes de recuo (LRs), bem como sua quantificação ao longo da vida de um relâmpago.

Na análise da interação entre LRs, foram observados três fenômenos diferentes que provavelmente são associados: o “agrupamento” de líderes de recuo ao invés da aleatoriedade; a “interatividade” com outros processos (descarga de retorno subsequente, componente M e reativação de ramo); e a “interatividade cíclica” de líderes de recuo com outros processos, como uma repetição da interatividade em vários ciclos. A duração típica de cada ciclo foi de unidades de milissegundo. O que há em comum nos fenômenos de interatividade é a elevação da corrente no canal ou entroncamento comum ao ramo que sofreu a ocorrência do líder de recuo.

A partir da quantificação temporal dos LRs, foram calculadas as taxas médias de geração de líderes de recuo e de reincidência em um mesmo ramo. Taxas médias de  $\sim 1$  (ms)<sup>-1</sup> foram encontrados para líderes expostos fora da nuvem (nuvem-solo positivo e ascendente negativo) e de  $\sim 0,2$  (ms)<sup>-1</sup> para líderes dentro da nuvem (nuvem-solo negativo), o último possivelmente menor do que o real. Foram calculadas taxas referentes a três processos ou regimes do nuvem-solo negativo: descarga de retorno ( $0,333$  (ms)<sup>-1</sup>), corrente contínua ( $0,133$  (ms)<sup>-1</sup>) e ausência de corrente contínua ( $0,120$  (ms)<sup>-1</sup>). Tais taxas são proporcionais aos respectivos níveis de corrente no canal principal de cada regime, evidenciando o papel do potencial transmitido pelo solo na geração de líderes de recuo. Foi observado também um tempo mínimo de reincidência de líderes de recuo em um mesmo ramo da ordem de unidades de milissegundos.

Baseado nas evidências encontradas foi elaborado um modelo elétrico para o disparo do líder de recuo. O conceito fundamental deste modelo é que o trecho decaído sofre a aplicação de uma tensão resultante basicamente da diferença dos potenciais da ponta do ramo, que está muito próximo do potencial ambiente e do entroncamento associado. Se

a diferença for suficiente para a quebra de rigidez, ocorreria um líder de recuo. Tal diferença de potencial é descrita em função da temperatura e do comprimento equivalente do trecho decaído do ramo.

## **6.2. Sugestões para trabalhos futuros**

Como sugestões para trabalhos futuros, o autor destaca:

- a) Realização de observações envolvendo simultaneamente múltiplas técnicas, entre elas: o mapeamento de fontes de radiação, antenas de campo elétrico (rápido e lento), câmeras rápidas e sondagens do perfil de campo elétrico ao longo da vida da nuvem de tempestade, etc.;
- b) Desenvolvimento de modelos numéricos mais detalhados do disparo e da propagação bidirecional do líder de recuo, considerando os modelos de Mazur e colegas;
- c) Desenvolvimento de modelos teóricos e de ensaios de laboratório sobre a quebra de rigidez de gases ionizados (referente ao canal decaído).



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKITA, M., Y. NAKAMURA, S. YOSHIDA, T. MORIMOTO, T. USHIO, Z. KAWASAKI, AND D. WANG. What occurs in K process of cloud flashes? **J. Geophys. Res.**, 115, D07106, doi:10.1029/2009JD012016, 2010.
- ALDIS. **Dokumentation feldmesssystem** (Documentação do sistema de medição de campo), v. 1.0. Austrian Lightning Detection and Information System, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419**: proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2001.
- BALLAROTTI, M. G.; M. M. F. SABA; O. PINTO Jr. High-speed camera observations of negative ground flashes on a millisecond-scale. **Geophys. Res. Lett.**, v. 32, L23802, 2005. doi:10.1029/2005GL023889.
- BALLAROTTI, M. G.; SABA, M. M. F.; PINTO JR., O.; BOURSCHIEDT, V.; NACCARATO, K. P. First high-speed camera observations of lightning in South Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 13., 2007, Beijing, China. **Proceedings...** Aug. 13-17, Beijing, China, 2007.
- BALLAROTTI, M. G.; SABA, M. M. F.; PINTO, O. JR.; LACERDA, M.; WILLIAMS, E. R. Channel base current model for negative multiple cloud-to-ground lightning. In: **AGU Fall Meeting Abstracts**, AE13A-0362, p. 0362, San Francisco, USA, dez, 2012a.
- BALLAROTTI, M. G.; MEDEIROS, c.; SABA, M. M. F.; SCHULZ, W.; PINTO Jr. O. Frequency distributions of some parameters of negative downward lightning flashes based on accurate-stroke-count studies. **J. Geophys. Res.**, v. 117, 2012b. D06112, doi:10.1029/2011JD017135.
- BARAŃSKI, P.; BODZAK, P. Some observations of bipolar flashes during summer thunderstorms near Warsaw. **Acta Geophys.**, v. 54, p. 71-89, 2006.
- BAZELYAN, E. M.; RAIZER, Y. P. **Lightning physics and lightning protection**, IOP Publishing, 2000.
- BAZELYAN, E.M.; GORIN, B.N.; LENITOV, V.I. **Physical and engineering foundations of lightning protection**. Leningrad: Gidrometeoizdat, 223 pp., 1978.
- BERGER, K.; VOGELSANGER, E. Photographische Blitzuntersuchungen der Jahre 1955-1965 auf dem Monte San Salvatore. **Bull. Schweiz. Elektrotech. Ver.**, v. 57, p. 599-620, 1966.
- BERGER, K. Novel observations on lightning discharges: results of research on Mount San Salvatore. **J. Franklin Inst.**, v. 283, n. 6, p. 478-525, 1967. doi:10.1016/0016-0032(67)90598-4.

BERGER, K.; ANDERSON, R. B.; KRÖNINGER, H. Parameters of lightning flashes. **Electra-CIGRE**, n. 41, p. 23-37, 1975.

BOROVSKY, J. E. An electrodynamic description of lightning return strokes and dart leaders: guided wave propagation along conducting cylindrical channels. **J. Geophysical Res.**, v.100, n. D2, p.2697-2726, Feb 20, 1995.

BROOK, M.; KITAGAWA, N.; WORKMAN, E. J. Quantitative study of strokes and continuing currents in lightning discharges to ground. **J. Geophys. Res.**, v. 67, p. 649–659, 1962.

BROOK, M.; KITAGAWA, N. Radiation from lightning discharges in the frequency range 400 to 1000 Mc/s. **J. Geophys. Res.** v. 69, p. 2431-3, 1964.

CAMPOS, L. Z. S.; SABA, M. M. F.; BALLAROTTI, M. G.; PINTO, O. Jr.; SCHULZ, W. Characteristics of preliminary breakdown for first strokes and subsequent new-channel strokes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING & INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS, 2., 2006, Maceió. **Proceedings...** Maceió, 2006.

CAMPOS, L. Z. S.; SABA, M. M. F.; PINTO JR., O.; BALLAROTTI, E M.G. Waveshapes of continuing currents and properties of M-components in natural negative cloud-to-ground lightning from high-speed video observations. **Atmos. Res.**, v.84, p. 302-310, 2007. doi:10.1016/j.atmosres.2006.09.002.

