



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/03.14.18.54-TDI

## LÍDERES DE RECUO EM RAIOS ASCENDENTES

Ivan Toucedo Cruz

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelo Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba, aprovada em 04 de março de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46GLSC2>>

INPE  
São José dos Campos  
2022

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)  
Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
CEP 12.227-010  
São José dos Campos - SP - Brasil  
Tel.:(012) 3208-6923/7348  
E-mail: pubtc@inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

**Membros:**

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)  
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)  
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)  
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon  
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/03.14.18.54-TDI

## LÍDERES DE RECUO EM RAIOS ASCENDENTES

Ivan Toucedo Cruz

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelo Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba, aprovada em 04 de março de 2022.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46GLSC2>>

INPE  
São José dos Campos  
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Cruz, Ivan Toucedo.

C889l Líderes de recuo em raios ascendentess / Ivan Toucedo Cruz. –  
São José dos Campos : INPE, 2022.

xxiv + 94 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/03.14.18.54-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências  
Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São  
José dos Campos, 2022.

Orientador : Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba.

1. Conexão. 2. Líder de recuo. 3. Raio ascendente. I.Título.

CDU 551.594

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**  
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

**DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE IVAN TOUCEDO CRUZ**  
**BANCA Nº 051/2022, REG 576832/2020**

No dia 04 de março de 2022, às 09h, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca Examinadora e revisão final pelo(s) orientador(es).

**Título: “Líderes de recuo em raios ascendentes”**

**Membros da banca:**

Dr. Marlos Rockenbach da Silva - Presidente - INPE

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba - Orientador - INPE

Dr. Kleber Pinheiro Naccarato - Membro Interno - INPE

Dr. Marco Antônio da Silva Ferro - Membro Externo - IAE/Ciências Atmosféricas



Documento assinado eletronicamente por **Marlos Rockenbach da Silva, Pesquisador**, em 07/03/2022, às 09:45 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Kleber Pinheiro Naccarato, Pesquisador**, em 07/03/2022, às 10:32 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marco antonio da silva ferro (E), Usuário Externo**, em 09/03/2022, às 18:31 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Magalhães Fares Saba, Pesquisador**, em 10/03/2022, às 11:39 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **9523994** e o código CRC **BC97F455**.



*“Não importa quanto a vida possa ser ruim, sempre existe algo que você pode fazer, e triunfar. Enquanto há vida, há esperança”.*

*(Stephen Hawking)*



*Dedico esse trabalho à minha família e amigos.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me abençoar, concedendo saúde, sabedoria e, principalmente, pelas oportunidades oferecidas.

Dedico meus sinceros agradecimentos ao meu orientador (Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba), pelo aprendizado e pelas discussões que auxiliaram o desenvolvimento deste trabalho.

Também agradeço aos arguidores (Dr. Marlos Rockenbach da Silva, Dr. Kleber Pinheiro Naccarato e Dr. Marco Antonio da Silva Ferro), presentes no meu exame de proposta de dissertação de mestrado, os quais contribuíram com significativas adequações para que o trabalho pudesse ser realizado.

Agradeço aos professores do curso de Geofísica Espacial e colegas de trabalho, pelo conhecimento compartilhado. A todos servidores, colaboradores e alunos, que fizeram parte do grupo de pesquisa em eletricidade atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), durante os 20 anos de pesquisas em raios no Brasil. Os dados adquiridos durante esse período possibilitaram a escrita dessa dissertação.

Também agradeço a minha família e amigos pelo apoio emocional, conselhos e incentivo. Em especial ao meu pai (José Carlos de Souza Cruz), minha mãe (Zildeti Souza Toucedo Cruz), minha irmã (Angela Toucedo Cruz Ribeiro) e meu cunhado (Rafael Henrique Cordeiro Ribeiro).

Por fim, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro durante esse período.



## RESUMO

O objetivo deste trabalho é estudar os processos de propagação dos líderes de recuo em raios ascendentes negativos. Os líderes de recuo são originados em todos os raios (ascendentes, descendentes e intranuvem), ocorrendo em canais decaídos de líderes positivos. Eles são responsáveis por alguns processos físicos, tais como: tentativa de líder; líder contínuo; líder contínuo escalonado; componente M; entre outros. Para estudar os líderes de recuo foram escolhidos os raios ascendentes negativos, pois possuem líderes positivos se propagando do solo em direção à nuvem. Diferentemente dos raios intranuvem e descendentes que possuem as ramificações dos líderes positivos dentro da nuvem; estes raios não apresentam obstrução na visualização dos líderes de recuo, facilitando as análises. Durante o desenvolvimento desta dissertação foram analisados oito casos de raios ascendentes negativos. Um dos resultados foi a visualização de líderes de recuo secundários se conectando a líderes de recuo precedentes. Por meio dessa característica foi possível compreender melhor alguns processos físicos produzidos nesses raios. Também foi observado que as propagações de líderes na nuvem impulsionam o desenvolvimento de líderes de recuo nos raios ascendentes negativos, podendo gerar conexões entre eles. Foram mostrados dois eventos inéditos de conexões de líderes de recuo com líderes positivos na nuvem, que posteriormente produziram descargas de retorno subseqüentes positivas. Por fim, foi possível visualizar em todos os casos analisados líderes de recuo apresentando um padrão característico. Eles se desenvolviam pelas bifurcações dos raios ascendentes, assumindo a forma da letra “V” do alfabeto romano. Esse padrão característico foi explicado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Palavras-chave: Conexão. Líder de recuo. Raio ascendente.



## RECOIL LEADERS IN UPWARD LIGHTNING

### ABSTRACT

The aim of this work is to study the process of propagation of the recoil leaders in negative upward lightning. The recoil leaders are originated in all lightning (upward, downward and intracloud), occurring in fallen channels of positive leaders. They are responsible for some physical processes, such as: attempt leader; dart leader; dart step leader; component M; among others. To study the recoil leaders, negative upward lightning were chosen, because they have positive leaders propagating from the ground towards the cloud. Differently from intracloud and downward lightning that have the ramifications of positive leaders within the cloud; these lightning do not present any obstruction in the visualization of the recoil leaders, facilitating the analysis. During the development of this dissertation, eight cases of negative upward lightning were analyzed. One result was the visualization of secondary recoil leaders connecting to preceding recoil leaders. Through this feature, it was possible to better understand some physical processes that occur in these lightning. It was also observed that the propagation of leaders in the cloud boost the development of recoil leaders in negative upward lightning, being able generate connections between them. Two unprecedented events of recoil leader connections with positive leader in the cloud were shown, which subsequently produced positive subsequent return stroke. Finally, it was possible to visualize, in all analyzed cases, recoil leaders presenting a characteristic pattern. They developed through the bifurcations of the upward lightning, assuming the form of the letter "V" of the roman alphabet. This characteristic pattern was explained during the development of this work.

Keywords: Connection. Recoil leader. Upward lightning.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Modelo de interação não indutiva entre partículas de graupel e cristais de gelo. ....	6
Figura 2.2 – Líder bipolar bidirecional. ....	7
Figura 2.3 – Desenvolvimento do líder bipolar bidirecional na nuvem. ....	8
Figura 2.4 – Direções de propagação do líder bipolar bidirecional.....	8
Figura 2.5 – Desenvolvimento do LP e LN. ....	9
Figura 2.6 – Pincel de <i>streamers</i> .....	10
Figura 2.7 – Ionização originada na frente da extremidade negativa do líder bipolar bidirecional. ....	11
Figura 2.8 – Caule espacial.....	12
Figura 2.9 – Caules/líderes espaciais observados em um raio descendente negativo.....	13
Figura 2.10 – Desenvolvimento da extremidade negativa do líder bipolar bidirecional. ....	14
Figura 2.11 – Raio intranuvem. ....	15
Figura 2.12 – Desenvolvimento dos raios descendentes negativos.....	16
Figura 2.13 – Raio nuvem-solo negativo.....	17
Figura 2.14 – Desenvolvimento do líder bipolar bidirecional em raios descendentes positivos. ....	18
Figura 2.15 – Raio nuvem-solo positivo. ....	18
Figura 2.16 – Raio ascendente iniciado por um IN / antes de uma descarga de retorno.....	20
Figura 2.17 – Raio ascendente gerado por um evento de corrente contínua... 21	
Figura 2.18 – Raio ascendente iniciado por uma descarga de retorno. ....	22
Figura 2.19 – Desenvolvimento do líder ascendente positivo. ....	23
Figura 2.20 – Raio ascendente negativo – UP 143. ....	24
Figura 2.21 – Desenvolvimento do líder ascendente negativo.....	24
Figura 2.22 – Raio ascendente positivo. ....	25
Figura 2.23 – Representação de LR em um raio ascendente negativo.....	27

Figura 2.24 – Fase de propagação do LR.....	28
Figura 2.25 – Líder contínuo. ....	29
Figura 2.26 – Sequência de imagens de um líder contínuo. ....	30
Figura 2.27 – Tentativa de líder.....	30
Figura 2.28 – Sequência de imagens de uma tentativa de líder.....	31
Figura 2.29 – Pulsos de corrente contínua inicial.....	32
Figura 2.30 – Sequência de imagens de uma componente M. ....	32
Figura 2.31 – Canal flutuante se originando na frente da extremidade positiva do LR.....	33
Figura 2.32 – Raio ascendente iniciado na torre de Cantão, na China. ....	34
Figura 2.33 – Canal flutuante originado na frente da extremidade positiva de um LR.....	34
Figura 2.34 – Classificação dos canais flutuantes originados próximos a LR – Wu et al. (2019).....	35
Figura 3.1 – Equipamentos a 27 m da torre T <sub>1</sub> no pico do Jaraguá. ....	39
Figura 3.2 – Bases de observação.....	40
Figura 3.3 – Câmeras de alta velocidade.....	41
Figura 3.4 – Representação da captação de dados do campo elétrico “rápido”. .....	43
Figura 4.1 – Raio ascendente – UP 44. ....	45
Figura 4.2 – Conexão de LRS na parte positiva de um LR precedente. ....	46
Figura 4.3 – Campo elétrico (raio ascendente negativo – UP 154). ....	48
Figura 4.4 – Raio ascendente – UP 154. ....	51
Figura 4.5 – Conexão de LRS no LR precedente (raio ascendente – UP 154).52	
Figura 4.6 – Raio ascendente – UP 166. ....	55
Figura 4.7 – Pulso de corrente contínua inicial (raio ascendente negativo – UP 166). ....	56
Figura 4.8 – Raio ascendente negativo – UP 67. ....	58
Figura 4.9 – LR gerado por um líder negativo na nuvem (raio ascendente negativo – UP 67). ....	59
Figura 4.10 – Variações do campo elétrico geradas por um líder escalonado. 60	
Figura 4.11 – Campo elétrico do raio ascendente negativo – UP 67. ....	61

Figura 4.12 – LR originado por um líder negativo na nuvem.....	62
Figura 4.13 – LR gerado por um líder positivo na nuvem (raio ascendente negativo – UP 68).....	63
Figura 4.14 – LR gerado por um líder positivo na nuvem (raio ascendente negativo – UP 68).....	63
Figura 4.15 – LR gerado por um líder positivo na nuvem.....	64
Figura 4.16 – LR se conectando com líder positivo na nuvem (raio – UP 44)..	67
Figura 4.17 – Raio ascendente – UP 76. ....	69
Figura 4.18 – LR se conectando com líder positivo na nuvem (raio – UP 76)..	70
Figura 4.19 – LR se propagando pelas bifurcações de raios ascendentes negativos.....	72
Figura 4.20 – LR prévios aquecendo e reionizando os canais do líder ascendente positivo.....	73
Figura 4.21 – Imagem ampliada de um canal decaído de um líder ascendente positivo. ....	74
Figura 4.22 – LR prévios originando um LR do tipo “V” (raio – UP 154). ....	76
Figura 4.23 – LR prévios originados antes de um LR do tipo “V” (raio – UP 76). ....	77
Figura 4.24 – Divisão da corrente do LR pela bifurcação do raio ascendente negativo – UP 68.....	78
Figura 4.25 – LR se propagando pela bifurcação do raio – UP 154.....	80
Figura 4.26 – LR iniciado na bifurcação de um líder ascendente positivo (raio – UP 68). ....	81
Figura 4.27 – Origem dos LR do tipo “V”.....	82
Figura 4.28 – Divisão da corrente de um líder ascendente positivo (pincel de <i>streamers</i> ). ....	83
Figura 4.29 – Canais com seções de áreas menores do que o canal principal (raio – UP 67). ....	84
Figura 4.30 – Base de lançamento de foguetes para raios induzidos. ....	85
Figura 4.31 – Raio induzido.....	86



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Registros das hipóteses de Wu et al. (2019) na literatura. ....	37
Tabela 4.1 – Observação das hipóteses de Wu et al. (2019) nessa pesquisa. ....	44
Tabela 4.2 – LRS cedendo energia para que o LR precedente gere líderes contínuos. ....	50
Tabela 4.3 – LRS reenergizando os LR precedentes para origem de pulsos de corrente contínua inicial. ....	54
Tabela 4.4 – LRS cedendo energia para que os LR precedentes gerem componentes M. ....	55



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ddp	Diferença de potencial elétrico
ELAT	Grupo de eletricidade atmosférica
EFM	<i>Electric Field Mill</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
ICC	<i>Initial Continuous Current</i>
IN	Intranuvem
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ips	Imagens por segundo
L <sub>1</sub>	Local de observação 1
L <sub>2</sub>	Local de observação 2
L <sub>3</sub>	Local de observação 3
L <sub>4</sub>	Local de observação 4
L <sub>5</sub>	Local de observação 5
LN	Líder negativo
LP	Líder positivo
LR	Líder de recuo
LRS	Líder de recuo secundário
NS	Nuvem-solo
NS-	Nuvem-solo negativo
NS+	Nuvem-solo positivo
SBT	Sistema brasileiro de televisão
SN	Solo-nuvem
T <sub>1</sub>	Torre 1
T <sub>2</sub>	Torre 2
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 Nuvem de tempestade.....	3
2.1.1 Modelo tripolar básico da nuvem .....	5
2.2 Líder bipolar bidirecional.....	6
2.2.1 Desenvolvimento do líder positivo .....	9
2.2.2 Desenvolvimento do líder negativo.....	11
2.3 Classificação dos raios .....	14
2.3.1 Raio intranuvem.....	14
2.3.2 Raio nuvem-solo.....	15
2.3.2.1 Raio nuvem-solo negativo .....	16
2.3.2.2 Raio nuvem-solo positivo.....	17
2.3.3 Raio solo-nuvem.....	18
2.3.3.1 Raio solo-nuvem negativo .....	23
2.3.3.2 Raio solo-nuvem positivo.....	24
2.4 Líder de recuo.....	25
2.4.1 Líder contínuo e descarga de retorno subsequente .....	29
2.4.2 Tentativa de líder .....	30
2.4.3 Pulsos de corrente contínua inicial e componente M.....	31
2.5 Conexão de canal flutuante com líder de recuo.....	33
3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA .....	38
3.1 Campanhas de aquisição de dados.....	38
3.1.1 Câmeras de vídeo de alta velocidade.....	41
3.1.2 Sensor de campo elétrico .....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1 Líderes de recuo secundários.....	44
4.1.1 Classificação dos canais flutuantes como líder de recuo .....	45
4.1.2 Influência dos líderes de recuo secundários sobre os líderes de recuo precedentes.....	47

4.1.2.1	Desenvolvimento de líderes contínuos .....	48
4.1.2.2	Desenvolvimento de pulsos de corrente contínua inicial e componentes M.....	53
4.1.3	Considerações finais (líderes de recuo secundários) .....	57
4.2	Líderes de recuo iniciados pela interação de líderes dentro da nuvem .....	57
4.2.1	Propagação de líderes negativos na nuvem.....	57
4.2.2	Propagação de líderes positivos na nuvem .....	62
4.2.3	Considerações finais (impulsão da origem de líderes recuo) .	64
4.3	Conexão de líder de recuo com líder positivo.....	65
4.3.1	Primeiro registro de descarga de retorno subsequente positiva em raios ascendentes negativos.....	66
4.3.2	Segundo registro de descarga de retorno subsequente positiva em raios ascendentes negativos.....	69
4.3.3	Considerações finais (descargas de retorno subsequentes positivas)	71
4.4	Líder de recuo do tipo “V” .....	72
4.4.1	Análise de câmera rápida .....	75
4.4.1.1	Refutação da hipótese dos líderes de recuo prévios .....	76
4.4.1.2	Divisão da corrente do líder de recuo .....	78
4.4.1.3	Líder de recuo do tipo “V” iniciado no ponto de bifurcação.....	81
4.4.2	Considerações finais (Líder de recuo do tipo “V”) .....	82
5	CONCLUSÃO .....	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91

## 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo geral estudar os processos de desenvolvimento dos líderes de recuo (LR) em raios ascendentes. A definição de LR será apresentada nas próximas seções, porém para a compreensão dos objetivos desta pesquisa, será introduzida uma breve definição sobre o assunto.

Um raio ascendente se inicia quando uma descarga líder (geralmente positiva) parte de uma estrutura alta no solo. O líder positivo (LP) traça o caminho do raio até a base da nuvem formando um canal luminoso e ionizado. Estes líderes podem dissipar-se após algumas dezenas de milissegundos ou dar origem a descargas da nuvem ao solo chamadas descargas de retorno<sup>1</sup>. Estas descargas de retorno constituem a parte mais intensa de um raio e, quando ocorrem várias, tem-se a sensação de que o raio piscou. Para que as descargas de retorno aconteçam, é necessário que ocorra um LR.

Os LR são líderes bipolares bidirecionais, originados em trechos decaídos do canal dos líderes positivos. O campo elétrico ambiente polariza a região, fazendo com que surja um canal condutor flutuante em algum trecho do que era antes um líder positivo ascendente. Em uma das suas extremidades ocorre acúmulo de cargas positivas e na outra acúmulo de cargas negativas. Assim, as extremidades de um LR podem se propagar bidirecionalmente através do canal estabelecido antes pelo líder positivo.

Os LR estão presentes em todos os tipos de raios, nos intranuvem (IN), nuvem-solo (NS) e solo-nuvem (SN)<sup>2</sup>. Para caracterizar os LR foram selecionados os raios solo-nuvem negativos ou também denominados como ascendentes negativos. Nesses raios o LR acontece no líder ascendente positivo que se propaga do solo em direção à nuvem, em uma região de grande visibilidade, facilitando as análises dos mesmos. A maioria dos raios IN e NS possuem

---

<sup>1</sup> Descarga de retorno ocorre depois que o líder toca o solo. Nos vídeos de câmeras rápidas percebe-se uma intensificação da luminosidade no canal do líder em direção à nuvem, o potencial elétrico do solo é transferido até a nuvem.

<sup>2</sup> Vide seções 2.3.1, 2.3.2 e 2.3.3.

líderes positivos ramificados dentro da nuvem, que é uma região difusa, tornando-se difícil caracterizar esse fenômeno.

Dada a importância e relevância dos LR no entendimento dos raios e a sua escassa literatura nos meios científicos, foram analisados oito raios ascendentes negativos (UP – 44, 45, 67, 68, 76, 154, 166 e 167). Esses raios foram filmados na cidade de São Paulo (Brasil), pelo grupo de eletricidade atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Nesses eventos foram observadas algumas características em comum. A partir delas será possível aprofundar o conhecimento referente à formação e ao desenvolvimento dos LR, assim como aos fenômenos iniciados por ele. O objetivo específico dessa pesquisa será observar as características em comum já detalhadas, com o intuito de compreendê-las.

Esta dissertação foi dividida em capítulos, no Capítulo 2 será feita uma revisão bibliográfica do conteúdo abordado. No Capítulo 3, serão mostrados os métodos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa. Durante o Capítulo 4, serão expostos os resultados e discussões obtidos durante o trabalho. Por fim, será apresentada a conclusão deste trabalho (Capítulo 5), sendo mostradas as contribuições realizadas pelo mesmo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo serão apresentados conceitos importantes para o entendimento do fenômeno abordado.

O termo raio neste trabalho será definido como a descarga elétrica atmosférica gerada pela intensificação do campo elétrico nas nuvens de tempestade. Relâmpago será definido como a atividade luminosa que acompanha as descargas elétricas atmosféricas. E trovão será definido como o som gerado pelo aquecimento abrupto do ar, durante a ocorrência do raio (INMET, 2021).

### 2.1 Nuvem de tempestade

As nuvens de tempestades se originam sob três condições: radiação solar; ar úmido; e a existência de mecanismos dinâmicos (conhecidos como forçantes, que impulsionam o ar para cima). O sol aquece a superfície terrestre e por condução a parcela de ar úmido próximo ao solo também é aquecida, começando a se expandir. A camada da atmosfera em que os fenômenos meteorológicos ocorrem está situada na troposfera. Ela possui característica de diminuição da temperatura com a altitude. À medida que a parcela de ar úmido se expande, inicia-se o processo de condensação. O vapor de água se transforma em líquido. Na mudança de fase acontecerá liberação de calor latente, tornando a parcela de ar mais quente que o ar ambiente, caracterizando-a como instável. Quando o processo de condensação cessar, a nuvem findará seu crescimento. Quanto mais umidade houver no ambiente maiores serão as nuvens de tempestades (COORAY, 2015).

O vapor de água se condensará sobre aerossóis<sup>3</sup>, que são denominados núcleos de condensação (HARRISON, 2001). Na nossa atmosfera existem diversos aerossóis, tais como: sal; poluição; materiais de plantas; entre outras. Quando o processo de condensação se inicia, as gotículas de água começam a crescer. As que se desenvolvem em núcleos de condensação com maior

---

<sup>3</sup> Suspensões de partículas sólidas e líquidas no ar atmosférico.

grau higroscópico<sup>4</sup> se originam primeiro e, posteriormente, roubam vapor de água das gotículas menores, aumentando o seu tamanho. Em seguida, elas começam a crescer por coalescência, processo de colisões entre as gotículas de água (ROGERS; YAU, 1976).

A temperatura da parcela de ar continua diminuindo com a altitude. Ao atingir valores menores que 0° Célsius, algumas minúsculas gotículas de água se congelam e formam pequenos cristais de gelo. Enquanto outras gotículas permanecem em estado líquido, denominadas gotículas super-resfriadas. Durante esse processo ocorre a formação dos graupéis que são originados pela colisão entre gotículas de água e cristais de gelo. Depois que o graupel é formado, ele continua crescendo pela absorção do vapor das gotículas que sobreviveram, tornando-se um gelo molhado. Com o aumento no tamanho do graupel, as nuvens se tornam densas e o ar que sobe passa a ter dificuldade em sustentar essas partículas no topo, começando a precipitar. A nuvem nesse estágio é denominada nuvem de tempestade madura. Nesta fase, que pode durar entre 15 e 30 minutos, é possível observar raios. Neste momento a quantidade de graupel caindo aumenta. Ao se deslocarem para baixo com o ar circundante, geram uma coluna de ar descendente, que se opõe às correntes de ar ascendentes. Quando o graupel atinge os níveis mais quentes, ele derrete, originando novamente as gotículas de água, que caem no solo como chuva. Com o aumento da precipitação ocorre a intensificação dos movimentos descendentes, sendo este o estágio final da nuvem. Nessa fase a precipitação diminui e a nuvem vaporiza-se na atmosfera. Este processo é descrito para uma única célula de tempestade podendo dar origem a novas células a partir da que se dissipa (COORAY, 2015).

---

<sup>4</sup> Capacidade de algumas substâncias absorverem água.

### **2.1.1 Modelo tripolar básico da nuvem**

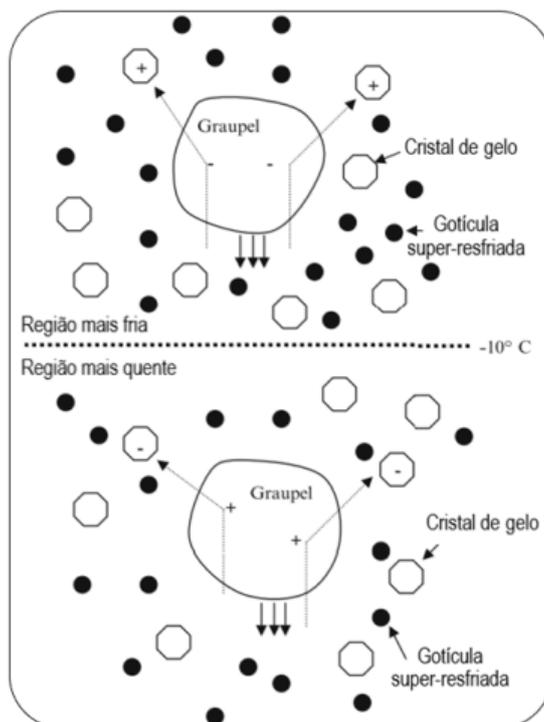
A eletrificação das nuvens de tempestades é complexa, há alguns modelos teóricos que explicam esse processo.

Embora existam muitos processos de interações entre partículas que ocorrem dentro do ambiente turbulento da nuvem de tempestade, o modelo mais aceito que os descrevem é o da interação não indutiva entre partículas de graupel e cristais de gelo (COORAY, 2015). Esse processo é caracterizado por colisões entre as partículas e a transferência seletiva de uma polaridade distinta para uma partícula maior (SAUNDERS, 1992).

Medições laboratoriais da transferência de cargas durante as colisões de cristais de gelo e graupel mostraram que os sinais das cargas transferidas dependem da temperatura ambiente e do conteúdo da água líquida local (BROOKS; SAUNDERS, 1995).

Para temperaturas abaixo de aproximadamente  $-15$  a  $-10^{\circ}$  C, as partículas de graupel, durante as colisões com os cristais de gelo, recebem cargas negativas. Em temperaturas mais altas, elas perdem cargas negativas. Assim, as colisões que ocorrem em regiões mais altas da nuvem (regiões mais frias) deixarão os graupéis carregados negativamente e os cristais de gelo carregados positivamente. Pela ação da gravidade os graupéis se movimentarão para baixo, se concentrando em regiões médias da nuvem, enquanto os cristais de gelo se acumularão próximo ao topo da nuvem. Para as regiões mais baixas os graupéis ficarão carregados positivamente e os cristais de gelo carregados negativamente. Pela ação da gravidade os graupéis tendem a se direcionar para à base da nuvem e os cristais de gelo serão arrastados para próximo do centro da nuvem. Desta forma, é possível encontrar na nuvem três centros de cargas. Próximo ao topo haverá concentração de cristais de gelos carregados positivamente. Na região central da nuvem o graupel se junta com cristais de gelo formando o centro de cargas negativas. Próximo à base da nuvem os graupéis formarão um centro de cargas positivas menor (COORAY, 2015).

Figura 2.1 – Modelo de interação não indutiva entre partículas de graupel e cristais de gelo.



A parte superior da imagem mostra uma região mais próxima ao topo da nuvem (região mais fria), nela os graupéis recebem cargas negativas nas colisões com cristais de gelo. Enquanto a parte inferior da imagem mostra uma região mais próxima à base da nuvem (região mais quente), nela os graupéis perdem cargas negativas para os cristais de gelo.

Fonte: Adaptado de Cooray (2015).

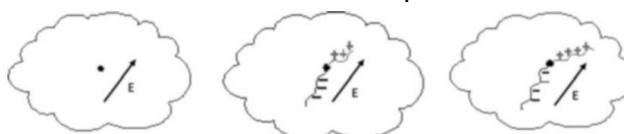
## 2.2 Líder bipolar bidirecional

Todos os raios são originados por um líder bipolar bidirecional, sendo o conceito de líder bidirecional concebido por Heinz Kazemir em 1950 (KASEMIR, 1950). Anteriormente o processo de propagação e iniciação dos raios era explicado por meio de um líder unipolar e unidirecional, que seria um canal de plasma auto-propagante que se desenvolve em uma única direção e polaridade, partindo das bordas de um dos centros de cargas na nuvem. Kazemir percebeu que essa explicação apresentava divergência em relação às leis da Física, e propôs uma nova teoria, segundo a qual os raios se iniciavam por meio de um líder bipolar bidirecional, com carga líquida igual a zero. Em 1989, Mazur conseguiu observar um líder bipolar bidirecional induzido em uma aeronave, comprovando a teoria proposta por Kazemir (MAZUR, 1989). No



Cargas negativas são acumuladas em uma das extremidades do líder bipolar bidirecional, originando a propagação de um líder negativo (LN) e na outra ponta cargas positivas são acumuladas, iniciando o desenvolvimento de um líder positivo. Por esse motivo ele é denominado como líder bidirecional, possui duas direções de propagação, e bipolar, pois são constituídos por acúmulos de cargas de sinais opostos. A Figura 2.3 mostra o desenvolvimento do líder bipolar bidirecional na nuvem.

Figura 2.3 – Desenvolvimento do líder bipolar bidirecional na nuvem.

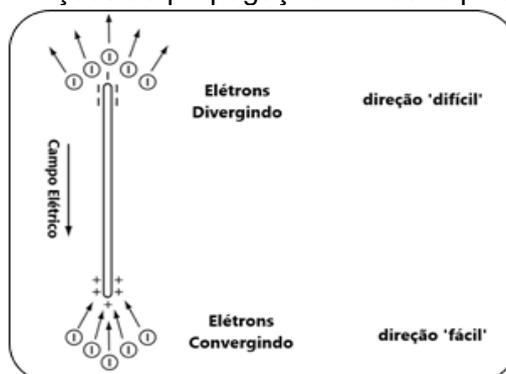


O ponto central na nuvem indica a região de iniciação do líder bipolar bidirecional. Depois que o campo elétrico se intensifica ocorre a quebra de rigidez dielétrica do ar. Em seguida, as extremidades positiva e negativa do líder começam a se desenvolver.

Fonte: Cooray (2015).

As partes positiva e negativa do líder bipolar bidirecional possuem dois tipos de propagação, uma denominada direção difícil e outra como fácil. A extremidade positiva possui direção de propagação fácil e a negativa direção de propagação difícil (Figura 2.4) (WILLIAMS, 2006).

Figura 2.4 – Direções de propagação do líder bipolar bidirecional.



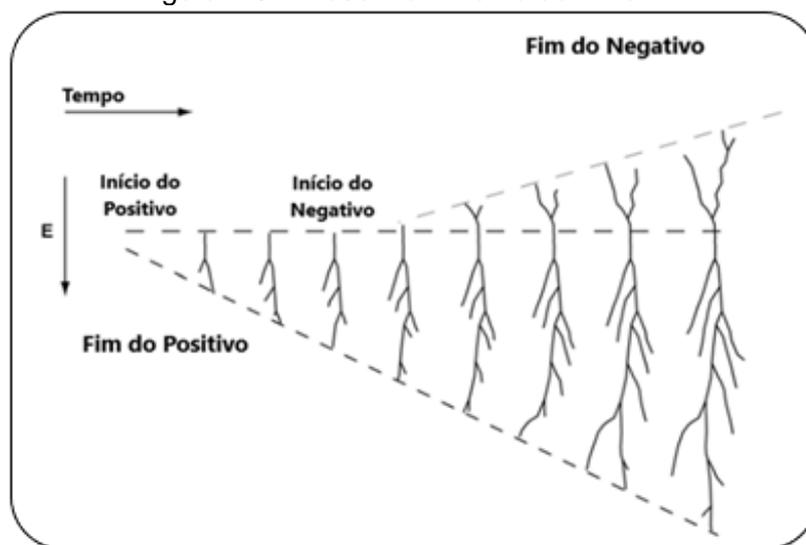
O filamento à esquerda na imagem representa o líder bipolar bidirecional. Na parte superior (extremidade negativa) é possível observar os elétrons divergindo. Enquanto na inferior (extremidade positiva) os elétrons convergem em direção a extremidade positiva.

Fonte: Adaptado de Williams (2006).

### 2.2.1 Desenvolvimento do líder positivo

A iniciação do líder positivo é mais fácil já que os elétrons nessa extremidade convergem em direção a um campo elétrico crescente ao se propagarem em direção às cargas positivas acumuladas na ponta do líder. Assim sendo, os líderes positivos iniciarão sua propagação antes do líder negativo (Figura 2.5).

Figura 2.5 – Desenvolvimento do LP e LN.



A linha tracejada horizontal na imagem delimita a região de origem do líder bipolar bidirecional. Nela é possível observar que a extremidade positiva se inicia antes da negativa e somente depois de um tempo a parte negativa se desenvolve.

Fonte: Adaptado de Williams (2006).

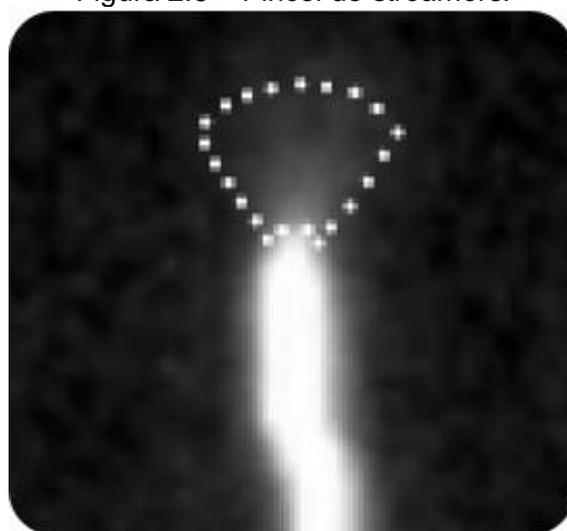
As cargas positivas acumuladas na extremidade positiva do líder bipolar bidirecional intensificam o campo elétrico na região que, chegando a um valor crítico, iniciam o processo de ionização. A força elétrica faz com que os elétrons arrancados dos átomos na frente da extremidade positiva do líder bipolar bidirecional, passem a se propagar em sua direção, ganhando energia cinética com sua aproximação (COORAY, 2015).

Quando as cargas negativas chegam à extremidade positiva, elas transferem toda sua energia cinética. Em seguida, as cargas negativas são direcionadas para a extremidade oposta do líder bipolar bidirecional, pela ação do campo

elétrico. Essa energia transferida aumenta a agitação térmica das partículas na extremidade positiva, gerando mais ionização. Portanto, na frente da extremidade positiva se encontra uma região com grande concentração de cargas positivas, com fluxo de elétrons se propagando em sua direção. Esse fluxo produz corrente na ordem de mA que não é capaz de aquecer o plasma. Essa descarga na frente do líder é definida como *streamer*<sup>6</sup>, que é um pequeno filamento de plasma frio. No entanto, centenas de *streamers* partem da parte positiva do canal, formando uma ‘vassoura ou pincel de *streamers*’. A soma de todas as correntes dos *streamers* resulta em uma corrente de 1.000 A que aquece o canal. Quando a temperatura atinge um valor crítico acima de 3.700 °C o canal passa a se ionizar por processos térmicos, aumentando sua condutividade e auto-propagação, sendo denominado líder (FERRO, s.d.).

O pincel de *streamers* pode ser observado em Saba et al. (2020). A região contornada pelos pontos brancos na Figura 2.6 representa o pincel de *streamers* que é formado na frente do líder.

Figura 2.6 – Pincel de *streamers*.



Fonte: Adaptado de Saba et al. (2020).

---

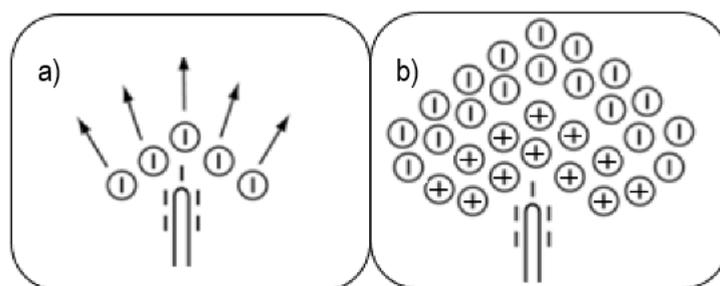
<sup>6</sup> Alguns termos ainda não existem correspondentes em português.

## 2.2.2 Desenvolvimento do líder negativo

O líder negativo inicia sua propagação um pouco depois do líder positivo.

As cargas acumuladas na extremidade negativa do líder bipolar bidirecional intensificam o campo elétrico que, ao atingir um valor crítico, inicia a ionização dos átomos à sua frente. Os elétrons são acelerados em sentido oposto à extremidade negativa, criando duas regiões com cargas espaciais positiva e negativa (Figura 2.7) (FERRO, s.d.).

Figura 2.7 – Ionização originada na frente da extremidade negativa do líder bipolar bidirecional.



A imagem a) representa os elétrons sendo divergidos na frente da extremidade negativa do líder bipolar bidirecional. Em b) é mostrado duas regiões de cargas espaciais (positiva e negativa) geradas pelo processo anterior.

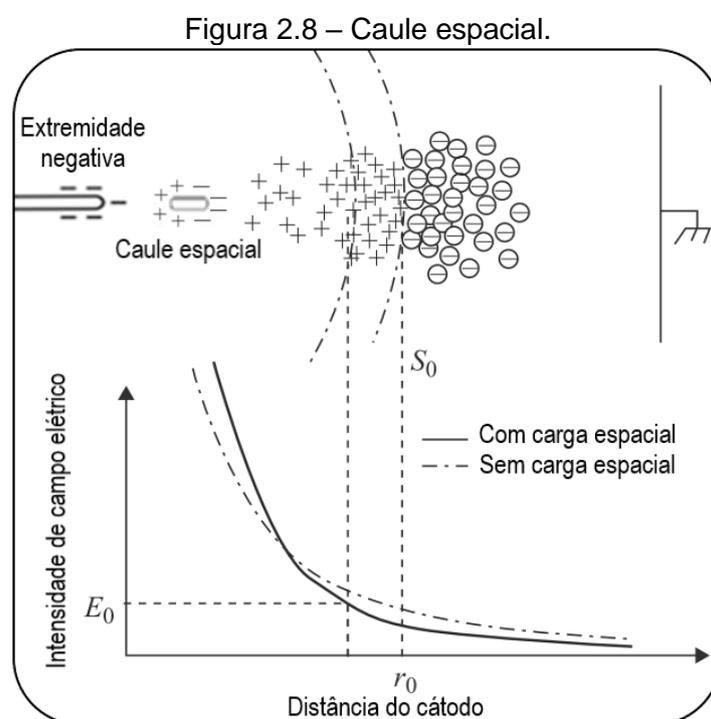
Fonte: Produção do autor.

Em a) os elétrons são divergidos, portanto a carga espacial nessa região será positiva. Posteriormente, alguns átomos com eletroafinidade capturam esses elétrons, criando uma região com carga espacial negativa, como é mostrado em b).

Esse processo não contribui com o surgimento dos *streamers* negativos, pois a densidade de elétrons próximos à extremidade negativa não é suficiente para iniciá-los. Porém, como foi visto na seção anterior, a ionização gerada pela extremidade positiva do líder bipolar bidirecional influencia o desenvolvimento da extremidade negativa. As cargas negativas geradas nesse processo são direcionadas à extremidade oposta do líder bipolar bidirecional, pela ação do campo elétrico ambiente. Esse processo proporciona densidade de cargas

suficiente para a iniciação dos *streamers* negativos na extremidade negativa do líder bipolar bidirecional (FERRO, s.d.).

Como consequência da disposição das cargas espaciais na frente da extremidade negativa, ocorrerá a intensificação do campo elétrico que permitirá a formação de um canal de plasma polarizado. Ele se desenvolverá da mesma forma que o líder bipolar bidirecional, sendo denominado como caule espacial (Figura 2.8) (COORAY, 2014).