CAMPOS, L. Z. S.; SABA, M. M. F.; PINTO JR., O.; BALLAROTTI, E M. G. Waveshapes of continuing currents and properties of M-components in natural positive cloud-to-ground lightning. **Atmos. Res.**, v.91, p. 416-424, 2009. doi:10.1016/j.atmosres.2008.02.020.

CAMPOS, L. Z. S.; SABA, M. M. F. Electric field waveforms of M components in negative and positive ground flashes: a comparative analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 2012, Vienna, Austria. **Proceedings...** Vienna: IEEE, 2012.

CAMPOS, L. Z. S.; SABA, M. M. F.; WARNER, T. A.; PINTO, O. JR.; KRIDER, E. P.; ORVILLE, R. E. High-speed video observations of natural cloud-to-ground lightning leaders: a statistical analysis. **Atmospheric Research**, v.135–136, p. 285–305 <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.12.011>, 2014.

CHOWDHURI, P. et al. Parameters of lightning strokes: a review. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 20, n. 1, p. 346–358, 2005. doi:10.1109/TPWRD.2004.835039.

COORAY, V. (Ed.). **The lightning flash**. London: IEE, 2003.

COORAY, V.; JAYARATNE, K. P. S. C. Characteristics of lightning flashes observed in Sri Lanka in the tropics, **J. Geophys. Res.**, v. 99, n. D10, 21,051–21,056, doi:10.1029/94JD01519, 1994.

COORAY, V.; PÉREZ, H.. Some features of lightning flashes observed in Sweden. **J. Geophys. Res.**, v. 99, n. D5, 10.683–10.688, 1994. doi:10.1029/93JD02366.

COORAY, V.; FERNANDO, M. Lightning parameters of engineering interest. In: COORAY, G. V. (Ed.) **Lightning protection**. London: IET, 2010. cap. 2.

EDENS, H. E., et al. VHF lightning mapping observations of a triggered lightning flash, **Geophys. Res. Lett.**, v. 39, n. L19807, 2012. doi:10.1029/2012GL053666.

FAN, X.; ZHANG, G.; WANG, Y.; LI, Y.; ZHANG, T.; WU, B. Analyzing the transmission structures of long continuing current processes from negative ground flashes on the Qinghai-Tibetan Plateau. **J. Geophys. Res. Atmos.**, V. 119, P. 2050–2063, 2014. doi:10.1002/2013JD020402.

FERRAZ, E.C. **Medidas de corrente contínua em raios nuvem-solo negativos naturais no Brasil**: desenvolvimento de instrumentação e primeiros resultados. São José dos Campos: INPE, 2009. 133p. (INPE-15786-TDI/1529) Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/35J72M8>>. Acesso em: 23 abr. 2015.

FERRO, M. A. S. **Características dos relâmpagos nuvem-solo negativos que apresentam múltiplos canais**. 2008. 242 p. (INPE-15400-TDI/1414). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/347HTRP>>. Acesso em: 23 abr. 2015.

FERRO, M. A. S.; SABA, M. M. F.; PINTO JR. O. Time-intervals between negative lightning strokes and the creation of new ground terminations. **Atmospheric Research**, v.116, 15 Oct., p. 130-133, 2012.

FISHER, R.J.; SCHNETZER, G.H.; THOTTAPPILLIL, R.; RAKOV, V.A.; UMAN, M.A.; GOLDBERG, J.D. Parameters of triggered-lightning flashes in Florida and Alabama. **J. Geophys. Res.**, v. 98, p. 22887–22908, 1993.

FUCHS, F.; LANDERS, E.U.; SCHMID, R.; WIESINGER, J. Lightning current and magnetic field parameters caused by lightning strikes to tall structures relating to interference of electronic systems. **Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on**, v.40, n.4, p.444,451, Nov., 1998. doi: 10.1109/15.736205

GALLIMBERTI, I.; BACCHIEGA, G.; BONDIOU-CLERGERIE, A.; LALANDE, P. Fundamental processes in long air gap discharges. **C. R. Physique**, v. 3, p. 1335–1359, 2002.

GUO, C.; KRIDER, E. P. The optical and radiation field signatures produced by lightning return strokes. **J. Geophys. Res.**, v. 87, p. 8913–8922, 1982.

HAYENGA, C.O. Characteristics of lightning VHF radiation near the time of return strokes. **J. Geophys. Res.**, v. 89, p. 1403-10, 1984.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). **1410–2010 IEEE guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines**. New York, 2011. , 63 p.

INPE, INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Monitoramento**. Acesso em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/servicos/contrato.monitoramento.php>, 13/fev/2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Glossário**. 2014. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=glossario#S>. Acesso em: 22/jan/2014.

JORDAN, D.M., IDONE, V.P., RAKOV, V.A., UMAN, M.A., BEASLEY, W.H., JURENKA, H. Observed dart leader speed in natural and triggered lightning. **J. Geophys. Res.** V. 97, p. 9951–9957, 1992.

JORDAN, D.M.; IDONE, V.P.; ORVILLE, R.E.; RAKOV, V.A.; UMAN, M.A. Luminosity characteristics of dart leaders and return strokes in natural lightning. **J. Geophys. Res.**, v. 55, p. 39-41, 1995.

JORDAN, D. M.; RAKOV, V. A.; BEASLEY, W. H.; UMAN, M. A. Luminosity characteristics of dart leaders and return strokes in natural lightning. **J. Geophysical Res.**, v. 102, n. D18, p. 22,025-22,032, Sept. 27, 1997.

KASEMIR, H. W. **Qualitative ubersicht uber potential-, feld- und ladungsverhaltnisse bei einer blitzentladung in der gewitterwolke** (Qualitative survey of the potential, field and charge conditions during a lightning discharge in the thunderstorm cloud). In: Israel, H. (Ed.). **Das gewitter**. Leipzig, Akadem. Verlagsgesellschaft, 1950.

KITAGAWA, N.; BROOK, M. A comparison of intracloud and cloud-to-ground lightning discharges. **J. Geophys. Res.**, v. 65, n. 4, p.1189–1201, 1960.

KITAGAWA, N.; BROOK, M.; WORKMAN, E. J. Continuing current in cloud-to-ground lightning discharges. **J. Geophys. Res.**, v. 67, p. 637-647, Feb 1962.

KONG, X.; QIE, X.; ZHAO, Y. Characteristics of downward leader in a positive cloud-to-ground flash observed by high-speed video camera and electric field changes. **Geophys. Res. Lett.**, v. 35, n. L05816, 2008.

KREHBIEL, P. R. The electrical structure of thunderstorms. In: Geophysics Study Committee (Org.) **Studies in geophysics: the earth's electrical environment**. Washington, DC: National Academy Press, 1986. cap. 8.

KREHBIEL, P. R. Thunderstorm electrification: an overview of recent observational results. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 13., 2007, Aug. 13-17, Beijing, China. **Proceedings...** Beijing, 2007.

KREHBIEL, P. R., et al. Three-dimensional total lightning observations with the lightning mapping array. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING DETECTION, 17., 2002, Tucson. **Proceedings...** Tucson: Global Atmospherics Inc., 2002.

KREHBIEL, P. R. **Observational evidence of 'recoil' breakdown in VHF lightning studies.** In: XIV International Conference on Atmospheric Electricity, Aug. 08-12, Rio de Janeiro, Brazil, 2011.