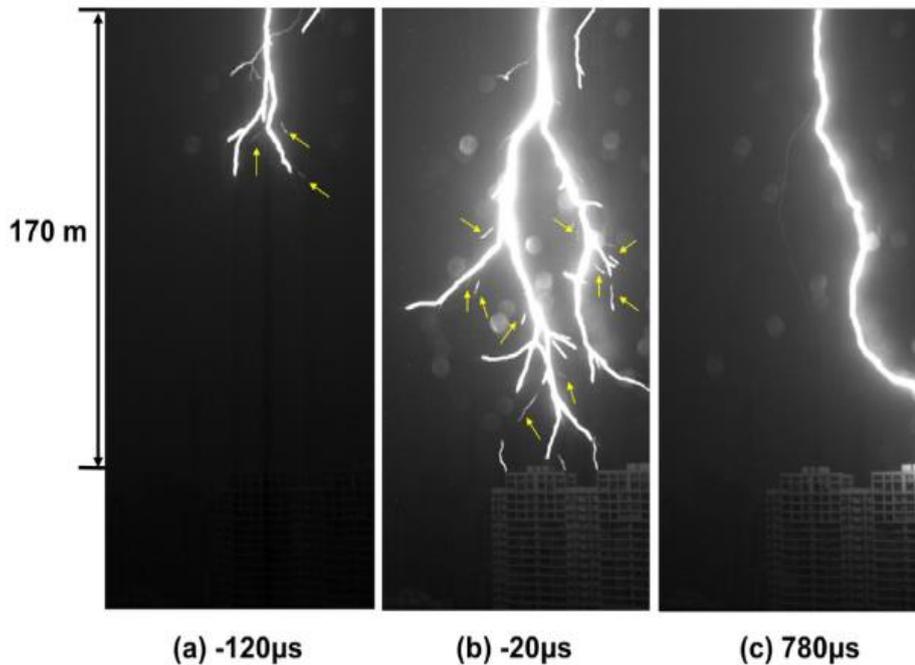
O filamento à esquerda na parte superior da imagem representa a extremidade negativa do líder bipolar bidirecional. As regiões de cargas espaciais (positivas e negativas) são representadas na frente do filamento. Depois que ocorre a intensificação do campo elétrico um canal condutor flutuante (caule espacial) surge nessa região de cargas espaciais. O gráfico na parte inferior da imagem mostra a intensidade do campo elétrico com e sem as cargas espaciais na frente da extremidade negativa do líder bipolar bidirecional.

Fonte: Adaptado de Cooray (2014).

Em uma das extremidades ocorrem acúmulos de cargas negativas e na outra positivas. A extremidade positiva inicia o seu desenvolvimento, enquanto a negativa se mantém estagnada. *Streamers* positivos se originam do caule espacial e correntes começam a fluir, aquecendo e alongando-o, dando origem

ao líder espacial (FERRO, s.d.). A Figura 2.9 mostra o desenvolvimento de um líder negativo, nela é possível observar caules/líderes espaciais. Na última imagem o líder toca o prédio, gerando uma descarga de retorno (QI et al., 2016).

Figura 2.9 – Caules/líderes espaciais observados em um raio descendente negativo.

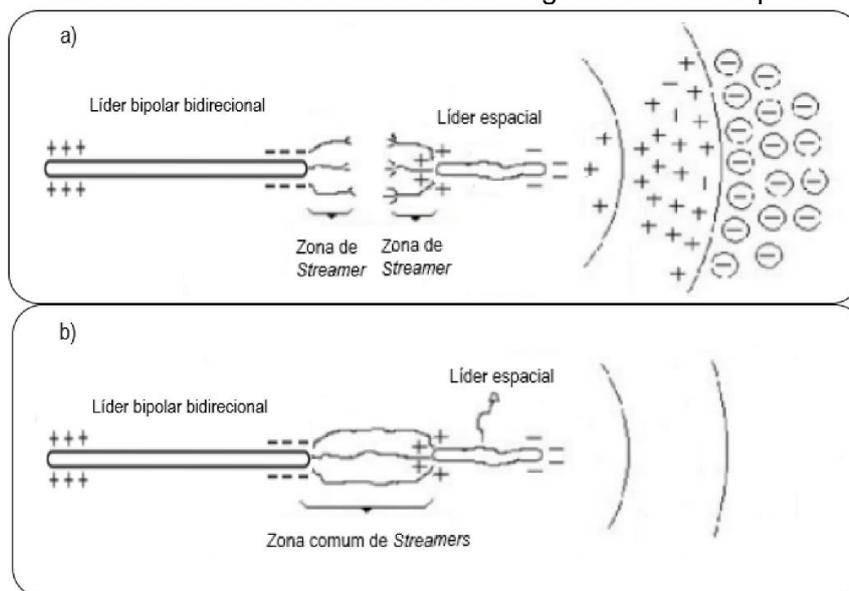


A imagem a) representa o desenvolvimento de um líder negativo se propagando em direção ao solo. As setas amarelas representam a formação de caules/líderes espaciais durante o desenvolvimento do líder negativo. Em c) o líder se conecta ao prédio, gerando uma descarga de retorno.

Fonte: Qi et al. (2016).

Os *streamers* positivos do líder espacial se propagam em direção à extremidade negativa do líder bipolar bidirecional e os *streamers* negativos do líder bipolar bidirecional se movem em direção ao líder espacial (Figura 2.10 a). Esses *streamers* se conectam, formando uma zona comum de *streamers* (Figura 2.10 b). O potencial negativo do líder bipolar bidirecional é transferido para a parte negativa do líder espacial, gerando um pulso de corrente. Essa sequência de eventos faz com que o líder negativo se mova de maneira escalonada (RAKOV; TRAN, 2019).

Figura 2.10 – Desenvolvimento da extremidade negativa do líder bipolar bidirecional.



A imagem a) representa o desenvolvimento da extremidade positiva do líder espacial em direção à extremidade negativa do líder bipolar bidirecional. Em b) os *streamers* de ambos os líderes se conectam e o potencial elétrico da parte negativa do líder bipolar bidirecional é transferido para a extremidade negativa do líder espacial.

Fonte: Adaptado de Ferro (s.d.).

## 2.3 Classificação dos raios

Os raios são classificados de acordo com a região de sua ocorrência, os que não tocam o solo são denominados intranuvem e os que envolvem o solo são identificados como nuvem-solo ou solo-nuvem (OGAWA, 1995).

### 2.3.1 Raio intranuvem

Cerca de 80 a 90% dos raios estabelecem contato com o solo (RAKOV; UMAN, 2003).

A maior parte dos raios IN não são visíveis, pois ocorrem dentro da nuvem de tempestade. Uma nuvem de tempestade é composta por gotículas de água, cristais de gelo e graupel. Portanto, boa parte da luminosidade incidida nestas partículas é refletida, tornando-se difícil a visualização desses raios. Normalmente, observa-se apenas intensificações da luminosidade dentro das nuvens, que nesse trabalho é denominado como relâmpago.

Os raios IN são originados por um líder bipolar bidirecional. Nas suas extremidades originam-se um líder positivo que se propaga em direção ao centro de cargas negativas e um líder negativo que se direciona ao centro de cargas positivas. Em alguns casos os raios IN são visíveis, ocorrendo próximos à base da nuvem. Os líderes se propagam para fora na horizontal, como no exemplo da Figura 2.11.

Figura 2.11 – Raio intranuvem.



Fonte: INPE (2015).

### 2.3.2 Raio nuvem-solo

Os raios que estabelecem contato com o solo ocorrem com menor frequência. No entanto essas descargas oferecem riscos para estruturas e pessoas, por essa razão, existem muitos trabalhos no meio acadêmico sobre esse assunto e poucos sobre os IN.

Os raios NS, também denominados como descendentes, são originados por um líder bipolar bidirecional entre dois centros de cargas no interior da nuvem. Uma das extremidades do líder bipolar bidirecional se propaga em direção ao solo e a outra em direção ao centro de cargas de polaridade oposta ao do líder.

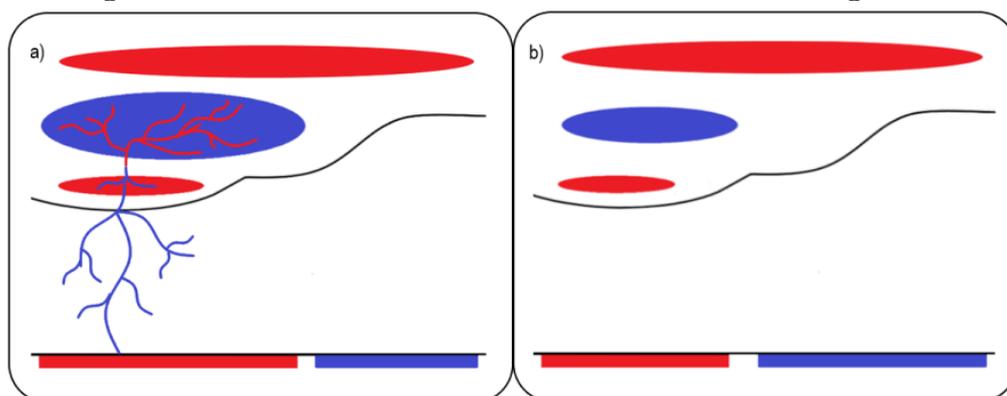
Os raios descendentes são caracterizados de acordo com sua polaridade, sendo classificados como raios nuvem-solo positivos (NS+) ou raios nuvem-

solo negativos (NS-). A polaridade de um raio é definida de acordo com a carga líquida transferida para o solo.

### 2.3.2.1 Raio nuvem-solo negativo

O raio NS- é iniciado por um líder bipolar bidirecional dentro da nuvem, entre o centro menor de cargas positivas, localizado mais próximo à base da nuvem, e o centro de cargas negativas logo acima. A Figura 2.12 mostra um esquema do desenvolvimento do líder bipolar bidirecional em raios descendentes negativos e as cargas negativas neutralizadas dentro da nuvem (modelo tripolar básico).

Figura 2.12 – Desenvolvimento dos raios descendentes negativos.



A imagem a) mostra o desenvolvimento de um raio NS-. As cores azuis estão associadas com cargas negativas e as cores vermelhas com cargas positivas. As elipses representam os três centros de cargas da nuvem. Os retângulos na parte inferior mostram as cargas induzidas no solo. Por fim, as ramificações indicam o desenvolvimento das extremidades do líder bipolar bidirecional. Depois de um tempo o canal do raio decai e em b) é possível observar a diminuição dos centros de cargas da nuvem.

Fonte: Produção do autor.

O centro de cargas negativas é representado pela elipse central de cor azul e os centros de cargas positivas pelas elipses vermelhas. No solo há concentração de cargas por indução, a cor azul representa cargas negativas induzidas e a vermelha cargas positivas.

Em a) é possível observar o desenvolvimento do líder positivo (ramificações em vermelho) se propagando em direção ao centro de cargas negativas. E também é possível visualizar o líder negativo (ramificações em azul) se movendo em

direção ao solo (Figura 2.13). Este tipo de raio transfere carga líquida negativa ao solo, sendo denominado como raio NS-.

Figura 2.13 – Raio nuvem-solo negativo.



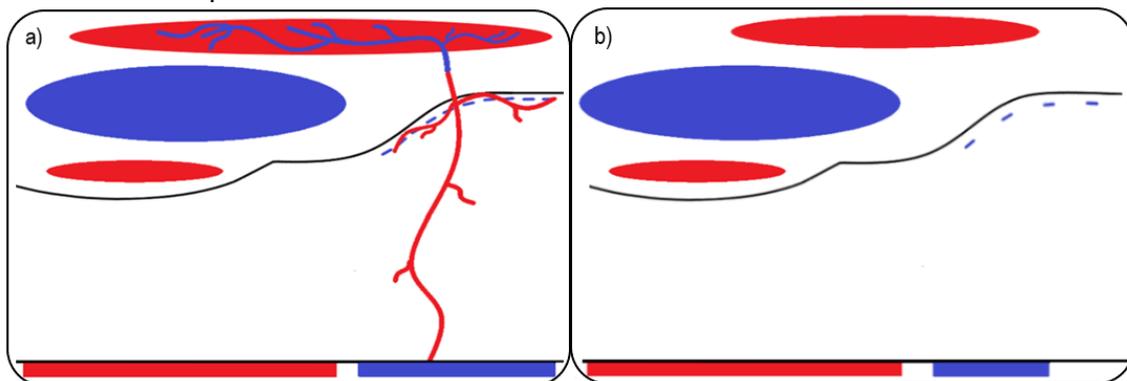
Fonte: INPE (2019).

### **2.3.2.2 Raio nuvem-solo positivo**

O raio descendente positivo é originado por um líder bipolar bidirecional. O líder positivo se propaga em direção ao solo e o líder negativo em direção ao centro de cargas positivas próximo ao topo da nuvem.

A Figura 2.14 mostra o desenvolvimento do líder bipolar bidirecional em raios descendentes positivos e as cargas positivas neutralizadas dentro da nuvem.

Figura 2.14 – Desenvolvimento do líder bipolar bidirecional em raios descendentes positivos.



A imagem a) mostra o desenvolvimento de um raio NS+. Em b) é possível visualizar a diminuição do centro de cargas positivas da nuvem (elipse superior vermelha).

Fonte: Produção do autor.

Neste raio observa-se transferência líquida de cargas positivas ao solo, caracterizando-o como raio NS+ (Figura 2.15).

Figura 2.15 – Raio nuvem-solo positivo.



Fonte: INPE (2018).

### 2.3.3 Raio solo-nuvem

Os estudos sobre raios solo-nuvem ou ascendentes se iniciaram na década de 30. O primeiro registro fotográfico foi obtido por McEachron em 1939, no edifício *Empire State* (EUA). Esses raios se originam de estruturas altas, depois

que o campo elétrico nas suas extremidades ultrapassa um nível crítico (HEIDLER; MANHARDT; STIMPER, 2013 e SCHUMANN et al., 2019).

Estruturas maiores de 60 metros são consideradas altas pelas normas de proteção contra descargas atmosféricas (IEC 62305). Embora esses raios sejam considerados raros em relação aos demais, nos últimos anos houve um aumento nas construções de edifícios altos, na instalação de torres de geradores eólicos e de telecomunicações em regiões elevadas, aumentando assim a ocorrência de raios ascendentes (SCHUMANN, 2016).

Estudar os raios ascendentes é de suma importância já que os padrões de proteção contra descargas atmosféricas são baseados nos raios descendentes, podendo haver padrões de riscos exclusivos a essa categoria que não estão incluídos nas normas de proteções (ALBRECHT; SABA; SOUZA, 2015).

Sabe-se que os raios ascendentes podem ser iniciados de duas maneiras: produzidos espontaneamente ou por meio de uma descarga precedente. Os raios ascendentes originados espontaneamente são denominados raios ascendentes autoiniciados. Para que esses raios se propaguem é necessário que as nuvens tenham uma intensificação no campo elétrico que ultrapasse um nível crítico. Todavia, os raios ascendentes autoiniciados são considerados raros. A segunda forma de iniciação dos raios ascendentes é por meio de uma descarga precedente, denominada descarga matriz. Ela produz intensificação do campo elétrico na região da estrutura. A descarga matriz pode ser gerada por raios intranuvem ou raios nuvem-solo (SCHUMANN et al., 2019).

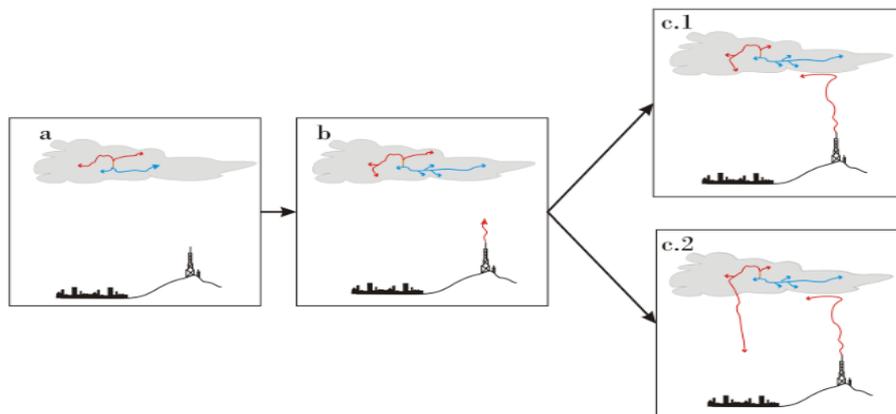
O mecanismo de iniciação de um líder ascendente por meio de uma descarga matriz pode ocorrer de quatro maneiras. Os líderes ascendentes podem se originar:

1. Durante um raio IN;
2. Antes da descarga de retorno de um raio NS;

3. Durante a ocorrência de um evento com corrente contínua<sup>7</sup>;
4. Ou no decorrer de uma descarga de retorno.

A Figura 2.16 exibe um raio ascendente iniciado pelos dois primeiros tópicos mencionados anteriormente. Para esses casos foi mostrado o desenvolvimento do líder ascendente positivo na torre.

Figura 2.16 – Raio ascendente iniciado por um IN / antes de uma descarga de retorno.



A imagem acima mostra que um raio ascendente pode ser induzido no solo por duas situações. Por um raio intranuvem (imagem c.1) ou antes de ocorrer uma descarga de retorno (imagem c.2).

Fonte: Schumann et al. (2019).

Em a) um líder bipolar bidirecional é iniciado dentro da nuvem de tempestade. O líder negativo (em azul) se propaga em direção ao centro de cargas positivas próximo à base da nuvem. E o líder positivo (em vermelho) em direção ao centro de cargas negativas (região central da nuvem).

Em b) os líderes continuam se desenvolvendo pelos centros de cargas. A partir de b) surgem duas situações possíveis para a origem de descargas matrizes. A primeira situação é mostrada na imagem c.1); nela o líder positivo não se propaga em direção ao solo. O líder negativo continua se movendo na

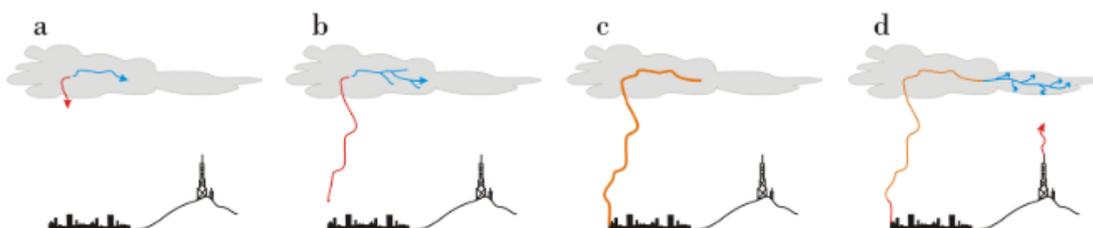
---

<sup>7</sup> Quando o canal do raio permanece iluminado por mais de três milissegundos, tem-se a presença de corrente contínua, que pode ser muito curta, curta ou longa (BALLAROTTI; SABA; PINTO Jr, 2005).

horizontal pelo centro de cargas positivas. Esse líder intensifica o campo elétrico na região da estrutura, que ultrapassa o nível crítico, proporcionando condições ideais para o surgimento do líder ascendente na torre.

A segunda situação é mostrada em c.2); nela o líder positivo passa a se propagar em direção ao solo. O líder negativo propaga-se em direção à torre pelo centro de cargas positivas. Semelhante ao caso anterior, o líder dentro da nuvem intensifica o campo elétrico na torre, que origina o raio ascendente antes que o líder positivo toque o solo. A Figura 2.17 mostra um líder ascendente iniciado por meio de um evento de corrente contínua.

Figura 2.17 – Raio ascendente gerado por um evento de corrente contínua.



A imagem mostra o desenvolvimento de um raio NS+, produzindo corrente contínua. Posteriormente, a extremidade negativa do líder bipolar bidirecional (ramificação em azul) passa a se desenvolver, induzindo um raio ascendente em uma torre no solo.

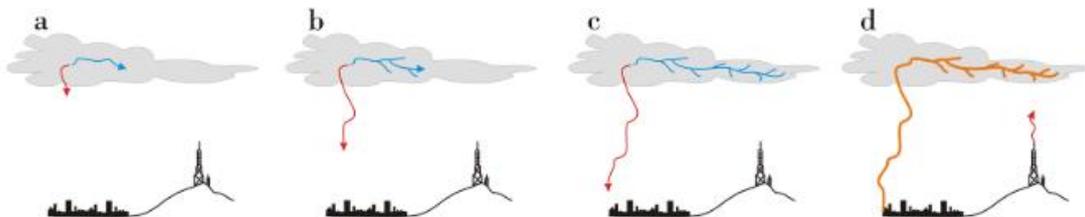
Fonte: Schumann et al. (2019).

Em a) um líder bipolar bidirecional é iniciado na nuvem. O líder negativo se propaga em direção ao centro de cargas positivas próximo à base da nuvem. E o líder positivo move-se em direção ao solo. Em b) o líder negativo continua se propagando pelo centro de cargas positivas, sem avançar muito. O líder positivo também continua em direção ao solo. Em c) o líder positivo toca o solo, desta forma caracteriza-se esse raio como NS+. Depois que o líder positivo atinge o solo ele produz uma descarga de retorno. Percebe-se que esse raio continua conectado ao solo por mais de 3 ms, caracterizando a presença de corrente contínua.

Na imagem d) é possível visualizar que o líder negativo ioniza o ar virgem, se desenvolvendo horizontalmente pelo centro de cargas positivas. Quando o líder

se desloca por cima da torre ocorre a intensificação do campo elétrico que origina o líder ascendente. Por fim, a Figura 2.18 mostra um raio ascendente iniciado por uma descarga de retorno.