KREHBIEL, P. R.; WANG, D. Lightning Physics: an assessment of recent observational developments. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 14., 2011, Aug. 08-12, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro, Brazil, 2011.

KREHBIEL, P. R.; BROOK, M.; MCCRORY, R.A. An analysis of the charge structure of lightning discharges to ground, **J. Geophys. Res.** v.84, p. 2432–2456, 1979.

KRIDER, E. P. et al. The electric fields produced by lightning stepped leaders. **J. Geophys. Res.**, v. 82, p. 951-60, 1977.

LIN, Y. T.; UMAN, M. A.; TILLER, J.A.; BRANTLEY, R.D.; BEASLEY, W.H.; KRIDER, E.P.; WEIDMAN, C.D. Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurements. **J. Geophys. Res.**, vol. 84, pp.6307-6314, 1979.

L'HELGOUALC'H, I.; LALANDE, P.; LAROCHE, P.; BROU, A. Recoil streamer inception during lightning development. In: Int. Conf. on Atmosph. Electric., 13., 2007, Beijing, China, Aug 13-17, 2007. **Proceedings...** Beijing, 2007.

MACGORMAN, D. R.; RUST, W. D. **The electrical nature of storms.** 1. ed. New York: Oxford University Press, 1998. 432 pp.

MALAN, D. J.; SCHONLAND, B. F. J. The electrical processes in the intervals between the strokes of a lightning discharge. **Proc. R. Soc. Lond. A**, 206, p. 145-163, 1951.

MAZUR, V., Triggered lightning strikes to aircraft and natural intracloud discharges, **J. Geophys. Res.**, v. 94, n. D3, p. 3311-3325, 1989.

MAZUR, V. Physical processes during development of lightning flashes. **Comptes Rendus Physique**, v. 3, p. 1393-1409, 2002.

MAZUR, V. **Lightning physics.** São Paulo: USP, IAG, 2007. Notas do curso.

MAZUR, V.; RUHNKE, L. H. Common physical processes in natural and artificially triggered lightning. **J. Geophys. Res.**, v. 98, n. D7, p. 12,913-12,930, 1993.

- MAZUR, V.; RUHNKE, L. H. Model of electric charges in thunderstorms and associated lightning. **J. Geoph. Res.**, v. 103, n. D18, p. 23,299-308, 1998.
- MAZUR, V.; RUHNKE, L.H. Physical processes during development of upward leaders from tall structures. **Journal of Electrostatics**, v.69, p. 97-110, 2011.
- MAZUR, V.; RUHNKE, L.H. On the mechanism of current cutoff in lightning flashes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 31., 2012, Vienna, Austria. **Proceedings...** Vienna, 2012.
- MAZUR, V., KREHBIEL, P. R., SHAO, X.-M. Correlated high-speed video and interferometric observations of a cloud-to-ground flash. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, p. 25,731-25,753, Dec. 1995.
- MAZUR, V., KREHBIEL, P. R.; SHAO, X.-M. “Spider” lightning in intracloud and positive cloud-to-ground flashes. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, D16, 19811–19822, 27 Aug., 1998.
- MAZUR, V.; L. H. RUHNKE; T. A. WARNER; R. E. ORVILLE. Recoil leader formation and development. **Journal of Electrostatics**, v. 71, n. 4, Aug, p. 763-768, 2013. ISSN 0304-3886, <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2013.05.001>.
- MEDEIROS, C. **Estudo da ocorrência de corrente contínua em relâmpagos nuvem-solo negativos**. 2011. 110 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/08.02.04.04-TDI). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3A79PQ8>>. Acesso em: 23 abr. 2015.
- MIRANDA, F. J.; O. PINTO JR.; M. M. F. SABA. A study of the time interval between return strokes and K-changes of negative cloud-to-ground lightning flashes in Brazil. **J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, p. 293–297, 2003.
- OGAWA, T.; M. BROOK. The mechanism of the intracloud lightning discharge. **J. Geophys. Res.**, v. 69, n. 24, p. 5141–5150, 1964. doi:10.1029/JZ069i024p05141.
- ORVILLE, R. E. A high speed time resolved spectroscopic study of the lightning return stroke. Parts 1, 2 e 3. **J. Atmos. Sci.**, v. 25, p. 827-56, 1968.
- PAIVA, A.R.; SABA, M.M.F.; NACCARATO, K.P.; SCHUMANN, C.; WARNER, T.A.; FERRO, M.A.S.; JAQUES, R. Detection of upward lightning from towers in São Paulo, Brazil by lightning location systems. In: GROUND 2014 & 6th LPE, 2014, Manaus. **Proceedings...** Manaus, 2014.
- PILKEY, J. T., et al. Rocket-and-wire triggered lightning in 2012 tropical storm Debby in the absence of natural lightning. **J. Geophys. Res. Atmos.**, v.118, p.13158–13174, 2013. doi:10.1002/2013JD020501.
- PINTO, O. Jr. 1996. 1 fotografia, color.

PINTO, O. JR.; PINTO, I. R. C. A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. 196p.

PINTO, O. Jr. et al. Cloud-to-ground lightning observations in Brazil. In: BETZ et al. (eds.). **Lightning: principles, instruments and applications**. Springer Science+Business Media B.V., 2009. DOI 10.1007/978-1-4020-9079-0.

PROCTOR, D.; R. UYTENBOGAARDT; B. MEREDITH. VHF radio pictures of lightning flashes to ground. **J. Geophys. Res.**, v. 93, n. D10, p. 12683-12727, 1988.

QIE, X..KONG, X.; ZHANG, G.; ZHANG, T. YUAN, T.; ZHOU, Y. ZHANG, Y.; WANG, H.; SUN, A. The possible charge structure of thunderstorm and lightning discharges in northeastern verge of Qinghai–Tibetan Plateau. **Atmos. Res.**, v.76, p. 231– 246, 2005.

QIE, X.; KONG, X. Progression features of a stepped leader process with four grounded leader branches. **Geophys. Res. Letters**, v. 34, n. L06809, 2007. doi:10.1029/2006GL028771.

QIE, X; WANG, Z.; WANG, D.; LIU, M. Characteristics of positive cloud-to-ground lightning in Da Hinggan Ling forest region at relatively high latitude, northeastern China. **J. Geophys. Res.**, v. 118, p. 13393–13404, 2013. 2013JD020093.

RAKOV, V. A. Some inferences on the propagation mechanisms of dart leaders and return strokes. **J. Geophys. Res.**, v. 95, p. 5455-70, 1990.

RAKOV, V. A. A review of positive and bipolar lightning discharges. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 84, p. 767–76, 2003. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-84-6-767>.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A.. Long continuing current in negative lightning ground flashes. **J. Geophys. Res.**, v. 99, p. 8157– 8165, 1990a.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Some properties of negative cloud to-ground lightning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 20., 1990, Interlaken, Switzerland. **Proceedings...** Interlaken, Switzerland: Swiss Electrotechn. Assoc., 1990b.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Some properties of negative cloud-to-ground lightning flashes versus stroke order. **J. Geophys. Res.**, v. 95, n. D5, p. 5447–53, 1990c.

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. **J. Geophys. Res.**, v. 99, p. 8157– 8165, 1994.

RAKOV, V. A.; HUFFINES, G. R. Return-stroke multiplicity of negative cloud-to-ground lightning flashes. **J. Appl. Meteorol.**, v. 42, p. 1455–1462, 2003.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: physics and effects**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 687p.

RAKOV, V.A.; THOTTAPPILLIL, R.; UMAN, M. A. Electric field pulses in K and M changes of lightning ground flashes. **J. Geophys. Res.**, v. 97, p. 9935-50, 1992.

RAKOV, V. A.; M. A. UMAN; R. THOTTAPPILLIL. Review of lightning properties from electric field and TV observations. **J. Geophys. Res.**, v. 99, n. 10, p.745–10,750, 1994. doi:10.1029/93JD01205.

RAKOV, V.A; UMAN, M.A; HOFFMAN, G.R.; MASTERS, M.W.; BROOK, M. Burst of pulses in lightning electromagnetic radiation: observations and implications for lightning test standards. **Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on**, v.38, n.2, p.156-164, May, 1996.

RHODES, C.; KREHBIEL, P. R. Interferometric observations of a single stroke cloud-to-ground flash. **Geophys. Res. Lett.**, v. 16, n. 10, p. 1169-72, Oct, 1989.

RIOUSSET, J. A.; V. P. PASKO; P. R. KREHBIEL; R. J. THOMAS; W. RISON. Three-dimensional fractal modeling of intracloud lightning discharge in a New Mexico thunderstorm and comparison with lightning mapping observations. **J. Geophys. Res.**, v.112, n. D15203, 2007. doi:10.1029/2006JD007621.

RISON, W.; THOMAS, P R. J.; KREHBIEL, R.; HAMLIN, T.; HARLIN, J. A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico. **Geophys. Res. Lett.**, v. 26, p. 3573– 3576, 1999.

RUHNKE, L. H. **Screening effects on branched upward leaders**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 31., 2012, Vienna, Austria. **Proceedings...** Vienna, Austria, 2012.

SABA, M. M. F. **Review of lightning properties from high-speed video observations**. In: International Conference on Atmospheric Electricity, 14., 2011, Aug. 8-12, Rio de Janeiro, Brazil. **Proceedings...** Rio de Janeiro, 2011.

SABA, M. M. F.; BALLAROTTI, M. G.; PINTO JR., O. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. **J. Geophys. Res.**, v. 111, n. D03101, 2006. doi:10.1029/2005JD006415.

SABA, M. M. F.; CUMMINS, K. L.; WARNER, T. A.; KRIDER, E. P.; CAMPOS, L. Z. S.; BALLAROTTI, M. G.; PINTO JR., O. ; FLEENOR, S. A. Positive leader characteristics from high-speed video observations. **Geophys. Res. Lett.**, v. 35, n. L07802, 2008. doi:10.1029/2007GL033000.

SABA, M. M. F.; CAMPOS, L. Z. S.; KRIDER, E. P.; PINTO Jr., O. High-speed video observations of positive ground flashes produced by intracloud lightning. **Geophys. Res. Lett.**, v. 36, n. L12811, 2009a. doi:10.1029/2009GL038791.

SABA, M. M. F.; SCHULZ, W.; WARNER, T. A.; CAMPOS, L. Z. S. High-speed video observations of the dissimilarities between positive and negative cloud-to-ground flashes. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION (SIPDA), 10., 2009. Curitiba, Brasil, 9th-13th Nov. **Proceedings...** Curitiba, 2009b.

SABA, M. M. F.; SCHULZ, W.; WARNER, T. A.; CAMPOS, L. Z. S.; SCHUMANN, C.; KRIDER, E. P.; CUMMINS, K. L.; ORVILLE, R. E. High-speed video observations of positive lightning flashes to ground. **J. Geophys. Res.**, v. 115, n. D24201, 2010. doi:10.1029/2010JD014330.

SABA, M. M. F. et al. **Upward lightning in Brazil**. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 22., 2012, Broomfield, Colorado, USA, Abr. **Proceedings...** Broomfield, 2012.

SABA, M. M. F.; SCHUMANN, C.; WARNER, T. A.; HELSDON JR., J. H.; SCHULZ, W.; ORVILLE, R. E. Bipolar cloud-to-ground lightning flash observations, **J. Geophys. Res. Atmos.**, v. 118, p. 11098–11106, 2013. doi:10.1002/jgrd.50804.

SABA, M.M.F.; et al. High-speed video and electric field observation of a negative upward leader connecting a downward positive leader in a positive cloud-to-ground flash.. **Electric Power Systems Research**, v. 118, p. 89–92, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epr.2014.06.002>

SARAIVA, A. C. V. **Estudo de fatores determinantes das características dos raios negativos**. 2010. 189 p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.17.17.41-TDI). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37GG4RP>>. Acesso em: 23 abr. 2015.

SARAIVA, A. C. V.; CAMPOS; L. Z. S.; ALVES, J.; PINTO JR. O.; ZEPKA, G. S.; BUZATO, T. S.. Estimates of recoil leader peak currents based on high-speed video observations. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE & INTERNATIONAL LIGHTNING METEOROLOGY CONFERENCE, 2014, Tucson, Arizona, EUA, 18-21 Mar. **Proceedings...** Tucson, 2014a.

SARAIVA, A. C. V.; CAMPOS, L. Z. S., WILLIAMS, E. R.; ZEPKA, G. S.; ALVES, J.; PINTO JR., O.; HECKMAN, S.; BUZATO, T. S.; BAILEY, J. C.; MORALES, C. A.; BLAKESLEE, R. J. High-speed video and electromagnetic analysis of two natural bipolar cloud-to-ground lightning flashes. **J. Geophys. Res.**, 2014b. DOI: 10.1002/2013JD020974.

SCHONLAND, B. F. J.; MALAN, D. J.; COLLENS, H. Progressive lightning, II, **Proc. R. Soc. London**, Ser. A, v.152, p. 595– 625, 1935.

SCHUMANN, C. **Caracterização dos raios positivos através de câmeras de alta velocidade e sensores de campo elétrico**. 2012. 125 p. Errata publicada em 14 de agosto de 2013. (sid.inpe.br/mtc-m19/2012/04.23.13.25-TDI). Dissertação (Mestrado

em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BPDNCS>>. Acesso em: 23 abr. 2015.

SCHUMANN, C. et al. Electric fields changes produced by positives cloud-to-ground lightning flashes.. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 92, p. 37–42, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2012.09.008>

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, n.D2, p. 2749-2783, Feb 1995.

SHAO, X.M.; KREHBIEL, P.R. The spatial and temporal development of intracloud lightning. **J. Geophys. Res.**, v. 101, D21, p. 26,641-68, nov. 27, 1996.

SHINDO, T.; UMAN, M. A. Continuing current in negative cloud-to-ground lightning, **J. Geophys. Res.**, v. 94, p. 5189– 5198, 1989.

STOLZENBURG, M.; MARSHALL, T. C. Electric field and charge structure in lightning-producing clouds. In: BETZ, H. D.; SCHUMANN, U.; LAROCHE, P. (eds.). **Lightning: principles, instruments and applications: review of modern lightning research**. Springer, 2009. 641 p.

STOLZENBURG, M., T. C. MARSHALL, S. KARUNARATHNE, N. KARUNARATHNA, T. A. WARNER, R. E. ORVILLE. Stepped-to-dart leaders preceding lightning return strokes, **J. Geophys. Res. Atmos.**, v.118, p. 9845–9869, 2013. doi:10.1002/jgrd.50706.