Figura 2.18 – Raio ascendente iniciado por uma descarga de retorno.



A imagem mostra um raio NS+. Depois que ocorre a descarga de retorno um raio ascendente é induzido em uma torre no solo.

Fonte: Schumann et al. (2019).

Em a) um líder bipolar bidirecional é iniciado na nuvem. O líder negativo se propaga pelo centro de cargas positivas próximo à base da nuvem. Enquanto o líder positivo move-se em direção ao solo. Em b) os líderes continuam se desenvolvendo. Em c) o líder positivo ainda não tocou o solo, continuando a mover-se em sua direção. Observa-se que o líder negativo continuou se propagando pelo centro de cargas positivas, se desenvolvendo acima da torre. Porém, neste caso não houve a iniciação do líder ascendente como nos casos anteriores. O campo elétrico resultante na torre ainda não atingiu o valor limite para originar o líder ascendente.

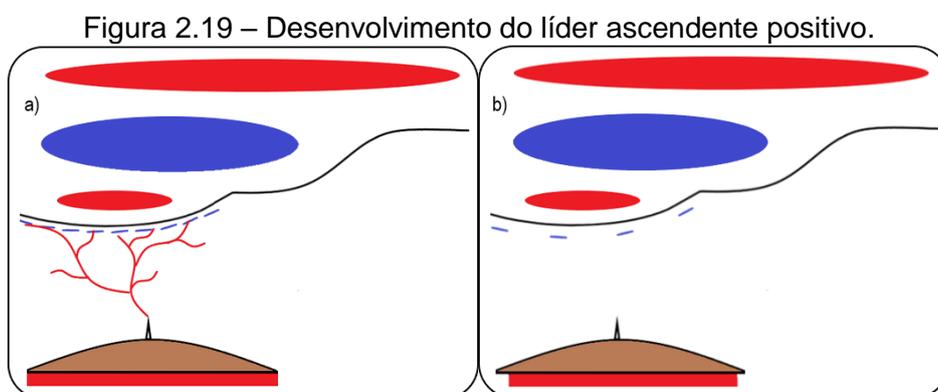
Na imagem d) ocorre a descarga de retorno (raio NS+), representada pela cor laranja (o líder positivo tocou o solo e o seu potencial elétrico foi transferido para nuvem). A descarga de retorno fornece a condição ideal para que o campo elétrico na torre atinja o valor limite, iniciando o líder ascendente. Logo, este caso representa uma descarga matriz de um raio NS+ que origina o raio ascendente através da descarga de retorno. Desta forma, para que os raios ascendentes que não são autoiniciados se originem é necessário que algum dos eventos anteriores aconteça.

O líder ascendente, após ser iniciado, pode permanecer ativo por dezenas de milissegundos. Durante esse período a corrente que percorre o canal é denominada corrente contínua inicial ou ICC (do termo em inglês *Initial Continuous Current*) é a parte mais longa do raio ascendente. Sua longa duração produz danos severos nas construções, associados a efeitos térmicos (SABA et al., 2016).

Os raios ascendentes assim como os descendentes possuem características diferentes, sendo classificados de acordo com sua polaridade. Podendo ser denominados como raios ascendentes positivos ou negativos de acordo com a carga líquida transferida ao solo.

### 2.3.3.1 Raio solo-nuvem negativo

Os raios ascendentes negativos (Figura 2.19) são originados por um líder ascendente positivo que parte de estruturas altas e propaga-se em direção à camada de blindagem (com cargas negativas) próximo à base da nuvem.



A imagem a) mostra o desenvolvimento de um raio ascendente negativo. Em b) observa-se a diminuição da camada de blindagem na base da nuvem depois que o raio decaí.

Fonte: Produção do autor.

Na primeira imagem é possível visualizar um líder ascendente iniciado em uma torre (estrutura alta). Ele é iniciado sob as condições estabelecidas na seção anterior. Houve a intensificação do campo elétrico na torre e posteriormente

surgiu o líder ascendente. Esse líder se propaga em direção às cargas de blindagem na base da nuvem. Neste caso a carga líquida transferida ao solo é negativa, caracterizando o raio como ascendente negativo (Figura 2.20).

Figura 2.20 – Raio ascendente negativo – UP 143.

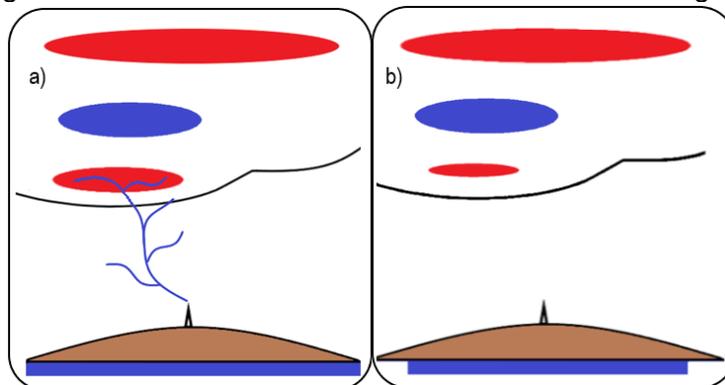


Fonte: INPE (2016).

### 2.3.3.2 Raio solo-nuvem positivo

O raio ascendente positivo é originado por um líder ascendente negativo. São iniciados em estruturas elevadas, se direcionando ao centro de cargas positivas próximo à base da nuvem.

Figura 2.21 – Desenvolvimento do líder ascendente negativo.



A imagem a) mostra o desenvolvimento de um raio ascendente positivo. Em b) visualiza-se a diminuição do centro de cargas positivas na base da nuvem, depois que o canal do raio decaí.

Fonte: Produção do autor.

No Brasil não há registro de raios ascendentes positivos. Para que esse tipo de raio se origine também é necessário ocorrer a intensificação do campo elétrico em estruturas altas.

A Figura 2.21 mostra um esquema do desenvolvimento do líder ascendente negativo iniciado pela intensificação do campo elétrico em uma torre. O líder ascendente negativo se origina e se propaga em direção ao centro de cargas positivas próximo à base da nuvem. A carga líquida transferida ao solo é positiva, denominando-o como raio ascendente positivo. A Figura 2.22 mostra um raio ascendente positivo observado na África do Sul.

Figura 2.22 – Raio ascendente positivo.



Fonte: Schumann (2021).

#### 2.4 Líder de recuo

O LR foi identificado pela primeira vez em variações de campo elétrico, sendo denominado 'descarga-K' (MAZUR et al., 2013). Em 1964, as 'descargas-K' foram definidas como *streamers* de recuo negativos, que ocorriam como mini descargas de retorno (OGAWA; BROOK, 1964). A palavra recuo foi bem empregada para a descrição desse fenômeno, porém a utilização da palavra

*streamers* não correspondia ao caráter físico da descarga, sendo reescrita como LR por Mazur em 2002 (MAZUR, 2016). *Streamer* é caracterizado como filamentos de plasma frio com comprimento de alguns metros. Enquanto líder é descrito como um canal de plasma quente auto-propagante (MAZUR, 2002).

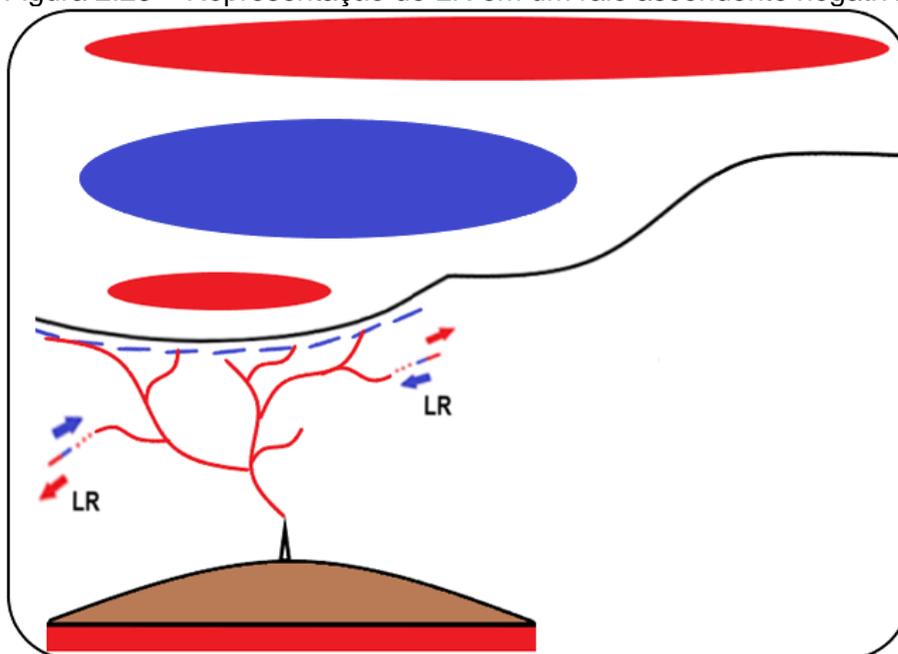
Os LR surgem nos canais decaídos do líder positivo, reconstruindo parcialmente ou integralmente esses canais. Essas características foram observadas com a ajuda de câmeras de alta velocidade. Inicialmente os LR eram considerados líderes unipolares unidirecionais formados por acúmulos de cargas negativas. Atualmente sabe-se que os LR são canais condutores flutuantes em cuja extremidades há polaridades opostas. Devem, portanto, ser definidos como líderes bipolares bidirecionais (MAZUR et al., 2013).

Um modelo da formação dos LR foi proposto por Mazur (MAZUR; RUHNKE, 1993). A essência do modelo é baseada no decaimento e interrupção do canal do líder positivo. Esse decaimento ocorre em função da relação inversa entre a resistência do canal e a corrente que flui por ele (HECKMAN, 1992).

O canal do raio pode ser classificado como instável ou estável. Os canais instáveis possuem extensão longa e corrente de pouca intensidade. Já os canais estáveis possuem comprimento curto e apresentam corrente intensa. Quando o comprimento do canal aumenta, ocorre variação na sua condutividade e resistência. Portanto, à medida que o líder positivo se desenvolve, a resistência do canal aumenta, fazendo com que o canal passe de estável para instável, resultando em sua interrupção (FERRO, *s.d.*).

Quando o canal é interrompido, a parte desligada do líder positivo torna-se um condutor flutuante imerso em um campo elétrico ambiente que o polariza. Portanto, esse canal condutor flutuante atuará como um líder bipolar bidirecional. Haverá acúmulo de cargas negativas na extremidade próxima ao líder positivo e acúmulo de cargas positivas na outra ponta. O líder negativo se desenvolverá sobre o canal anteriormente ionizado, enquanto a parte positiva do LR se propagará na outra extremidade (MAZUR; RUHNKE, 1993). A Figura 2.23 mostra a representação de LR em um raio ascendente negativo.

Figura 2.23 – Representação de LR em um raio ascendente negativo.

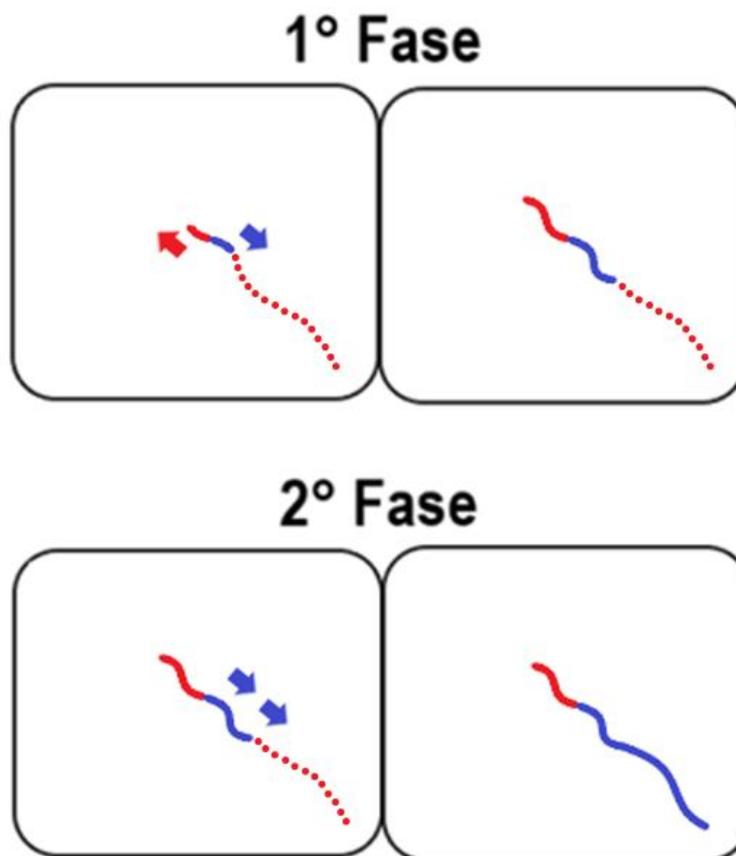


A imagem mostra dois LR se desenvolvendo em canais decaídos de líderes ascendentes positivos. O sentido de propagação da extremidade negativa do LR é representado pela seta azul e o da positiva pela vermelha.

Fonte: Produção do autor.

Na Figura 2.23 é possível observar a direção de propagação das duas extremidades do LR, em azul a parte negativa e em vermelho a positiva. Existem duas fases de propagação do LR, na primeira etapa o líder se desenvolve nas duas direções. A parte positiva está em uma região em que a diferença de potencial elétrico (ddp) é suficiente para gerar ionização do ar virgem à sua frente. Na segunda fase, o LR se desenvolve em apenas uma direção. A extremidade positiva do LR interrompe sua propagação. A ddp atinge um limite mínimo, então a ionização cessa (MAZUR et al., 2013). A Figura 2.24 mostra as fases de propagação de um LR.

Figura 2.24 – Fase de propagação do LR.



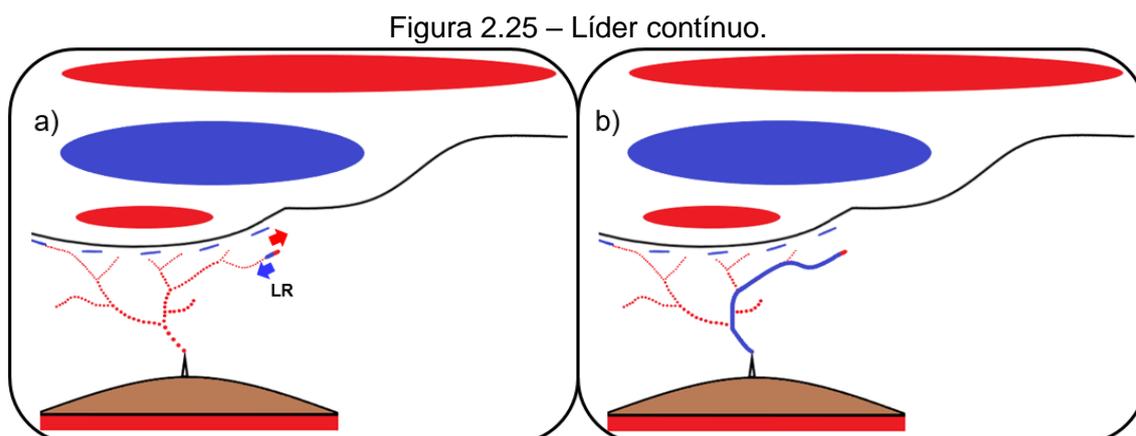
A imagem mostra o desenvolvimento de um LR pelo canal decaído de um líder positivo (traço pontilhado vermelho). Na primeira fase ambas as extremidades do LR se propagam. Em seguida, a extremidade positiva (representada pela cor vermelha) cessa seu desenvolvimento, enquanto a negativa (cor azul) continua se propagando.

Fonte: Produção do autor.

A extremidade negativa do LR é representada pela cor azul e a positiva pela vermelha. Os pontos em vermelho representam o canal decaído do líder positivo. Com a propagação dos LR pelos canais de um raio ascendente negativo iniciam-se alguns processos físicos, como: líder contínuo; descarga de retorno subsequentes; tentativas de líderes; pulsos de corrente contínua inicial e componente M.

### 2.4.1 Líder contínuo e descarga de retorno subsequente

Os LR são originados quando os canais dos raios ascendentes negativos decaem. Alguns desses líderes percorrem esses ramos atingindo o solo no mesmo ponto de iniciação do líder ascendente positivo, processo denominado de líder contínuo. Em seguida, ocorre uma rápida intensificação da luminosidade em direção a nuvem, evento caracterizado como descarga de retorno subsequente. O número de descargas de retorno subsequente que ocorrem após os líderes ascendentes decaírem é denominado como multiplicidade (SABA et al., 2016). A Figura 2.25 a) mostra o canal do líder decaído (pontos em vermelho) e a origem de um LR que refaz todo o canal, desenvolvendo um líder contínuo (Figura 2.25 b).

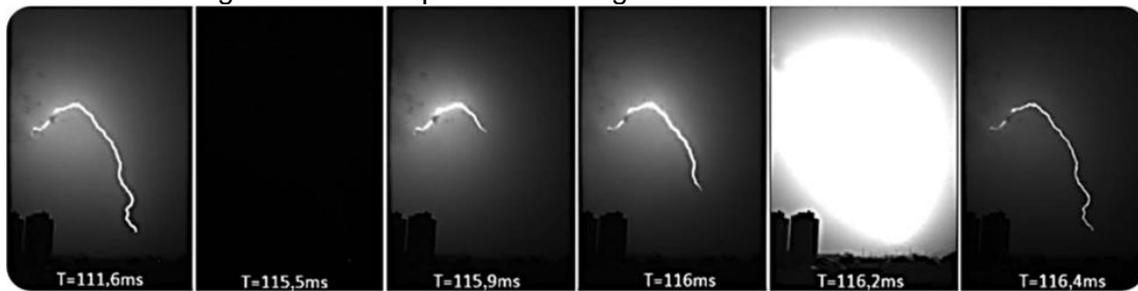


A imagem a) representa um raio ascendente decaído (pontos vermelhos). Em um dos ramos decaídos surge um LR que refaz o canal principal do raio e atinge a torre no seu ponto de iniciação (imagem b). Esse processo é descrito como líder contínuo.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 2.26 mostra uma sequência de imagens que representam um líder contínuo. No primeiro quadro observa-se o canal do líder ascendente positivo ( $T = 111,6$  ms). Em seguida, essa corrente cessa completamente ( $T = 115,5$  ms) e surge um LR nesse canal ( $T = 115,9$  ms), atingindo o mesmo ponto de iniciação do raio ascendente negativo ( $T = 116,2$  ms) (SABA et al., 2016).

Figura 2.26 – Sequência de imagens de um líder contínuo.

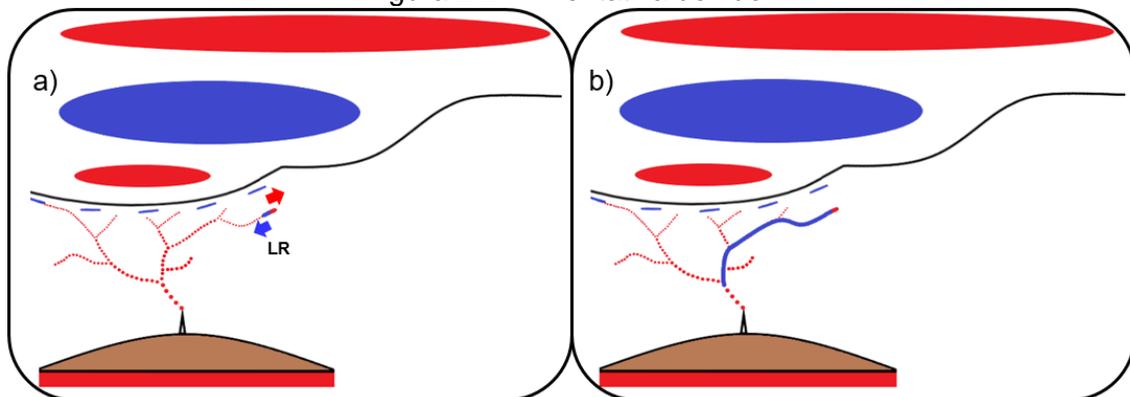


Fonte: Adaptado de Saba et al. (2016).

### 2.4.2 Tentativa de líder

As tentativas de líderes são caracterizadas como a busca pela conexão do LR com o solo. Esses líderes refazem o canal decaído do líder positivo, porém não tocam o solo. Os LR decaem antes de chegar ao solo, por não possuírem energia suficiente para reionizar completamente o canal do líder ascendente, gerando uma tentativa de líder contínuo (Figura 2.27) (SHAO et al., 1995).

Figura 2.27 – Tentativa de líder.



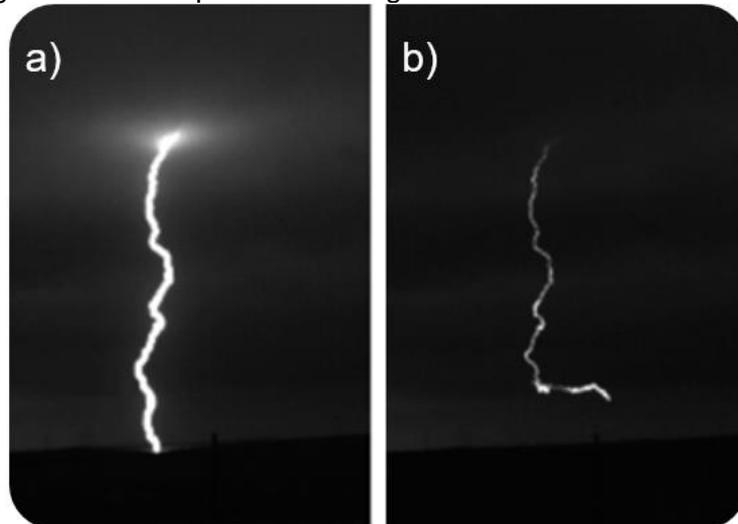
A imagem a) representa um raio ascendente decaído (pontos vermelhos). Em um dos ramos decaídos surge um LR que reioniza parte do canal principal (imagem b). Esse processo é denominado tentativa de líder.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 2.28 b) exibe uma tentativa de líder que ocorreu em um raio nuvem-solo negativo. A imagem à esquerda mostra uma descarga de retorno subsequente (Figura 2.28 a). Depois de um tempo esse líder decaí, surgindo um LR na extremidade positiva do raio nuvem-solo negativo. Ele se propaga

em direção ao solo, porém não tem energia suficiente, originando uma tentativa de líder (Figura 2.28 b) (CAMPOS, 2016).

Figura 2.28 – Sequência de imagens de uma tentativa de líder.

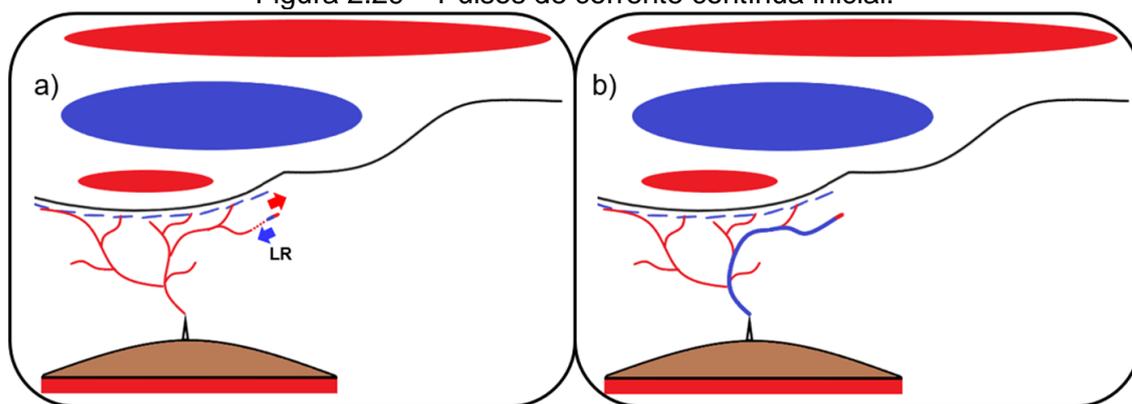


Fonte: Adaptado de Campos (2016).

#### **2.4.3 Pulsos de corrente contínua inicial e componente M**

Os pulsos de corrente contínua inicial (do inglês *initial continuous current pulses*) e componentes M são processos similares. Ambos são iniciados pela intensificação da corrente do canal principal como resultado da propagação de um LR por este canal. A intensificação da corrente pelo LR gera aquecimento do plasma, aumentando a sua luminosidade. Quando a corrente cessa, a luminosidade retorna ao seu nível anterior. A diferença entre os dois processos é que os LR nos pulsos de corrente contínua inicial são originados antes da primeira descarga de retorno subsequente, eles intensificam a corrente contínua inicial dos raios ascendentes (Figura 2.29).

Figura 2.29 – Pulsos de corrente contínua inicial.



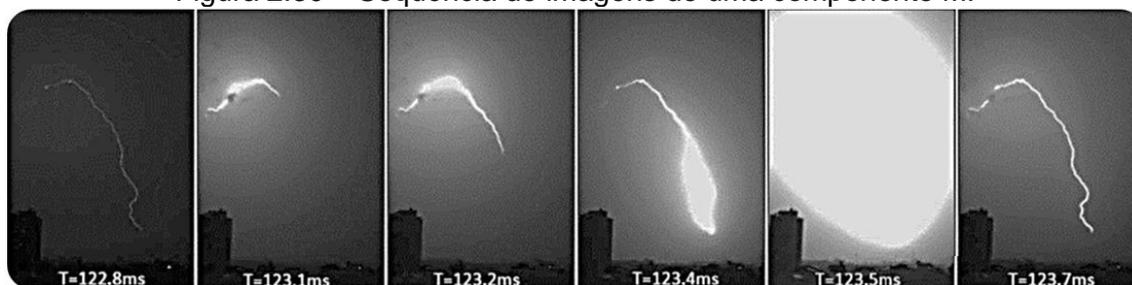
A imagem a) representa um raio ascendente ativo. Em um dos ramos decaídos surge um LR que refaz todo o canal principal do raio (imagem b), intensificando a sua corrente contínua inicial. Processo descrito como pulso de corrente contínua inicial.

Fonte: Produção do autor.

Já nas componentes M, os LR ocorrem depois da primeira descarga de retorno, eles intensificam a sua corrente contínua.

A Figura 2.30 mostra uma sequência de imagens de um raio ascendente negativo que se iniciou no pico do Jaraguá, em São Paulo. O registro foi feito por câmera rápida e exibe um exemplo de componente M. O líder ascendente positivo se desenvolveu em direção a nuvem e, posteriormente, decaiu dando origem a um líder contínuo que, por sua vez, deu origem a uma descarga de retorno seguida de corrente contínua. A corrente contínua manteve esse canal ativo por um tempo ( $T = 122,8$  ms). Posteriormente, surge um LR que intensifica a corrente nesse canal ( $T = 123,1$  ms) (SABA et al., 2016).

Figura 2.30 – Sequência de imagens de uma componente M.



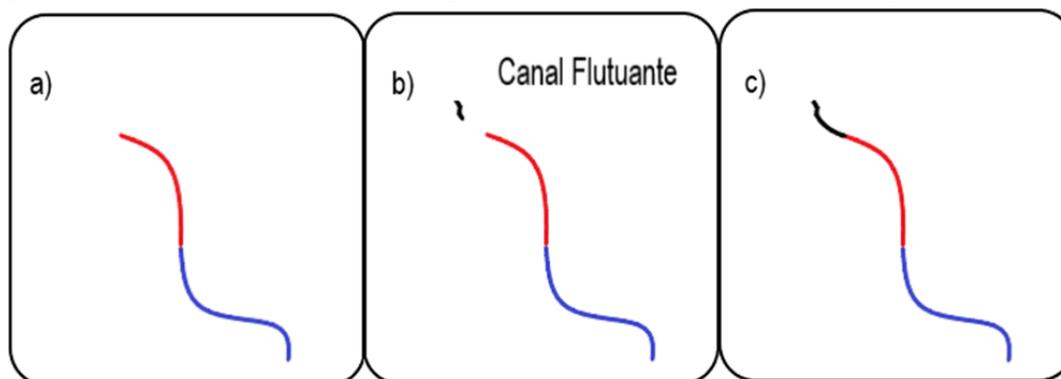
Fonte: Adaptado de Saba et al. (2016).

Os raios ascendentes possuem um número mais elevado de componentes M, se comparado com o número de descargas de retorno subsequentes observados nessas descargas (PAIVA, 2015).

## 2.5 Conexão de canal flutuante com líder de recuo

Um estudo recente mostra o desenvolvimento de LR em um raio ascendente negativo. Nele foram analisados alguns processos físicos, como: líderes contínuos e tentativas de líderes. Também foi possível visualizar a conexão de um canal flutuante com a extremidade positiva de um LR (Figura 2.31) (WU et al., 2019).

Figura 2.31 – Canal flutuante se originando na frente da extremidade positiva do LR.



A imagem a) representa um LR. Em b) surge um canal flutuante (traço preto), ele se desenvolve e se conecta à extremidade positiva do LR.

Fonte: Produção do autor.

Em a) tem-se o desenvolvimento do LR. A sua parte negativa é representada pela cor azul e a positiva pela vermelha. Em b) surge um canal flutuante na frente da extremidade positiva, representado pela cor preta. Em c) esse canal flutuante se desenvolve em direção a extremidade positiva do LR e realiza a conexão.

O raio ascendente negativo analisado por Wu et al. (2019) foi filmado com uma câmera de alta velocidade na torre de Cantão, na China. O líder ascendente positivo se desenvolveu em direção a base da nuvem e logo depois seus

ramos decaíram, originando o LR. A Figura 2.32 mostra a representação do raio ascendente e a região de ocorrência da conexão do canal flutuante com o LR analisado.

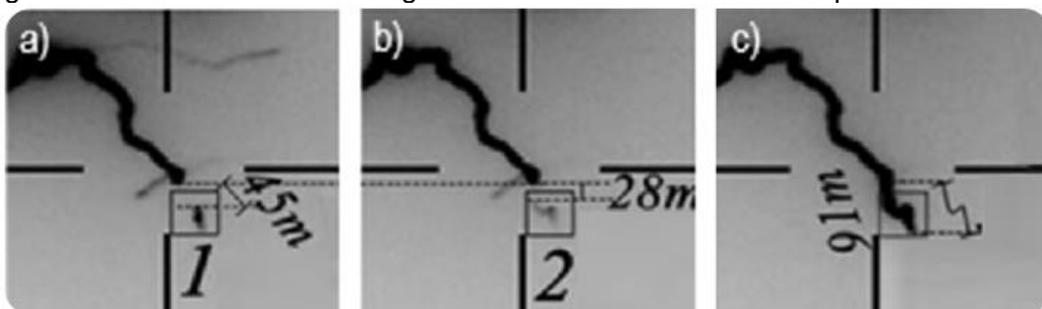
Figura 2.32 – Raio ascendente iniciado na torre de Cantão, na China.



Fonte: Adaptado de Wu et al. (2019).

A Figura 2.33 mostra o surgimento e a propagação do canal flutuante na frente da extremidade positiva do LR.

Figura 2.33 – Canal flutuante originado na frente da extremidade positiva de um LR.



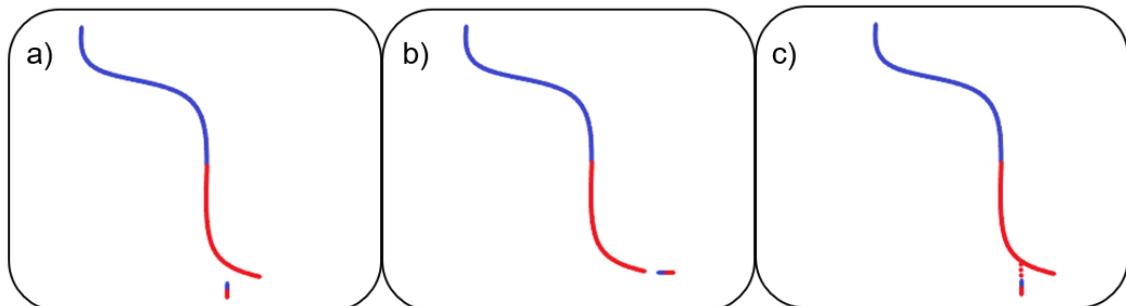
A imagem a) representa a origem de um canal flutuante (quadrado 1). Em b) ele se desenvolve (quadrado 2) e, em seguida, se conecta à extremidade positiva do LR (imagem c).

Fonte: Adaptado de Wu et al. (2019).

A sequência de imagens na Figura 2.33 mostra o LR avançando pelo canal decaído do raio ascendente negativo, nelas são manifestadas apenas a extremidade positiva do LR. Em a) é possível observar a origem de um canal flutuante (quadrado 1) à 45 m da extremidade positiva do LR. A imagem b) ilustra o crescimento desse canal flutuante (quadrado 2). Ele se aproxima da extremidade positiva do LR, permanecendo a uma distância de 28 m. Na imagem c) o canal flutuante se conecta ao LR. O seu desenvolvimento total (91 m) gera prolongação na extremidade positiva do LR.

Para explicar esse canal flutuante Wu et al. (2019) apresentaram três possíveis hipóteses, caracterizando-o como: 1) Líder lateral<sup>8</sup>; 2) Líder espacial; 3) Líder de recuo. A Figura 2.34 mostra a representação esquemática das três hipóteses.

Figura 2.34 – Classificação dos canais flutuantes originados próximos a LR – Wu et al. (2019).



A imagem a) representa um canal flutuante originado no ar virgem ao lado da extremidade positiva de um LR (denominado como líder lateral). Em b) ocorre um canal flutuante na frente da extremidade positiva do LR (chamado de líder espacial). Por fim, em c), tem-se a reatuação de um canal flutuante originado em um canal decaído de um líder positivo (intitulado como LR).

Fonte: Produção do autor.

---

<sup>8</sup> Wu et al. (2019) utilizaram o termo líder bipolar bidirecional para descrever canais flutuantes se originando lateralmente no ar virgem ao lado de líderes positivos. Porém, em todas as hipóteses o canal flutuante se desenvolve como um líder bipolar bidirecional, portanto, para facilitar o entendimento, foi utilizado o termo líder lateral.

Os LR e líderes espaciais se desenvolvem como líderes bipolares bidirecionais. O que diferencia esses processos físicos é o contexto em que eles estão inseridos. Em síntese, o termo líder espacial é usualmente utilizado para representar uma das etapas do desenvolvimento escalonado da extremidade negativa do líder bipolar bidirecional. Assumir o canal flutuante como um líder espacial, neste contexto, significa dizer que os líderes positivos também podem se desenvolver em passos, pois o canal flutuante surge na frente da extremidade positiva do LR.

Um trabalho recente, publicado por Jiang et al. (2021b), mostra um canal flutuante se conectando na frente da extremidade positiva de um líder bipolar bidirecional. No raio observado por Jiang et al. (2021b) foi possível visualizar todo o desenvolvimento do líder positivo. Em um determinado momento a extremidade positiva do líder bipolar bidirecional cessa sua propagação e instantes depois surge um canal flutuante que se desenvolve bidirecionalmente e se conecta ao líder positivo. Processo similar aos líderes espaciais, observados em líderes negativos. A principal diferença entre esses processos é que os líderes espaciais (observados em líderes negativos) possuem duração e extensão menor do que os canais flutuantes observados na extremidade de líderes positivos (WU et al., 2019; JIANG et al., 2021b).

Também é possível observar que as origens desses eventos são distintas. Os líderes espaciais se iniciam por causa da distribuição das cargas espaciais na frente do líder negativo (vide seção 2.2.2). Por outro lado, os canais flutuantes surgem na extremidade do líder positivo por causa da bainha de corona (acúmulo de cargas positivas na frente do líder positivo) (JIANG et al., 2021b). Considera-se que o líder positivo seja composto por um canal condutor quente cercado por cargas negativas e uma bainha de corona externa de carga positiva (HARE et al., 2019). Essa distribuição pode levar à origem de canais flutuantes na frente dos líderes positivos (JIANG et al., 2021b).

Também assumiu-se que o canal flutuante possa ser caracterizado como um líder lateral devido à similaridade com o evento observado por Montanya, Van der Velde e Williams (2015). Eles visualizaram o surgimento e a conexão lateral

de um líder bipolar bidirecional com um líder positivo. O líder positivo intensificou o campo elétrico na região, dando origem a um canal condutor flutuante polarizado que se desenvolveu pelo ar virgem.

Por fim, foi assumido que esses canais flutuantes possam ser LR, eles se iniciariam em canais decaídos de líderes positivos. Não há registro dessa característica na literatura. A Tabela 2.1 mostra um resumo das observações dessas hipóteses na literatura.

Tabela 2.1 – Registros das hipóteses de Wu et al. (2019) na literatura.

Hipóteses	Registros na literatura	Referências	Consentimento no meio científico
<b>Líder lateral</b>	Observado	<i>Yoshida et al. (2012); Montanyà et al. (2015); Warner et al. (2016); Yuan et al. (2019).</i>	Aceito
<b>Líder espacial</b>	Observado	<i>Wu et al. (2019); Jiang et al. (2021b).</i>	Sujeito a confirmação*
<b>Líder de recuo</b>	Nunca observado	–	Sujeito a confirmação

\*Mesmo com registros publicados na literatura, a ideia de classificar canais flutuantes originados na frente de líderes positivos como líderes espaciais ainda está sujeita a discussões.

Fonte: Produção do autor.

Um dos objetivos deste trabalho será analisar canais flutuantes em raios ascendentes negativos sob a perspectiva das hipóteses anteriormente descritas.

### 3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

#### 3.1 Campanhas de aquisição de dados

Os dados utilizados no desenvolvimento desta pesquisa foram obtidos durante as campanhas realizadas nos verões dos anos de 2011 a 2019. Para iniciar as coletas de dados foi realizado um mapeamento da densidade de raios na cidade de São Paulo, Brasil.

Foram observados dois pontos com alta densidade de raios por Km<sup>2</sup>, o pico do Jaraguá e a Avenida Paulista. Ambos os lugares se encontram em regiões elevadas da cidade de São Paulo. O pico do Jaraguá se localiza a aproximadamente 1.100 m de altitude em relação ao nível do mar. No topo do pico há torres de telecomunicações que intensificam o campo elétrico na região, favorecendo o desenvolvimento dos raios ascendentes. Já a Avenida Paulista possui torres no topo de construções altas, que também propiciam o desenvolvimento desses raios (SCHUMANN, 2016).

A partir dessas informações foram escolhidos cinco locais a serem utilizados como bases de observação. Uma das bases foi estabelecida na Universidade de São Paulo (USP), onde foram instalados sensores de campo elétrico rápido, lento e sensores do tipo *Electric Field Mill* (EFM) para monitoramento do campo elétrico ambiente. O prédio onde os sensores foram instalados se encontrava a 11 km das torres do pico do Jaraguá e a 8 km da Avenida Paulista.

A segunda base de observação se localizava no pico do Jaraguá a 27 m da maior torre de telecomunicação (130 m de altura). Nessa base de observação foram instalados uma estação meteorológica, um sensor de campo elétrico rápido e outro para monitoramento do campo elétrico ambiente, além de uma câmera com taxa de aquisição de 100 imagens por segundos (ips). A Figura 3.1 mostra os sensores e a estação meteorológica no pico do Jaraguá.

Figura 3.1 – Equipamentos a 27 m da torre T<sub>1</sub> no pico do Jaraguá.



Fonte: INPE (2011).

A terceira base de observação se encontrava em um apartamento no bairro de Pirituba, a 5 km do pico do Jaraguá. Nela foram instaladas câmeras rápidas e convencionais<sup>9</sup>. Esse apartamento era de um colaborador (Lie Liong Bie, “Benny”) que filmava os raios durante as tempestades.

A quarta base de observação se situava em um apartamento no bairro de Santana, a 7 km da avenida Paulista, onde foram instaladas câmeras rápidas e convencionais.

Por fim, a quinta base de observação se localizava em uma guarita de segurança dentro da emissora do Sistema Brasileiro de Televisão (SBT), a 1 km de distância do pico do Jaraguá. Nela também foram instaladas câmeras rápidas e convencionais.

---

<sup>9</sup> As câmeras convencionais possuem taxa de aquisição de 30 ips.