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. 18,631-40, 1990.

THOMAS, R. J.; KREHBIEL, P.R.; RISON, W.; HUNYADY, S. J.; WINN, W. P.; HAMLIN, T.; HARLIN, J. Accuracy of the lightning mapping array. **J. Geophys. Res.**, v.109, n. D14207, 2004. doi:10.1029/2004JD004549.

THOMSON, E. M.; UMAN, M. A.; BEASLEY, W. H. Speed and current for lightning stepped leaders near ground as determined from electric field records. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. D5, p. 8136-8142, Aug., 1985.

UMAN, M. A. Comparison of lightning and a long laboratory spark. **Proceedings of the IEEE**, v. 59, 4, p. 457, 1971.

UMAN, M. A. **The lightning discharge**. London: Academic Press, 377p., 1987.

UMAN, M. A.; R. E. VOSHALL. Time interval between lightning strokes and the initiation of dart leaders. **J. Geophys. Res.**, v. 73, n. 2, p. 497–506, 1968. doi:10.1029/JB073i002p00497.

- UMAN, M. A.; KRIDER, E. P. Natural and artificially initiated lightning. **Science**, v.246, p.457-464, Oct. 1989.
- VALINE, W. C.; KRIDER, E. P. Statistics and characteristics of cloud-to-ground lightning with multiple ground contacts. **J. Geophys. Res.**, v.107, n. D20, p. 4441, 2002. doi:10.1029/2001JD001360.
- VISACRO FILHO, S. **Descargas atmosféricas: uma abordagem de Engenharia**. [s.L.]: Artliber, 2005. 268 p.
- WANG, D.; TAKAGI, N.; WATANABE, T.; RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Luminosity waves in branched channels of two negative lightning flashes. **J. Atmos. Electr. Jpn.**, v. 20, p. 91–97, 2000.
- WARNER, T. A. Observations of simultaneous upward lightning leaders from multiple tall structures. **Atmospheric Research**, v. 117, 1 Nov 2012, p. 45-54, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.07.004>.
- WARNER, T. A.; CUMMINS, K. L.; ORVILLE, R. E.. Upward lightning observations from towers in rapid city, South Dakota and comparison with national lightning detection network data, 2004–2010. **J. Geophys. Res.**, v.117, n. D19109, 2012a. doi:10.1029/2012JD018346.
- WARNER, T. A.; SABA, M. M. F.; ORVILLE, R. E. Characteristics of upward leaders from tall towers. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 22., 2012, Broomfield, Colorado, USA, Abr.. **Proceedings...** Broomfield, CO, 2012. DVD.
- WEATHERVIDEOHD. **Banco de dados de vídeo de alta velocidade**. 2014. Disponível em: [www.weathervideohd.tv](http://www.weathervideohd.tv).. Acesso com licença em: abril, 2014.
- WEIDMAN, C.D.; KRIDER, E.P. The fine structure of lightning return stroke waveforms. **J. Geophys. Res.**,v. 83, p. 6239-47, 1978. (Correção, 1982, 87, 7351).
- WEIDMAN, C.D.; KRIDER, E.P. The radiation field wave forms produced by intracloud lightning discharge processes. **J. Geophys. Res.**, v.84, n. C6, p. 3159, Jun 1979.
- WILLETT, J. C.; D. M. LEVINE; V. P. IDONE. Lightning-channel morphology revealed by return-stroke radiation field waveforms, **J. Geophys. Res.**, v.100, p. 2727–2738, 1995.
- WILLIAMS, E. R. Charge structure and geographical variation of thunderclouds. In: COORAY, V. (Ed.). **The lightning flash**. London: IEE, 2003. cap. 1.
- WILLIAMS, E. R. Problems in lightning physics-the role of polarity asymmetry, **Plasma Sources Science and Technology**, v.15, p. S91-S108, 2006.

WILLIAMS, E. R.; HECKMAN, S. Polarity asymmetry in lightning leaders: the evolution of ideas on lightning behavior from strikes to aircraft. **Journal Aerospace Lab**, n. 5, Nov., 2012.

WINN, W. P.; EASTVEDT, E. M.; TRUEBLOOD, J. J.; EACK, K. B.; EDENS, H. E.; AULICH, G. D.; HUNYADY, S. J.; MURRAY, W. C. Luminous pulses during triggered lightning. **J. Geophys. Res.**, v.117, n. D10204, 2012.  
doi:10.1029/2011JD017105.

YOSHIDA, S. et al. The initial stage processes of rocket-and-wire triggered lightning as observed by VHF interferometry. **J. Geophys. Res.**, v. 117, n. D09119, 2012.  
doi:10.1029/2012JD017657.

ZHU, B.; ZHOU, H.; THOTTAPPILLIL, R.; RAKOV, V. A. Simultaneous observations of electric field changes, wideband magnetic field pulses, and VHF emissions associated with K processes in lightning discharges. **J. Geophys. Res. Atmos.**, v.119, p. 2699–2710, 2014. doi: 10.1002/2013JD021006.

## APÊNDICE A – ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DO RELÂMPAGO NUVEM-SOLO NEGATIVO

Esta seção está baseada principalmente na publicação que o autor e colegas elaboraram intitulada: “*Frequency distributions of some parameters of negative downward lightning flashes based on accurate-stroke-count studies*” (BALLAROTTI et al., 2012b).

Os relâmpagos de modo geral, e especialmente o nuvem-solo negativo, possuem grande variabilidade em seus parâmetros. Nesta seção, são enfocados mais os parâmetros do relâmpago como um todo (*flash parameters*) em detrimento dos parâmetros da descarga de retorno (*stroke parameters*), que foram mais caracterizados em geral, *e.g.*, Rakov e Uman (2003) e Chowdhuri et al. (2005). Cooray e Fernando (2010) revisam ambos os parâmetros sob a perspectiva da Engenharia. A Tabela A.1 mostra valores típicos dos principais processos e do relâmpago nuvem-solo (NS) negativo como um todo.

Recentemente, Ballarotti et al. (2012b) apresentaram e revisaram estatísticas de diversos estudos sobre o relâmpago NS negativo, reunindo aquelas baseadas em “estudos de contagem acurada de descargas de retorno” (*accurate-stroke-count studies*, cf. Rakov e Huffines, 2003), que identificam cada descarga de retorno com um alto grau confiança e permitem estatísticas precisas, *e.g.*, Kitagawa et al. (1962), Berger (1967), Berger et al. (1975), Rakov e Uman (1990b), Cooray e Jayaratne (1994), Cooray e Pérez (1994), Rakov et al. (1994), Saba et al. (2006) e Ballarotti et al. (2012b). Ballarotti et al. (2012b) compara-os principalmente com os trabalhos de K. Berger e colegas, que são as principais referências para a parametrização tanto da descarga quanto do relâmpago em geral<sup>25</sup>. A Tabela A.2 sumariza tais estatísticas de quatro parâmetros do relâmpago nuvem-solo negativo. As bases de dados referentes ao Vale do Paraíba (SP) apresentadas por Ballarotti et al. (2012b) e Medeiros (2011), quase idênticas, são as maiores encontradas na literatura para os referidos parâmetros, compreendendo mais de uma centena de dias de tempestades ao longo de oito anos. Este último fato as tornam independentes em relação aos tipos de tempestade, exceto àqueles que não são comuns à região ou que eventualmente não ocorreram nos dias observados.