A Figura 3.2 mostra a localização das bases de observação (Local de observação 1, 2, 3, 4 e 5 – L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub>, L<sub>4</sub>, e L<sub>5</sub>). Os quadrados indicam os locais onde não havia aquisição de dados com câmeras rápidas, enquanto os círculos indicam os locais onde esse tipo de registro era realizado. O quadrado em azul identifica o primeiro local de observação (L<sub>1</sub>) na USP. O quadrado roxo representa o segundo local de observação (L<sub>2</sub>), localizado no pico do Jaraguá. O círculo em vermelho identifica o terceiro local de observação (L<sub>3</sub>), no bairro de Pirituba. O círculo em laranja indica a quinta base de observação (L<sub>5</sub>), situada no SBT. Todas as câmeras situadas nas três bases (L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub> e L<sub>5</sub>) estão direcionadas para a observação do pico do Jaraguá. A câmera situada na quarta base de observação (L<sub>4</sub>), no bairro Santana, estava direcionada para a Avenida Paulista. Para o desenvolvimento desta pesquisa utilizou-se apenas dados de duas bases de observação (L<sub>2</sub> e L<sub>3</sub>).

Figura 3.2 – Bases de observação.



As duas estrelas na imagem indicam os pontos observados durante as campanhas de aquisição de dados de raios que ocorreram entre 2011 e 2019. Os círculos e quadrados representam os locais de observação 1, 2, 3, 4 e 5.

Fonte: Produção do autor.

### 3.1.1 Câmeras de vídeo de alta velocidade

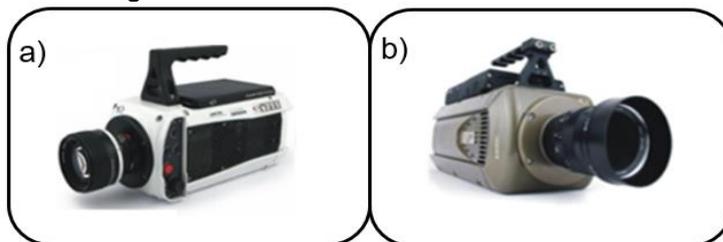
Os raios são fenômenos naturais visíveis que podem ser estudados a partir de registros de vídeos. Os eventos associados a essa descarga atmosférica ocorrem em um intervalo de tempo de curta duração. As câmeras convencionais, que operam a uma taxa de aquisição de dados de 30 ips, não têm resolução temporal suficiente para permitir a observação dos detalhes dos fenômenos estudados por essa pesquisa. Atualmente, existem câmeras que possuem alta resolução temporal, as chamadas câmeras de alta velocidade. Com elas é possível fazer análises de vídeo com o intuito de investigar os processos físicos que envolvem a origem e o desenvolvimento dos LR.

Durante as campanhas de aquisição de dados foram utilizadas seis câmeras de alta velocidade com capacidade de registro entre 1.000 e 111.553 ips. Todas as câmeras utilizadas possuíam informações de tempo inseridas nos registros de vídeo por meio de uma antena de *Global Positioning System* (GPS).

As câmeras utilizadas eram: I) Phantom v711 (configurada durante as campanhas para adquirir 10.000, 20.000, 37.819, 56.000, 81.200 e 100.000 ips); II) Miro4 (1.000 ips); III) Phantom v9 (1.600 e 4.000 ips); IV) Phantom v12 (70.000 e 111.553 ips); V) Phantom v310 (10.000 ips); VI) Photrom Fast Cam 512 (4.000 ips).

Para o desenvolvimento dessa pesquisa utilizou-se dados de apenas duas das seis câmeras. A Figura 3.3 mostra as câmeras de alta velocidade utilizadas no desenvolvimento desta pesquisa.

Figura 3.3 – Câmeras de alta velocidade.



Em: a) Phantom v711 (utilizou-se vídeos gravados por essa câmera a 20.000 e 37.819 ips); b) Phantom v310 (configurada para adquirir 10.000 ips).

Fonte: Adaptado de Schumann (2016).

Os raios analisados no desenvolvimento dessa pesquisa foram filmados pelas câmeras Phantom v711 e v310, configuradas com taxas de aquisição de dados de 10.000, 20.000 e 37.819 ips. Esses raios foram escolhidos, pois as taxas de aquisição de dados eram altas, assim como, a resolução das imagens, facilitando as análises.

### **3.1.2 Sensor de campo elétrico**

Também foram utilizados dados de sensores de campo elétrico. O raio ao se propagar pelo ar produz variações no campo elétrico nas regiões de sua ocorrência. Essas variações podem ser registradas por meio de sensores, permitindo análises de todo o processo de origem e propagação desses eventos.

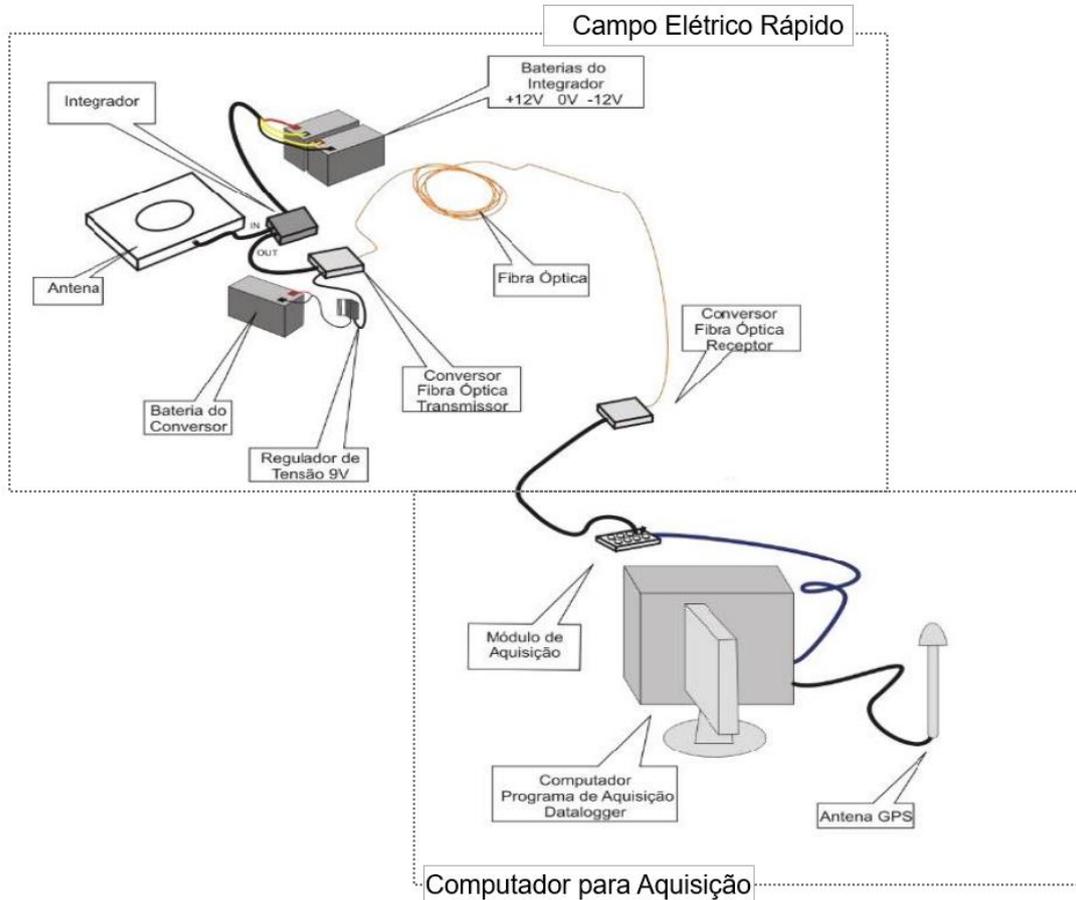
Durante as campanhas de aquisição de dados foram utilizados sensores de campo elétrico “rápido” e “lento”. Eles se destinam a observar variações de alta e baixa frequência dos processos físicos dos raios. Os dados de campo elétrico são obtidos a partir de uma antena de prato circular plano, que mede a derivada do campo elétrico no tempo. O sinal, passando por um integrador, se converte em campo elétrico. Os dados de campo elétrico “rápido” fornecem informações mais detalhadas para fenômenos de altas frequências. Enquanto, os dados de campo elétrico “lento” fornecem informações detalhadas para fenômenos de baixa frequência. Ele se distingue do “rápido” pelo tempo de decaimento do circuito e pela diferença no diâmetro do prato circular plano (possui diâmetro maior) (SCHUMANN, 2016).

A atual pesquisa utilizou dados do sensor de campo elétrico para determinar a polaridade de líderes se propagando na nuvem, com o intuito de entender alguns processos físicos relacionados a LR, ocorrentes em raios ascendentes negativos.

Como os perfis de campo elétrico foram utilizados apenas para determinar a polaridade de líderes dentro da nuvem, utilizou-se apenas dados de campo

elétrico “rápido”. A Figura 3.4 mostra uma representação da captação de dados por esse tipo de sensor.

Figura 3.4 – Representação da captação de dados do campo elétrico “rápido”.



As antenas de campo elétrico produzem dados da derivada do campo elétrico no tempo. Em seguida, os dados são integrados no tempo por meio de integrador, que encaminha o sinal a um módulo de aquisição, armazenando-o em um computador. Durante as aquisições de dados informações de tempo (por uma antena GPS) são adicionadas.

Fonte: Adaptado de Schumann (2016).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram analisados oito casos de raios ascendentes negativos. Algumas características nunca antes descritas foram observadas durante a análise dos dados: conexão de líderes de recuo secundários em LR precedentes; LR originados pela intensificação do campo elétrico devido a propagação de líderes dentro da nuvem; conexão de LR com líder positivo na nuvem; e LR do tipo “V”.

### 4.1 Líderes de recuo secundários

Durante as análises dos casos observou-se o surgimento de canais flutuantes se conectando a LR, como verificado na pesquisa de Wu et al. (2019). Na seção 2.5 foi mostrado que os canais flutuantes podem ser classificados como líderes bipolares bidirecionais (canais flutuantes originados no ar virgem na lateral dos líderes positivos), líderes espaciais (canais flutuantes iniciados no ar virgem na frente dos líderes positivos), ou LR (canais flutuantes iniciados em ramos decaídos de líderes positivos). Ao estudar os casos para o desenvolvimento desta pesquisa, pode-se observar que todos os canais flutuantes analisados ocorreram em ramos decaídos de líderes positivos, sendo classificados como líderes de recuo secundários (LRS). A Tabela 4.1 mostra um resumo das observações das hipóteses de Wu et al. (2019) nessa pesquisa.

Tabela 4.1 – Observação das hipóteses de Wu et al. (2019) nessa pesquisa.

Hipoteses	Observação nessa pesquisa
Líder lateral	Não observado
Líder espacial	Não observado
Líder de recuo	Observado

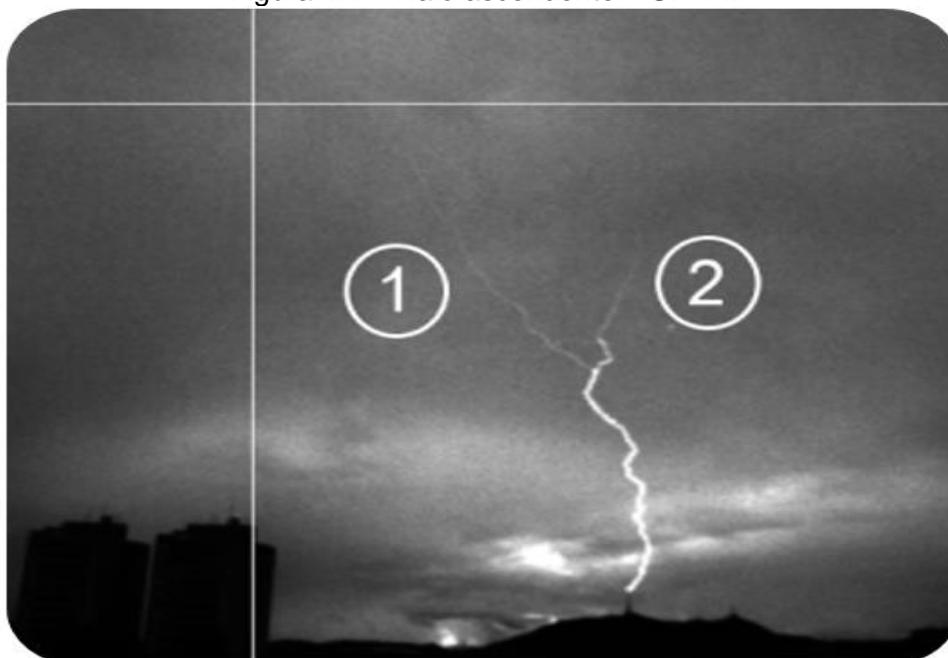
Fonte: Produção do autor.

Para mostrar essa característica (canais flutuantes classificados como LR) foi analisado o raio ascendente negativo – UP 44.

#### 4.1.1 Classificação dos canais flutuantes como líder de recuo

O raio ascendente negativo – UP 44 foi gravado pela câmera v310, no dia 1 de fevereiro de 2013, às 19:58:41 UTC (do inglês *Universal Time Coordinated*). A câmera estava configurada para adquirir 10.000 ips, com período de 100  $\mu$ s. Esse raio se iniciou na T<sub>1</sub>, no pico do Jaraguá. O líder ascendente positivo se desenvolveu em direção às cargas de blindagem próximo à base da nuvem. Depois de um tempo o líder ascendente decaí, surgindo LR sobre esses canais. Visando determinar se o canal flutuante também ocorre em ramos decaídos de líderes positivos foram analisados dois LR nesse raio. A Figura 4.1 exibe o raio ascendente negativo – UP 44.

Figura 4.1 – Raio ascendente – UP 44.

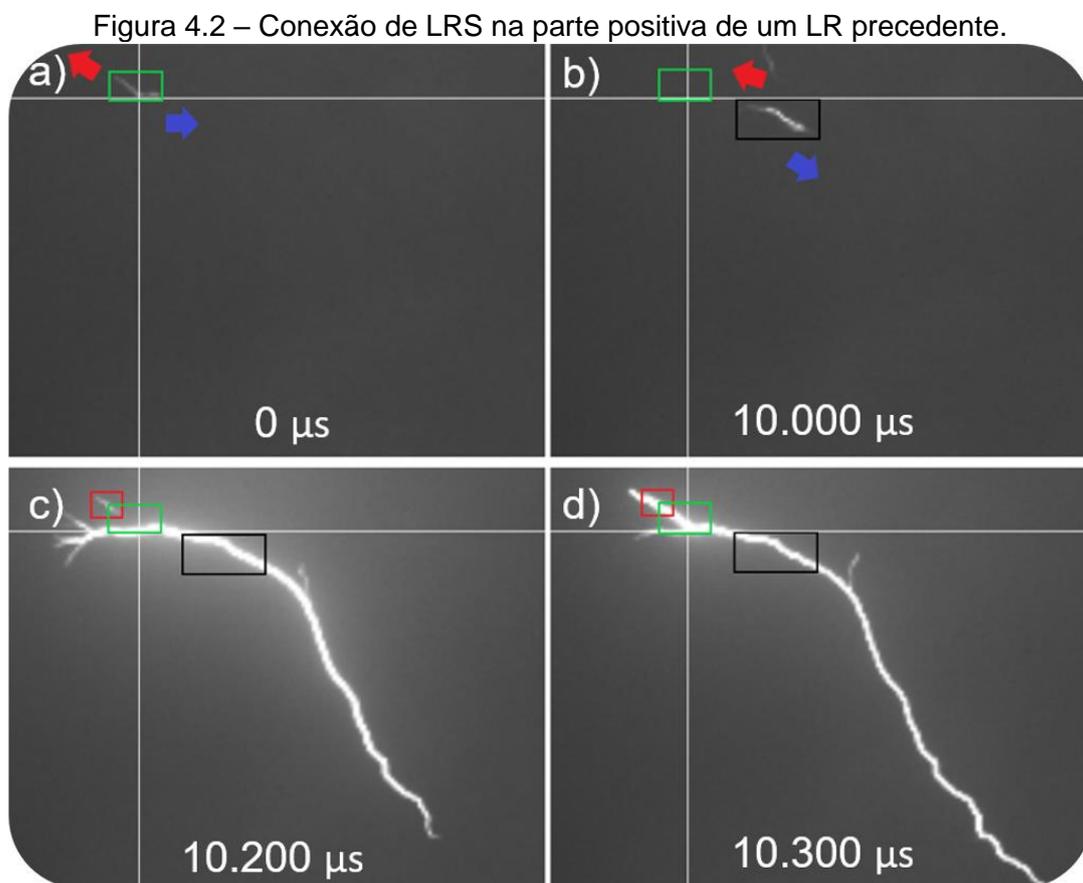


Fonte: Produção do autor.

O cruzamento das linhas dispostas verticalmente e horizontalmente na imagem indicam a região de início do primeiro LR analisado. Na imagem também é

possível visualizar dois ramos no raio ascendente negativo, sendo classificados como ramo 1 e 2. O primeiro ramo não está muito visível no vídeo, não é possível observar o canal do raio na região de ocorrência dos LR.

O primeiro LR se desenvolve no ramo 1 e, em seguida, decai. Depois de um tempo surge outro LR em uma região mais abaixo. Nesse evento foi observado a origem de um canal flutuante (LRS), mostrado em detalhes na Figura 4.2. Nele é possível visualizar o LRS se conectando na parte positiva de um LR precedente.



Em a) surge o primeiro LR analisado, o retângulo em verde mostra a região de sua origem. Em b) ocorre o segundo LR, as setas vermelhas e azuis mostram a direção de propagação das extremidades positivas e negativas dos LR, respectivamente. Em c) surge um canal flutuante próximo a extremidade positiva do segundo LR. Em seguida, ela se conecta ao LR (imagem d).

Fonte: Produção do autor.

A imagem a) é classificada como instante inicial. Ela mostra a origem do primeiro LR (retângulo verde), iniciado no vídeo em 24.899,80  $\mu$ s. As flechas azuis representam a direção de propagação das extremidades negativas dos LR e as vermelhas as positivas. Esse primeiro LR se estende e, em seguida, decai. Na imagem acima não foi mostrado o seu desenvolvimento.

Em b) surge o segundo LR (retângulo preto). Ele inicia-se um pouco abaixo da região de origem do primeiro. Em c) surge um canal flutuante (quadrado vermelho) em um ramo decaído da extremidade positiva do primeiro LR. Em d) esse canal flutuante se conecta ao LR precedente (segundo LR analisado), intensificando a luminosidade do canal. Como esse canal flutuante em a) se desenvolve em um ramo decaído de um líder positivo e se conecta a um LR precedente, ele é definido como LRS.

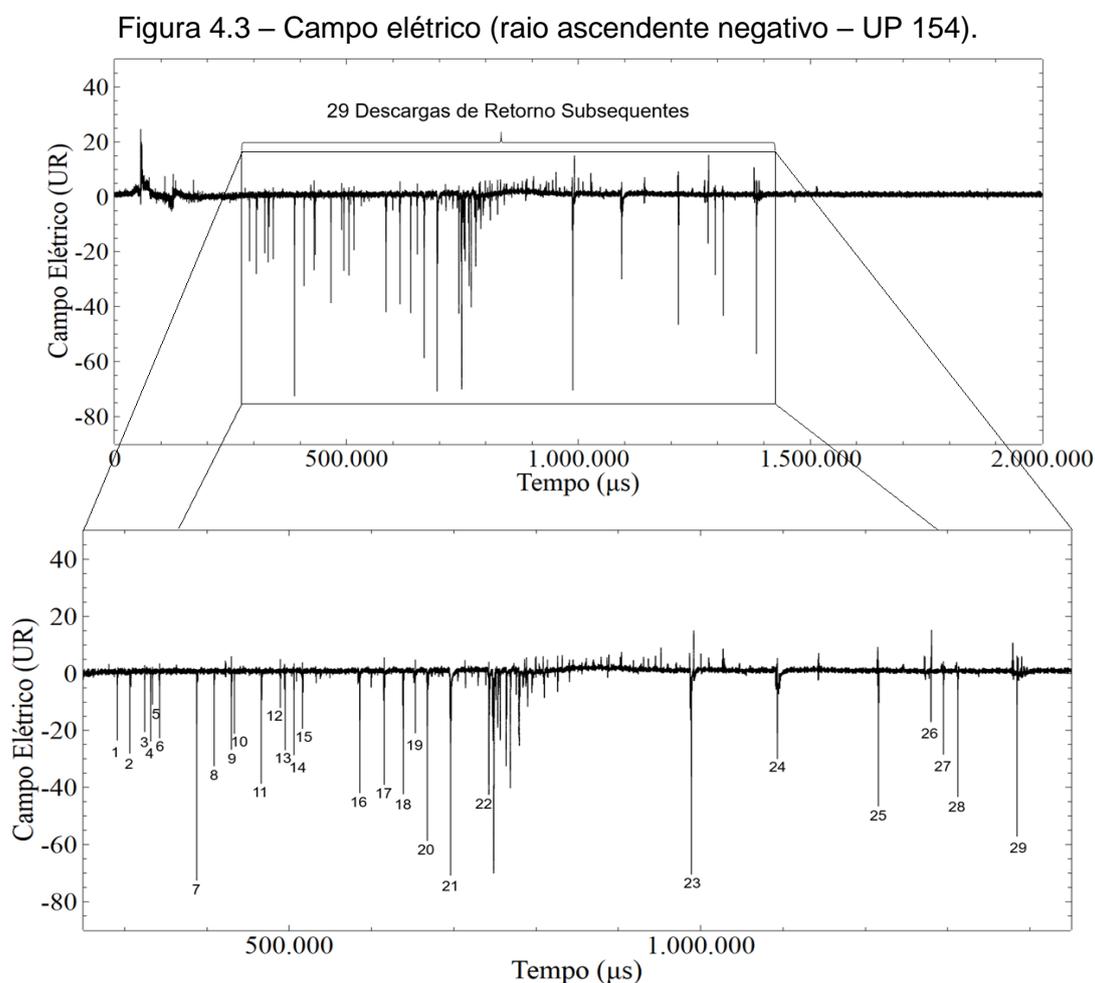
#### **4.1.2 Influência dos líderes de recuo secundários sobre os líderes de recuo precedentes**

Wu et al. (2019) analisaram apenas o desenvolvimento abrupto na parte positiva do LR na conexão. Porém, em todas as observações da atual pesquisa percebeu-se que esses LRS intensificaram a luminosidade do canal dos LR precedentes, fazendo com que a parte negativa também se prolongue. Os LRS cedem energia para que os LR precedentes reionizem o canal do líder positivo. É importante destacar que podem ocorrer mais de um LRS, fazendo com que a trajetória do primeiro LR se estenda até o solo.