---

<sup>25</sup> Os trabalhos de K. Berger e colegas, *e.g.*, Berger (1967) e Berger et al. (1975) são até hoje as principais referências para as normas de proteção contra descargas atmosféricas (*e.g.*, ABNT NBR 5419).

Tabela A.1 – Valores típicos dos principais processos do relâmpago nuvem-solo negativo.

Parâmetro	Processo	Valor típico
	<i>Líder Positivo dentro da nuvem</i>	
Velocidade média de propagação <sup>1</sup>		(1-2,5)x10 <sup>4</sup> m/s
	<i>Líder Escalonado (negativo)</i>	
Comprimento do passo		50 m
Velocidade média de propagação		2x10 <sup>5</sup> m/s
Carga do passo		> 1 mC
Corrente do passo		> 1 kA
Carga total		5 C
Corrente média		100-200 A
Duração total		35 ms
Temperatura do canal		~10.000 K
	<i>Primeira Descarga de Retorno<sup>2</sup></i>	
Pico de corrente		30 kA
Carga transferida		5 C
Comprimento do canal		5 km
Duração até meio pico		70-80 µs
Raio do canal		~1-2 cm
Temperatura do canal		~30.000 K
Velocidade de propagação		(1-2)x10 <sup>8</sup> m/s
	<i>Líder Contínuo</i>	
Carga		1 C
Pico de corrente		1 kA
Potencial elétrico		~15 MV
Duração total		1-2 ms
Temperatura do canal		~20.000 K
Velocidade de propagação		(1-2)x10 <sup>7</sup> m/s
	<i>Descarga de Retorno Subsequente<sup>2</sup></i>	
Pico de corrente		10-15 kA
Duração até meio pico		30-40 µs
Velocidade de propagação		(1-2)x10 <sup>8</sup> m/s
Carga		1 C
Raio do canal		~1-2 cm
Temperatura do canal		~30.000 K
	<i>Corrente Contínua Longa (&gt; 40 ms)</i>	
Intensidade de corrente		100-200 A
Carga transferida		10-20 C
Duração		~100 ms
	<i>Componente-M<sup>2</sup></i>	
Magnitude		100-200 A
Carga transferida		0,1-0,2 C
Duração		2 ms
	<i>Relâmpago como um todo</i>	
Duração		200-300 ms
Número de descargas de retorno		3-5
Intervalo entre descargas		60 ms
Carga transferida		20 C

<sup>1</sup> Krehbiel (2011).

<sup>2</sup> Todas as características da corrente para DRs e componentes-M são baseados em medições na base do canal do relâmpago.

Fonte: adaptado de Rakov e Uman (2003).

Tabela A.2 – Distribuições estatísticas de quatro parâmetros do relâmpago nuvem-solo negativo baseadas em estudos de contagem acurada de descargas de retorno.

Parâmetro / Referência	Localização geográfica	N. de tempestades	N. de eventos	Média aritmética	Desvio padrão de $\ln(x)$	Porcentagem de casos excedendo os valores tabulados (de acordo com uma distrib. lognormal)		
						95%	50%	5%
<b>A. Duração da corrente contínua (ms)</b>								
Ballarotti et al. (2012b) ( $\geq 3$ ms)	Vale do Paraíba, SP	102	2180	31	1.87	0.3	6	142
Ballarotti et al. (2012b) ( $> 10$ ms)	Vale do Paraíba, SP	102	715	85	1.29	5	39	344
Ballarotti et al. (2012b) ( $> 40$ ms)	Vale do Paraíba, SP	102	304	173	0.69	44	137	429
Kitagawa et al. (1962) ( $> 40$ ms)	New México, EUA	1	40	206	0.70	52	163	519
<b>B. Intervalo entre descargas de retorno (ms)</b>								
Berger et al. (1975)	Monte San Salvatore, Suíça	-	133	-	1.06	7	33	150
Rakov et al. (1994)	Florida, EUA	3	270	-	0.80	16	60	226
Ballarotti et al. (2012b)	Vale do Paraíba, SP	102	3147	92	0.92	13	59	270
<b>C. Número de descargas de retorno por relâmpago</b>								
K. Berger (1967)	Monte San Salvatore, Suíça	-	210	3.2	0.70	0.9	2.8	9.2
Cooray e Pérez (1994)	Uppsala, Suécia	5	137	3.4	0.59	1.3	3.4	8.8
Cooray e Jayaratne (1994)	Colombo, Sri Lanka	2	81	4.5	0.65	1.4	4.0	11.8
Kitagawa et al. (1962)	New México, EUA	3	193	6.4	0.75	1.5	5.2	17.4
Rakov e Uman (1990a)	Florida, EUA	3	76	4.6	0.68	1.3	4.0	12.4
Ballarotti et al. (2012b)	Vale do Paraíba, SP	102	883	4.6	0.54	1.9	4.6	11.2
<b>D. Duração total do relâmpago (somente relâmpagos com múltiplas descargas de retorno, ms)</b>								
Berger et al. (1975)	Monte San Salvatore, Suíça	-	39	-	1.03	31	180	900
Ballarotti et al. (2012b)	Vale do Paraíba, SP	102	736	423	0.92	66	300	1366

Fonte: adaptado de Ballarotti et al. (2012b).

## A.1 Multiplicidade de descargas de retorno

Quanto à multiplicidade de descargas de retorno, Ballarotti et al. (2012b) reconhecem um certo padrão nestes estudos (exceto para os relâmpagos em torre de Berger, 1967): aprox. 75-80% de todos os NS negativos possuem mais de uma descarga de retorno, chamados “raios múltiplos” (enquanto ~20-25% possuem somente uma descarga, chamados “raios simples”) e 50% da distribuição está entre 3 e 5. A Figura A.1 mostra a probabilidade para multiplicidades de 1 a 20 para algumas distribuições.

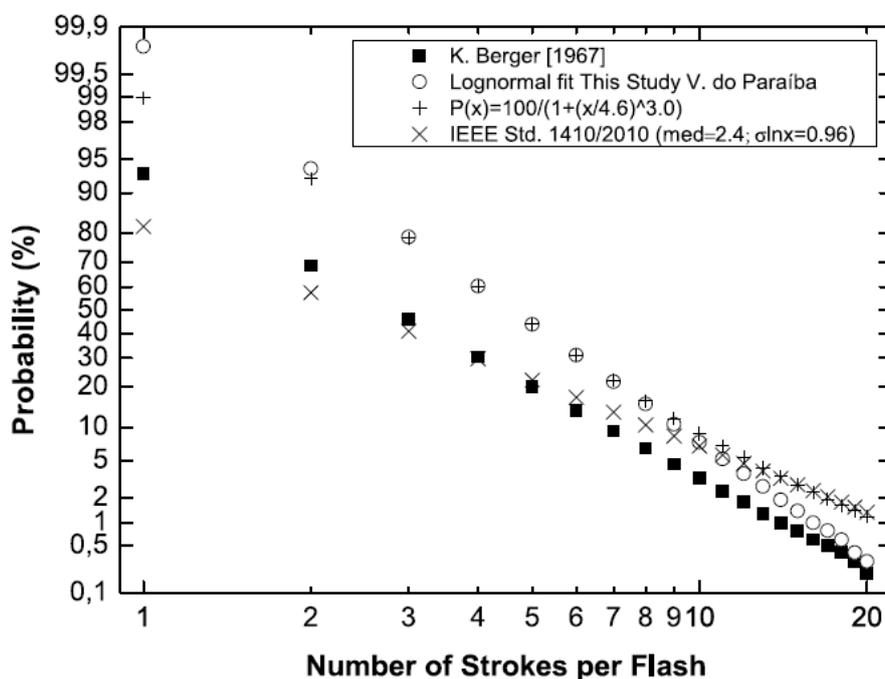


Figura A.1 – Distribuição de probabilidade do número de descargas por relâmpago observado no Vale do Paraíba (“this study” se refere a Ballarotti et al., 2012b) comparado com Berger (1967), a função aproximada  $P(x)$  e a distribuição da norma IEEE 1410/2010 (IEEE, 2011).