Essas observações permitem compreender melhor as tentativas de líderes, líderes contínuos, pulsos de corrente inicial e componente M, originadas em raios ascendentes negativos. Como foi mostrado na seção 2.4.2, alguns LR decaem antes de chegarem ao solo, pois não possuem energia suficiente para reionizar o canal do raio (SHAO et al., 1995). Para identificar a influência desses LRS sobre os LR precedentes foi analisado os raios ascendentes negativos – UP 154 e 166.

#### 4.1.2.1 Desenvolvimento de líderes contínuos

O raio ascendente – UP 154 foi filmado pela câmera v711, no dia 24 de novembro de 2018, às 21:20:29 UTC. A câmera estava configurada para filmar raios com uma taxa de aquisição de 37.819 ips, com período de 26,44  $\mu\text{s}$ . Este raio também se originou na T<sub>1</sub>, no pico do Jaraguá. O líder ascendente positivo se propagou em direção a nuvem e depois de um tempo o canal decaiu, originando vários LR. Este raio produziu 29 descargas de retorno subsequentes. A Figura 4.3 mostra o gráfico de campo elétrico em função do tempo para o raio ascendente – UP 154.



O gráfico superior mostra os dados de campo elétrico total do raio ascendente negativo – UP 154. E o gráfico inferior exhibe uma região ampliada dos perfis das 29 descargas de retorno subsequente observadas.

Fonte: Produção do autor.

Foi possível observar nas descargas de retorno subsequentes, que ocorrem nesse raio, a presença de LRS cedendo energia para que os LR precedentes tocassem a torre. A Tabela 4.2 mostra a quantidade de LRS cedendo energia para os LR precedentes para cada descarga de retorno subsequente.

Tabela 4.2 – LRS cedendo energia para que o LR precedente gere líderes contínuos.

<b>Descarga de retorno subsequente</b>	<b>Quantidade de LRS</b>
1°	5
2°	1
3°	1
4°	1
5°	3
6°	2
7°	-
8°	1
9°	1
10°	2
11°	-
12°	-
13°	-
14°	-
15°	-
16°	-
17°	-
18°	-
19°	-
20°	1
21°	-
22°	-
23°	-
24°	-
25°	-
26°	-
27°	-
28°	-
29°	-

Fonte: Produção do autor.

Apenas 10 das 29 descargas de retorno subsequentes nesse raio apresentaram conexões de LRS com os LR precedentes. A descarga de retorno subsequente que teve mais conexão de LRS foi a primeira. A Figura 4.4 mostra o raio ascendente – UP 154 e a região de ocorrência das conexões de LRS para o desenvolvimento da primeira descarga de retorno subsequente.

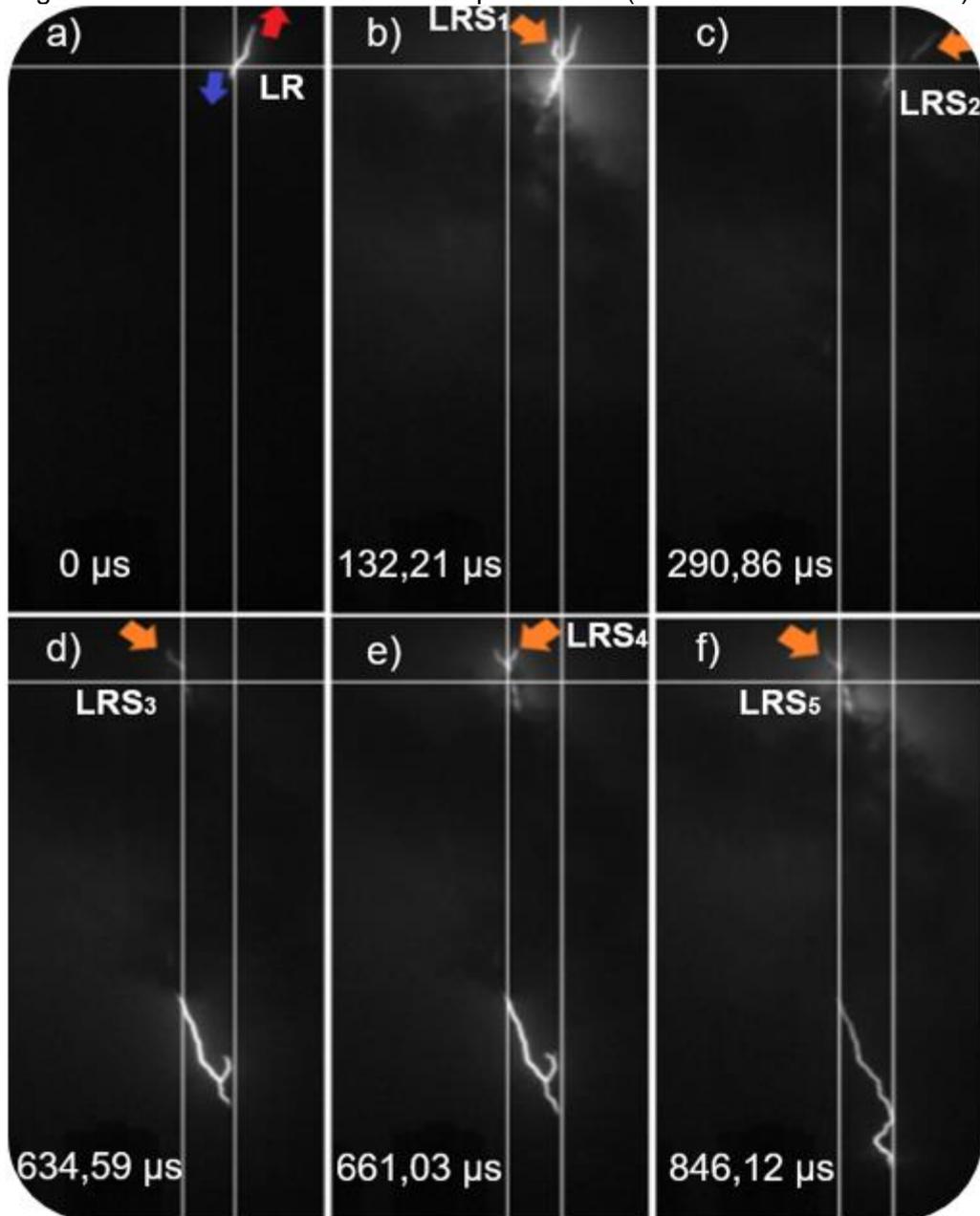
Figura 4.4 – Raio ascendente – UP 154.



Fonte: Produção do autor.

A imagem acima foi obtida pela câmera fotográfica Nikon D800. Nos cruzamentos das linhas verticais e horizontais, dispostas na Figura 4.4, é possível observar que os LRS partiram de duas regiões próximas à base da nuvem. A Figura 4.5 mostra os LRS se conectando ao canal do LR precedente.

Figura 4.5 – Conexão de LRS no LR precedente (raio ascendente – UP 154).



A imagem a) mostra o LR analisado. Posteriormente, foram analisados LRS se conectando ao LR precedente. As setas laranjas indicam as conexões durante o desenvolvimento do LR em direção a torre de telecomunicação no pico do Jaraguá.

Fonte: Produção do autor.

A imagem a) apresenta a origem do LR, iniciado no tempo 290.670,32  $\mu\text{s}$ , classificado como instante inicial. A seta em azul representa o desenvolvimento da extremidade negativa e a vermelha da positiva. Em b) surge o LRS<sub>1</sub> que se

conecta ao LR precedente (a seta laranja mostra a conexão), fazendo com que ele se desenvolva um pouco mais em direção ao solo.

Em c) percebe-se o surgimento do LRS<sub>2</sub>. Neste momento, a luminosidade do canal do LR precedente estava tênue. Caso esse LRS<sub>2</sub> não tivesse surgido e não houvesse nenhuma outra conexão, provavelmente o canal do primeiro LR decairia, gerando uma tentativa de líder. Em d), e) e f)<sup>10</sup> surgem os LRS<sub>3, 4 e 5</sub> em outro ramo do raio ascendente. Estes fazem com que o LR se desenvolva até o solo, sendo reenergizado em todas as conexões. Quando ele atinge o solo, tem-se a formação de uma descarga de retorno subsequente.

Uma importante característica observada neste caso foi que esse raio teve 29 descargas de retorno subsequentes, as últimas 15 descargas ocorreram em um mesmo canal. Depois da 10ª descarga de retorno subsequente, apenas a 20ª possuiu LRS que cedeu energia para o LR precedente. Ou seja, para as últimas descargas de retorno subsequentes não foram necessários LRS para gerar líderes contínuos, pois o canal estava fortemente ionizado. Essa característica também está associada à carga na nuvem, que polariza os canais flutuantes nos líderes positivos decaídos, originando os LR e LRS. À medida que as descargas de retorno ocorrem, a carga na nuvem vai sendo neutralizada, tornando o campo elétrico ambiente menor. Consequentemente, o número de LRS também diminui. Pelo mesmo motivo, é razoável se esperar que a primeira descarga de retorno deva apresentar um número maior de LRS que as demais subsequentes.

#### **4.1.2.2 Desenvolvimento de pulsos de corrente contínua inicial e componentes M**

Para exemplificar o caso de um LRS influenciando o desenvolvimento de pulsos de corrente contínua inicial e componentes M foi utilizado o raio ascendente negativo – UP 166. Este raio foi filmado pela câmera v711, no dia

---

<sup>10</sup> As imagens e) e f) são semelhantes, os LRS se originaram no mesmo local. Após a imagem e), a parte positiva do primeiro LR decaiu, surgindo posteriormente um novo LRS no mesmo local, representado pela sexta imagem.

25 de janeiro de 2019, às 20:11:21 UTC. A câmera estava configurada para filmar raios com uma taxa de aquisição de 37.819 ips, com período de 26,44  $\mu$ s.

Este evento produziu dois líderes ascendentes no pico do Jaraguá, um na  $T_1$  e o outro em uma torre de telecomunicação próxima à primeira, denominada torre 2 ( $T_2$ ). Eles se desenvolveram em direção à base da nuvem e depois de um tempo alguns ramos decaíram, originando LR. Este raio produziu três pulsos de corrente contínua inicial e cinco componentes M. A Tabela 4.3 mostra a quantidade de LRS cedendo energia para que os LR precedentes gerassem pulsos de corrente contínua inicial.

Tabela 4.3 – LRS reenergizando os LR precedentes para origem de pulsos de corrente contínua inicial.

<b>Pulsos de corrente contínua inicial</b>	<b>Quantidade de LRS</b>
1°	1
2°	3
3°	1

Fonte: Produção do autor.

Depois de um tempo o líder ascendente positivo decaiu, originando três descargas de retorno subsequentes. Durante essas descargas foi possível observar cinco componentes M. A Tabela 4.4 mostra a quantidade de LRS cedendo energia para que os LR precedentes tocassem a torre, originando as componentes M.

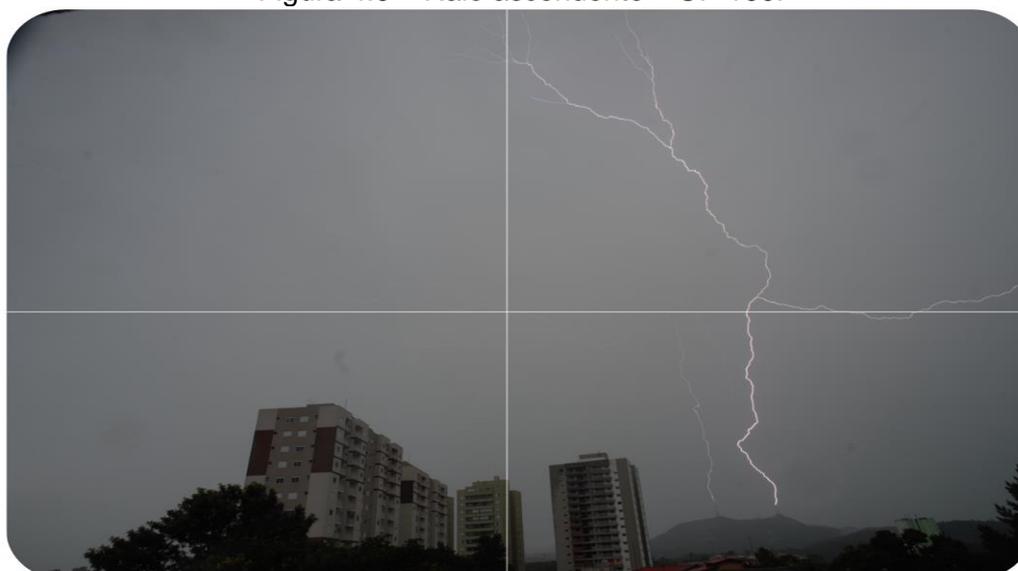
Tabela 4.4 – LRS cedendo energia para que os LR precedentes gerem componentes M.

Descargas de retorno subsequentes	Componentes M	Quantidade de LRS para o desenvolvimento de componentes M
1°	1°	2
	2°	-
2°	3°	-
	4°	2
3°	5°	-

Fonte: Produção do autor.

Como foi discutido na seção 2.4.3, os pulsos de corrente contínua inicial e componentes M são processos similares. Pensando nessa característica será analisado o processo que apresentou mais conexão de LRS. No segundo pulso de corrente contínua inicial, o LR que deu origem a esse evento ocorreu em um ramo decaído do líder ascendente positivo na T<sub>1</sub>. A Figura 4.6 mostra os líderes ascendentes se desenvolvendo na T<sub>1</sub> e 2 e também mostra a região de origem do LR analisado.

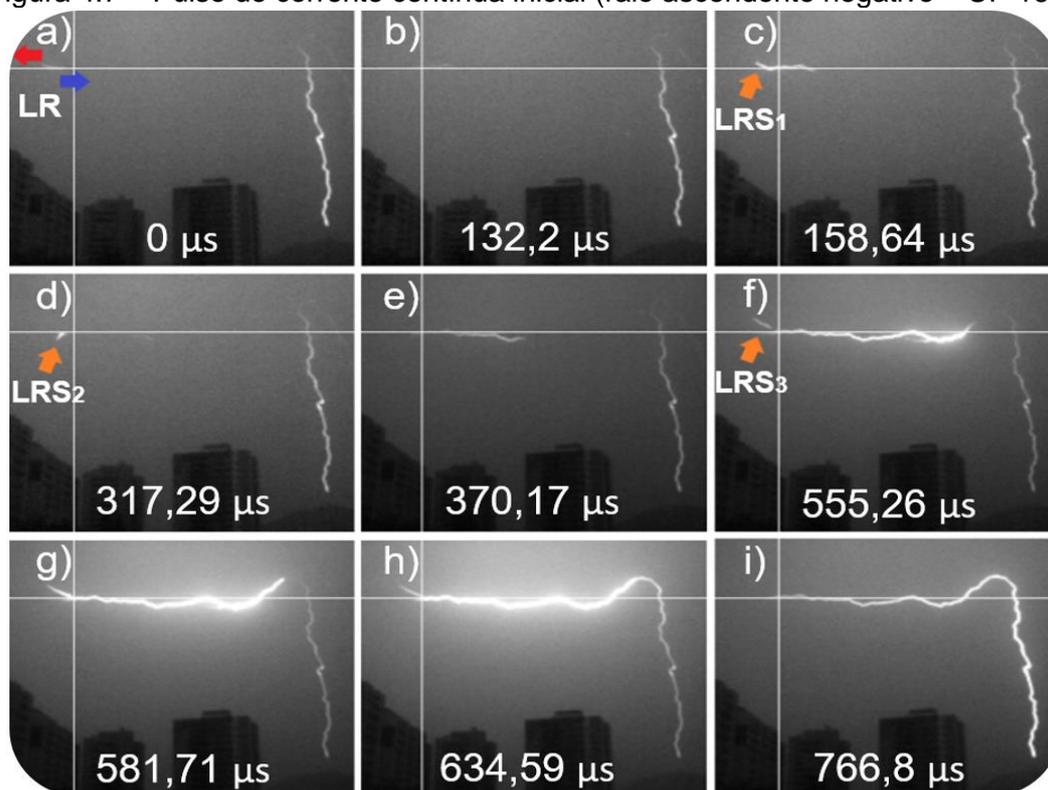
Figura 4.6 – Raio ascendente – UP 166.



Fonte: Produção do autor.

O LR observado se originou no vídeo em 956.853,93  $\mu\text{s}$ . A Figura 4.7 mostra LRS cedendo energia para que o LR precedente reionize o canal decaído do raio ascendente negativo, gerando um pulso de corrente contínua inicial.

Figura 4.7 – Pulso de corrente contínua inicial (raio ascendente negativo – UP 166).



A imagem a) mostra o LR analisado. Durante o seu desenvolvimento surgiram LRS que cederam energia, fazendo com ele se propagasse em direção ao canal principal, produzindo um pulso de corrente contínua inicial.

Fonte: Produção do autor.

A imagem a) mostra a origem do LR, a seta em azul representa o desenvolvimento da sua extremidade negativa e a vermelha a positiva. Em c), d) e f) surgem os LRS<sub>1</sub>, <sub>2</sub> e <sub>3</sub> (setas laranjas). Eles fazem com que o LR precedente continue reionizando o canal decaído do raio ascendente negativo. Posteriormente, em i), a extremidade negativa do LR atinge a torre, originando um pulso de corrente contínua inicial. Se os LRS não tivessem ocorrido o LR precedente não teria energia suficiente para se propagar pelo canal, cessando seu desenvolvimento.

### **4.1.3 Considerações finais (líderes de recuo secundários)**

As análises realizadas nesta seção contribuíram na identificação e caracterização de canais flutuantes que surgem próximos a LR, observados pela primeira vez por Wu et al. (2019). Esses canais flutuantes, na atual pesquisa, foram classificados como LRS. Todos eles se originaram em canais decaídos de líderes positivos e se conectaram a LR precedentes. Nesta seção também foram mostradas as influências desses LRS sobre os LR precedentes. Foi mostrado que os LRS cedem energia para que os LR precedentes continuem se propagando pelos ramos decaídos dos raios ascendentes negativos. Portanto, pode-se mostrar que esse fenômeno é um mecanismo importante no desenvolvimento de pulsos de corrente contínua inicial, líderes contínuos e componentes M em raios ascendentes.