Fonte: Ballarotti et al. (2012b).

Quanto à multiplicidade de terminações no solo, Rakov e Uman (2003, p. 114) e Saba et al. (2006) relatam que aprox. 50% dos relâmpagos NS negativos criam mais de uma terminação no solo, resultando em uma média de 1,7 terminações por raio. Fazendo a razão da multiplicidade média com a média de terminações por raio, Medeiros (2011) e Ballarotti et al. (2012b), utilizando tanto os dados próprios quanto os obtidos na

Florida<sup>26</sup> (RAKOV et al., 1994), encontraram exatamente o mesmo valor médio por raio negativo:  $4,6/1,7 = 2,7$  descargas de retorno por terminação no solo por raio.

## A.2 Intervalo de tempo entre descargas de retorno

Quanto ao intervalo de tempo entre descargas de retorno, pode-se observar na Tabela A.2 que as distribuições de Rakov et al. (1994) e Ballarotti et al. (2012b) são muito semelhantes, possuindo medianas em torno de 60 ms. A Figura A.2 mostra a distribuição de probabilidades para os dados observados no Vale do Paraíba (SP), em contraste com os valores menores encontrados por Berger et al. (1975), que seriam derivados de medidas de intervalo sem corrente (intervalo entre descargas excluindo eventuais correntes contínuas). O maior valor encontrado na literatura é 782 ms (SABA et al., 2006) entre duas descargas em uma mesma terminação contendo uma corrente contínua visível de 714 ms. Os menores valores reportados estão abaixo de 1 ms (BALLAROTTI et al., 2012b).

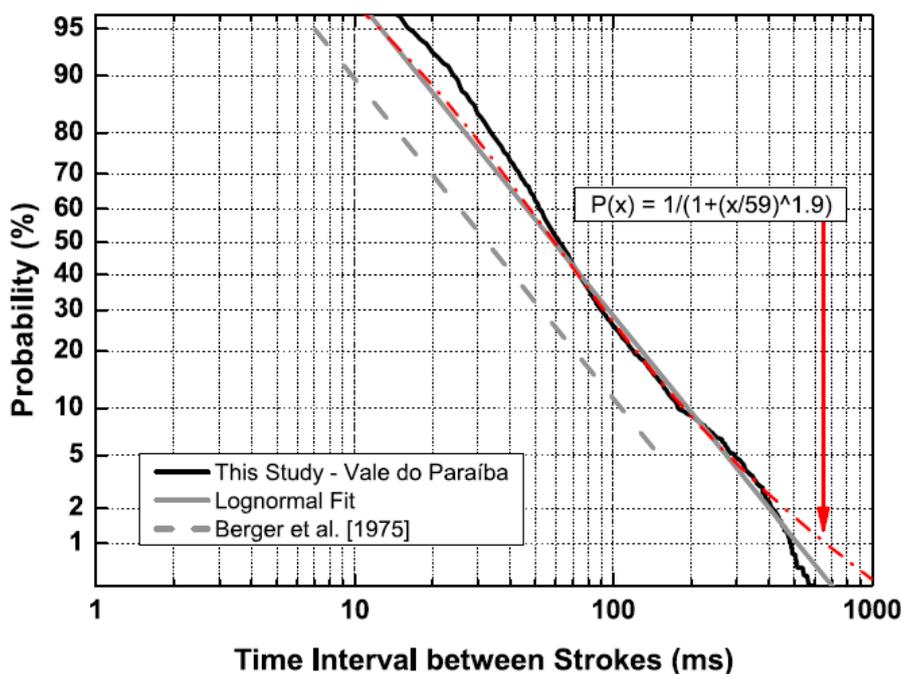


Figura A.2 – Distribuição de probabilidades do intervalo de tempo entre descargas de retorno observado no Vale do Paraíba (“this study” se refere a Ballarotti et al., 2012b), sua função aproximada  $P(x)$  e seu ajuste para uma distribuição lognormal comparados com Berger et al. (1975).

Fonte: Ballarotti et al. (2012b).

<sup>26</sup> V. Rakov, comunicação privada no VIII Simpósio Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SIPDA), São Paulo - SP, 2005.

### **A.3 Ocorrência e duração da corrente contínua**

Medeiros (2011) realizou uma extensa análise de diferentes aspectos da ocorrência de corrente contínua em 971 relâmpagos nuvem-solo negativos no Vale do Paraíba. A partir desta mesma base de dados, Ballarotti et al. (2012b) selecionaram 883 casos ocorridos a menos de 30 km e com ao menos uma descarga de retorno negativa identificada pela rede de localização de relâmpagos BrasilDat. A duração mínima da CC em ambos os estudos foi limitada em 3 ms com o intuito prático de garantir discriminação de uma eventual cauda da corrente da descarga de retorno antecedente.

Ballarotti et al. (2012b) relatam para os dados do Vale do Paraíba (SP) que 47% de todas as descargas de retorno foram seguidas por CC de alguma duração (muito-curta, curta ou longa)  $\geq 3$  ms e que 45% dos raios NS negativos contiveram corrente contínua com duração maior do que 10 ms (curta e longa), valor não muito diferente dos 37% de Shindo e Uman (1989). Medeiros (2011) relata que 78% dos raios tiveram alguma descarga seguida por CC de algum tipo e 27% por CC longa. Dentre os raios múltiplos, 55% das descargas de retorno são seguidas por algum tipo de CC.

Medeiros (2011) relata que 58% dos raios simples apresentam algum tipo de CC, diferindo de 82% de ocorrência nos raios múltiplos. Somente para a CC longa, foi observada em 15% dos raios simples e em 29% dos raios múltiplos. Ballarotti et al. (2012b) relatam que apenas 2,4% das primeiras descargas de retorno de relâmpagos múltiplos foram seguidas por CC longa, valor em concordância com os 2% de Rakov e Uman (1990a).

Quanto à duração da corrente contínua, Ballarotti et al. (2012b) apresentam a distribuição para valores iguais ou maiores do que 3 ms para 2.180 eventos ocorridos dentre 883 relâmpagos NS negativos (Figura A.3). A média aritmética vale 31 ms e a mediana 6 ms. Conforme consta na Tabela A.2, somente para os valores maiores do que 40 ms, as duas distribuições concordam. Os autores comentam valores extremos acima de 500 ms encontrados na literatura, sendo o maior 714 ms (SABA et al., 2006) e, para os dados do Vale do Paraíba, tais valores representam 0,3% dentre todos os eventos de CC ou 0,7% dos 883 raios.

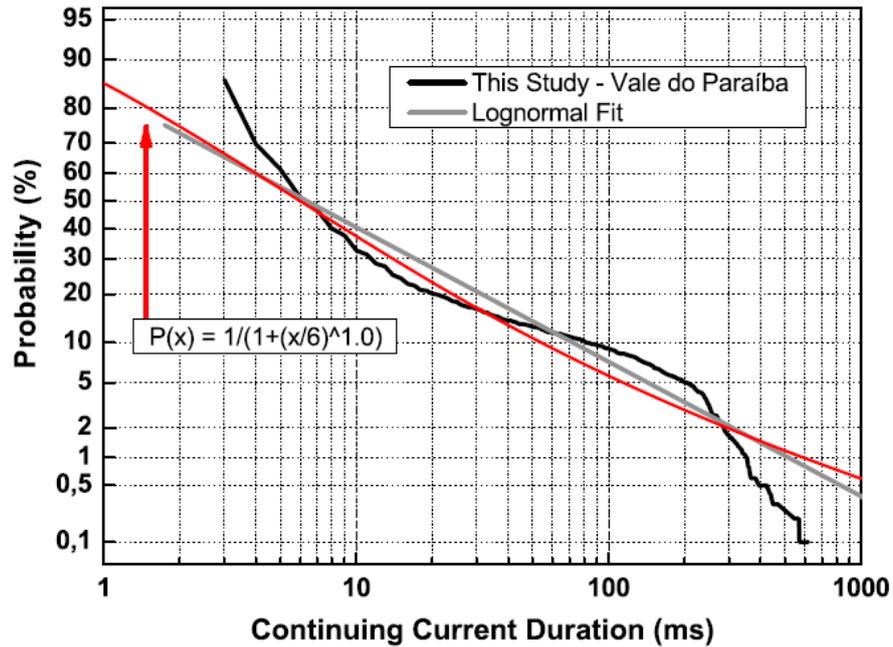


Figura A.3 – Distribuição de probabilidades da duração da corrente contínua observada no Vale do Paraíba (“this study” se refere a Ballarotti et al., 2012b), sua função aproximada  $P(x)$  e seu ajuste para uma distribuição lognormal.  
 Fonte: Ballarotti et al. (2012b).

#### A.4 Duração total do relâmpago

Quanto à duração total dos relâmpagos, a Figura A.4 mostra distribuições de probabilidade de raios múltiplos e a Figura 5 mostra a relação entre duração média e multiplicidade. Ballarotti et al. (2012b) relatam para os dados do Vale do Paraíba que a mediana da distribuição ajustada lognormal é de 300 ms e o valor máximo encontrado é de 1.430 ms para um raio de 7 descargas.

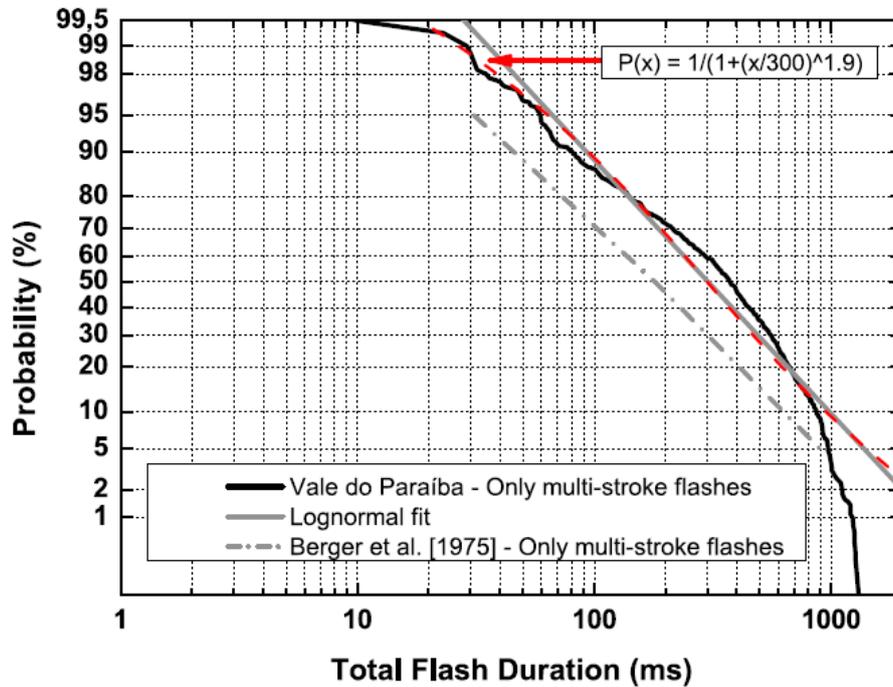


Figura A.4 – Distribuição de probabilidade da duração total dos relâmpagos com múltiplas descargas de retorno observada no Vale do Paraíba (“this study” se refere a Ballarotti et al., 2012b), sua função aproximada  $P(x)$  e seu ajuste para uma distribuição lognormal comparados com Berger et al. (1975).  
 Fonte: Ballarotti et al. (2012b).

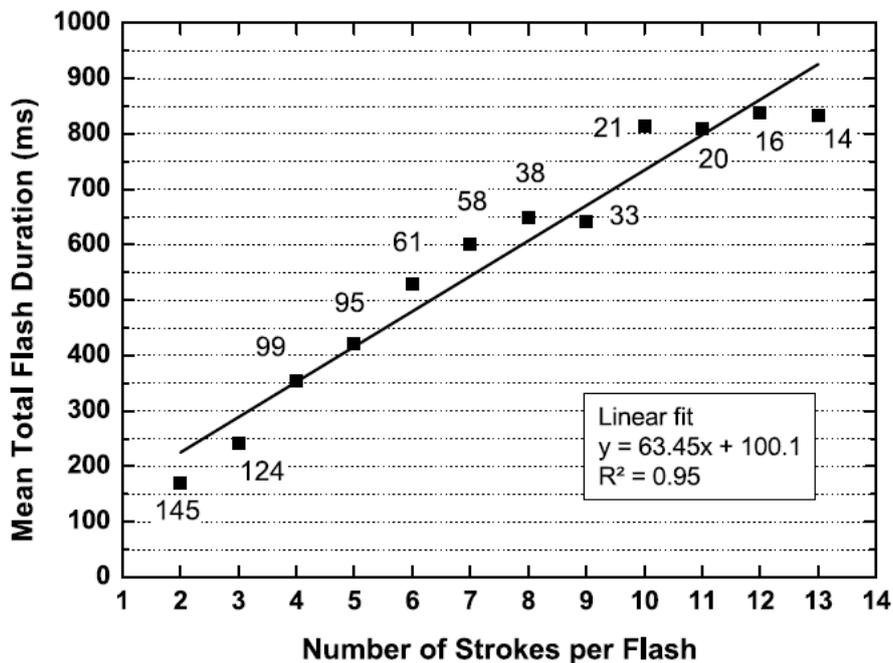


Figura A.5 – Duração total média dos relâmpagos versus o número de descargas por relâmpago para 724 raios múltiplos observados no Vale do Paraíba (SP). A quantidade de casos para cada multiplicidade e as informações do ajuste linear estão indicados.  
 Fonte: Ballarotti et al. (2012b).