## **4.2 Líderes de recuo iniciados pela interação de líderes dentro da nuvem**

Durante as análises dos oito raios ascendentes percebeu-se a presença de LR iniciados após intensificação da luminosidade na nuvem, que está associada a propagação de líderes no seu interior. Sabe-se que os LR se comportam como líderes bipolares bidirecionais e se desenvolvem em duas fases. Na primeira, ambas as extremidades dos líderes se desenvolvem e na segunda fase apenas a negativa. Por meio desta característica foi possível determinar a polaridade dos líderes dentro da nuvem.

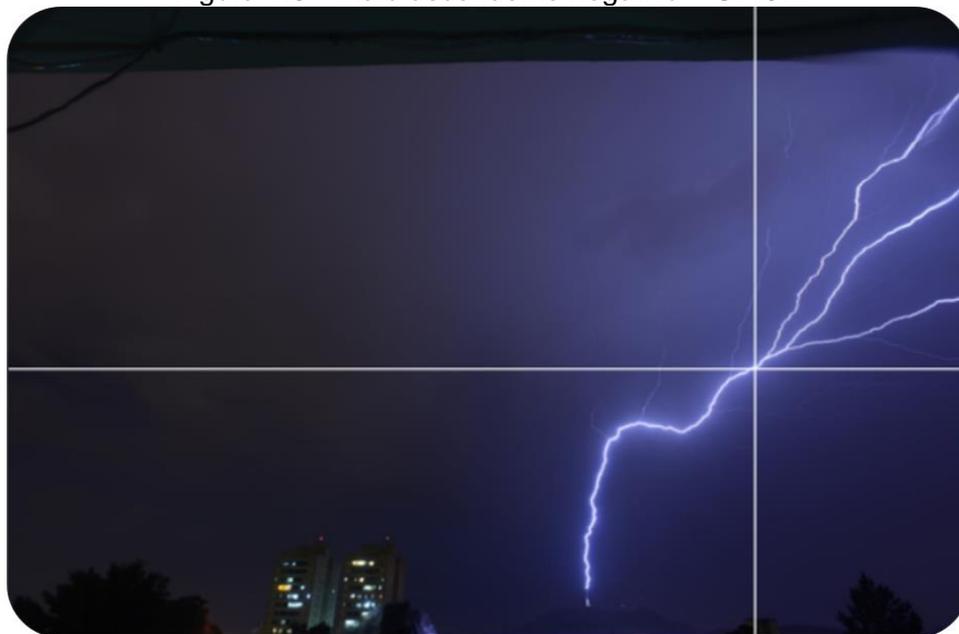
### **4.2.1 Propagação de líderes negativos na nuvem**

O primeiro caso trata-se de um líder negativo se propagando no interior da nuvem, produzindo LR no canal de um raio ascendente negativo. O registro foi feito pela câmera v711 (taxa de aquisição de 20.000 ips, com tempo de exposição de 50  $\mu$ s) no dia 16 de janeiro de 2014, às 00:59:13 UTC.

O líder ascendente positivo foi iniciado na  $T_1$ . Durante sua propagação, alguns canais decaíram, iniciando LR. Um desses líderes teve sua origem

impulsionada pela propagação de um líder negativo no interior da nuvem. A Figura 4.8 mostra o raio ascendente negativo – UP 67 e o local de origem do LR analisado.

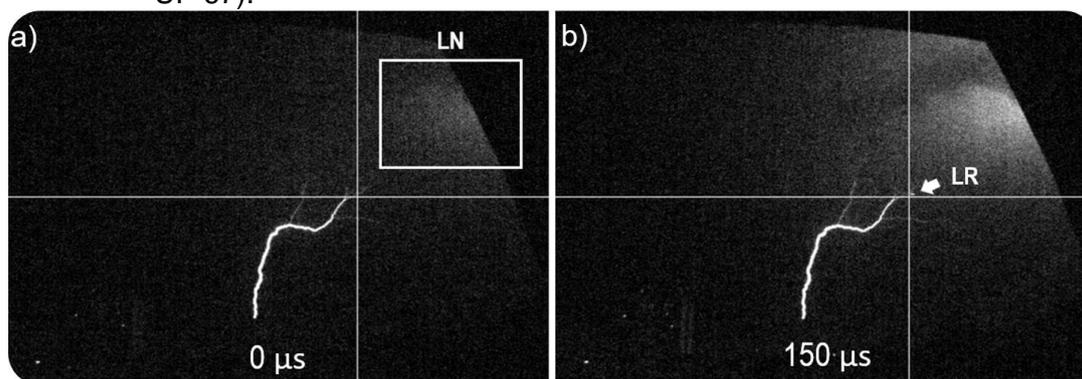
Figura 4.8 – Raio ascendente negativo – UP 67.



Fonte: Produção do autor.

A parte negativa do LR se propagou em direção oposta ao líder dentro da nuvem. As cargas da extremidade negativa do LR foram repelidas. Sendo assim, supõe-se que o líder dentro da nuvem seja negativo. A Figura 4.9 mostra o surgimento do LR.

Figura 4.9 – LR gerado por um líder negativo na nuvem (raio ascendente negativo – UP 67).



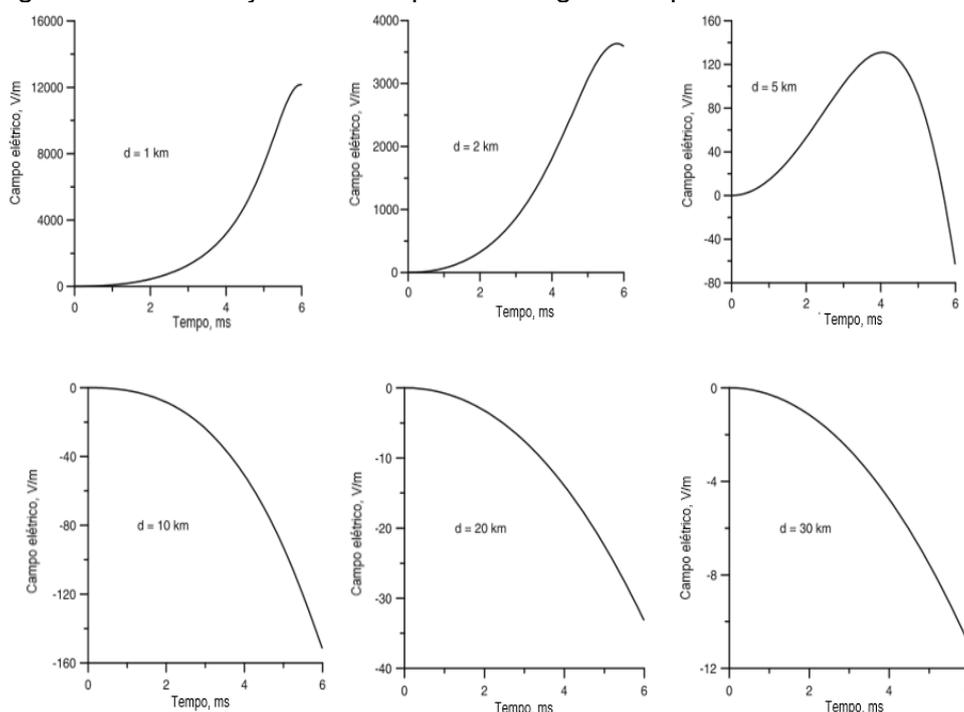
A imagem a) mostra o momento em que um líder negativo intensifica a luminosidade na nuvem (essa intensificação é representada pelo quadrado branco). Instantes depois surge um LR em um canal decaído do raio ascendente.

Fonte: Produção do autor.

A imagem a) apresenta o momento da intensificação da luminosidade na nuvem, que se tornou visível no vídeo em 149.692  $\mu\text{s}$ . Após 150  $\mu\text{s}$  da intensificação da luminosidade surge o LR mostrado na imagem b). Analisando os dados da antena de campo elétrico rápido disposta na segunda base de observação (27 m da T<sub>1</sub> no pico do Jaraguá), percebeu-se que houve variação no instante em que o líder começou a se movimentar na nuvem. Para interpretar os dados de campo elétrico deve ser levada em consideração a geometria de propagação do líder. A sua aproximação ou o seu distanciamento geram alterações na polaridade do sinal captado pelo sensor.

Cooray (2015) mostra as mudanças no sinal do campo elétrico no solo de acordo com a distância horizontal de um líder escalonado descendente (negativo). Para curtas distâncias o sinal será positivo e para longas distâncias negativo. O mesmo vale para o líder positivo, porém com polaridade inversa ao do negativo. A Figura 4.10 exhibe as variações do campo elétrico gerada por um líder escalonado de acordo com sua distância na horizontal.

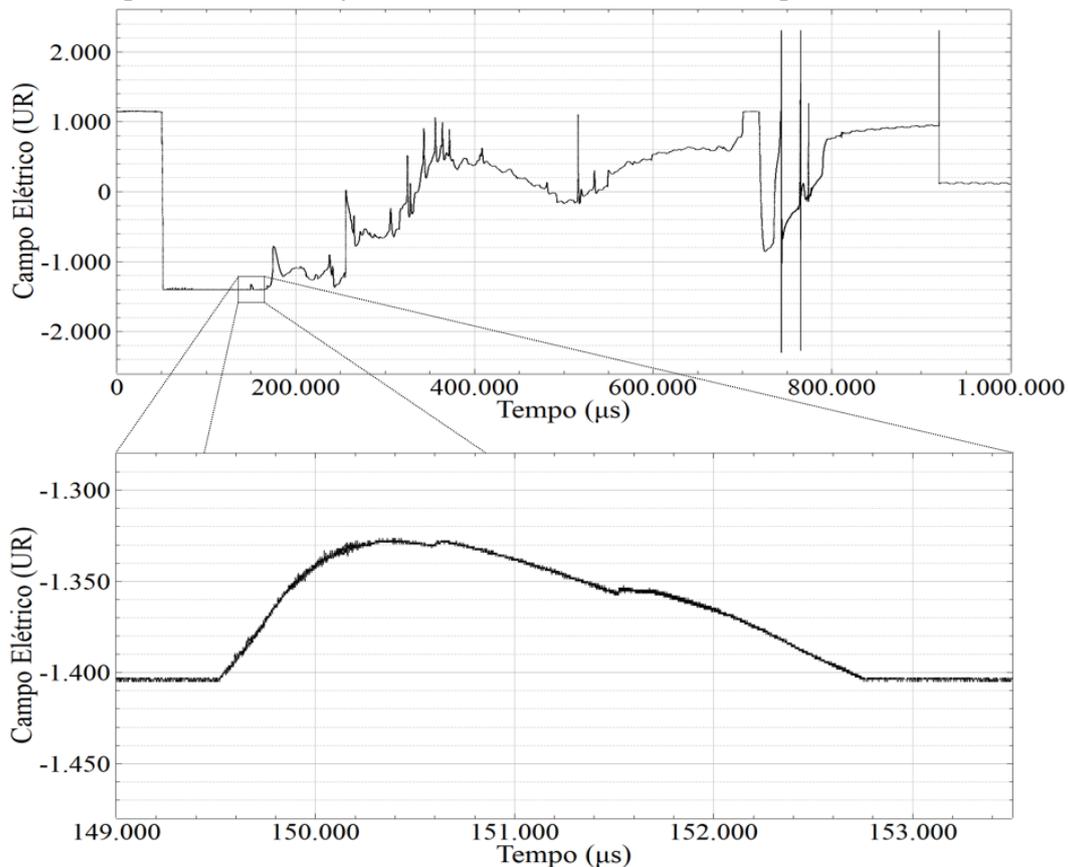
Figura 4.10 – Variações do campo elétrico geradas por um líder escalonado.



Fonte: Adaptado de Cooray (2015).

Como o sensor de campo elétrico estava a 27 m da torre e, portanto, a uma distância horizontal do líder menor do que alguns quilômetros, a aproximação de um líder negativo gera um pulso de polaridade positiva no campo. A Figura 4.11 mostra o gráfico de campo elétrico em função do tempo para o raio ascendente – UP 67.

Figura 4.11 – Campo elétrico do raio ascendente negativo – UP 67.



A imagem superior indica o gráfico do campo elétrico do raio ascendente UP – 67. O gráfico inferior indica a variação do campo elétrico no momento em que o líder se propaga na nuvem.

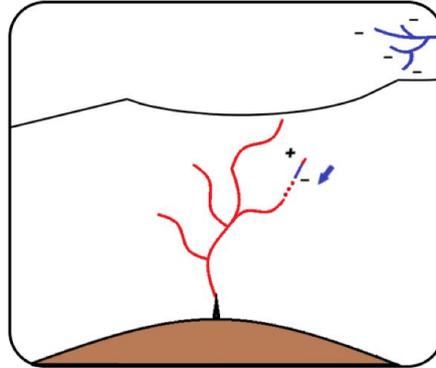
Fonte: Produção do autor.

No vídeo, percebe-se que o líder está se aproximando horizontalmente da antena de campo elétrico. Como a deflexão do campo elétrico possui sinal positivo, o líder estava carregado negativamente. Esse líder intensifica o campo elétrico na região, impulsionando o desenvolvimento de LR nos ramos decaídos do líder ascendente positivo.

Como consequência da intensificação do campo elétrico gerado pelo líder negativo na nuvem, mais cargas serão acumuladas nas extremidades do LR. A sua extremidade positiva passa a ionizar mais a região à sua frente. Os elétrons produzidos nesse processo são transferidos para a extremidade negativa, fazendo com que ela reionize o canal decaído do raio ascendente negativo. A Figura 4.12 mostra um esquema da intensificação do campo

elétrico gerada pela propagação de um líder negativo na nuvem, originando um LR nos ramos decaídos do líder ascendente.

Figura 4.12 – LR originado por um líder negativo na nuvem.



A imagem mostra um líder negativo, se propagando na nuvem, impulsionando o desenvolvimento de um LR em um ramo decaído do raio ascendente negativo.

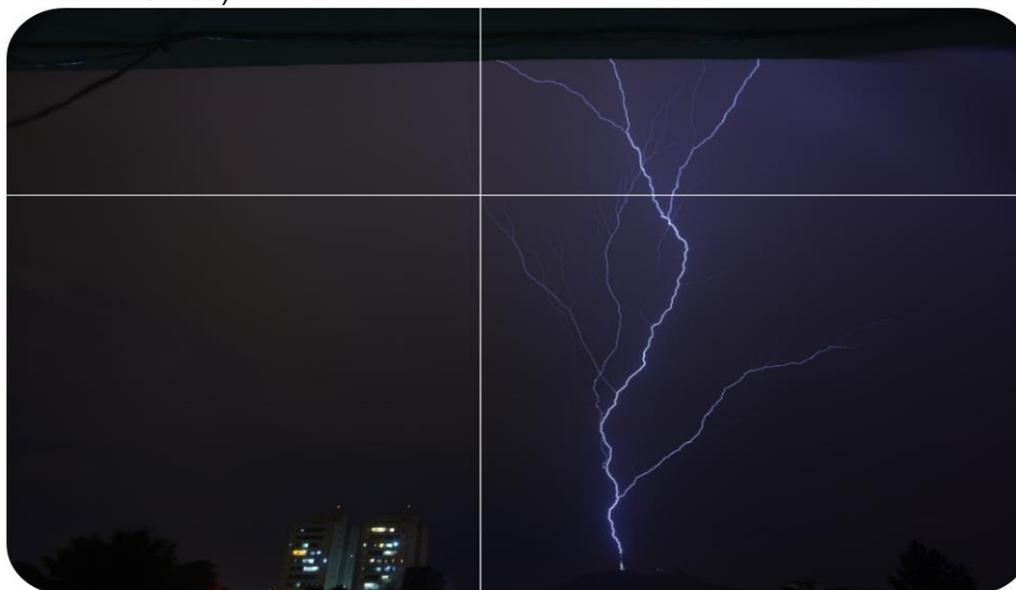
Fonte: Produção do autor.

#### 4.2.2 Propagação de líderes positivos na nuvem

Foi possível observar um caso de LR originado pela intensificação do campo elétrico ocasionada pela propagação de um líder positivo na nuvem. Esta característica foi observada no raio ascendente negativo – UP 68, que aconteceu no dia 16 de janeiro de 2014, às 01:04:32 UTC. Filmado pela câmera v711, que possuía taxa de aquisição de 20.000 ips, com período de exposição de 50  $\mu$ s.

O líder ascendente positivo se originou na T<sub>1</sub>, desenvolvendo-se em direção à nuvem. Depois de um tempo alguns canais decaíram e surgiram LR. Um deles teve sua origem impulsionada pela propagação de um líder positivo na nuvem. A Figura 4.13 mostra o raio ascendente – UP 68 e a região de ocorrência do LR analisado.

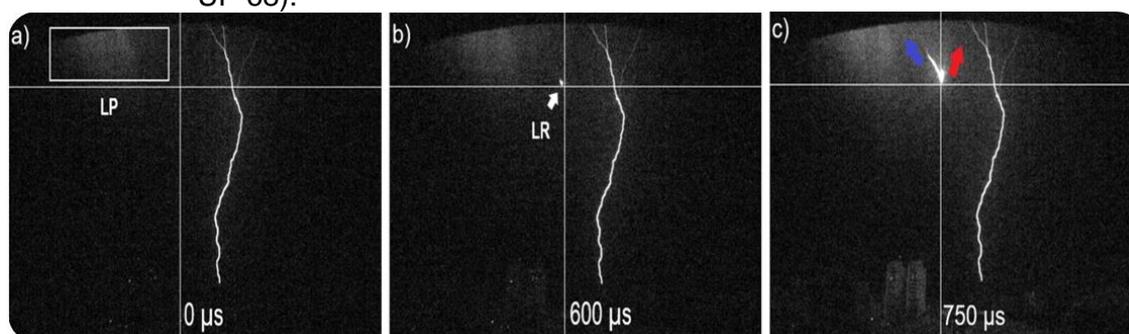
Figura 4.13 – LR gerado por um líder positivo na nuvem (raio ascendente negativo – UP 68).



Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.14 mostra o líder positivo se propagando na nuvem e, em seguida, surge o LR em um dos canais decaídos do raio ascendente negativo.

Figura 4.14 – LR gerado por um líder positivo na nuvem (raio ascendente negativo – UP 68).



A imagem a) mostra o instante em que um líder positivo intensifica a luminosidade na nuvem. Em seguida, observou-se a origem de um LR em um canal decaído do raio ascendente negativo. A extremidade negativa se propagou em direção a nuvem (seta azul) e a positiva em uma das ramificações do raio (seta vermelha).

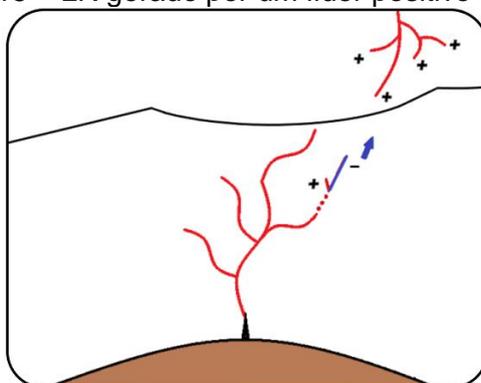
Fonte: Produção do autor.

A imagem a) exibe a atividade do líder positivo na nuvem, iniciada nitidamente no vídeo em 930.642,42  $\mu$ s. Depois de 600  $\mu$ s da intensificação da

luminosidade na nuvem surge um LR mostrado na imagem b). A imagem c) mostra o desenvolvimento do LR. A flecha azul representa a propagação da extremidade negativa do LR e a vermelha a positiva. Para este caso, não houve variação nítida nos dados de campo elétrico pela presença do líder na nuvem. Porém, analisando a configuração do LR é possível dizer que dentro da nuvem se propagava um líder positivo. A extremidade positiva do LR cessa seu desenvolvimento depois de um tempo, desta forma, a parte maior do LR na imagem c) é negativa. As cargas nessa extremidade são atraídas pelas cargas de sinal oposto dentro da nuvem, o que permite classificar o líder dentro da nuvem como de polaridade positiva. Percebe-se que os líderes positivos também intensificam o campo elétrico na região, aumentando as cargas acumuladas nas extremidades dos LR.

As cargas da extremidade positiva do LR são repelidas, intensificando a ionização na sua frente, que impulsionará o desenvolvimento do LR. A Figura 4.15 mostra o esquema da intensificação do LR pelo líder positivo na nuvem.

Figura 4.15 – LR gerado por um líder positivo na nuvem.



A imagem mostra um líder positivo se propagando na nuvem, impulsionando o desenvolvimento de um LR em um ramo decaído de um raio ascendente negativo.

Fonte: Produção do autor.

### 4.2.3 Considerações finais (impulsioneamento da origem de líderes recuo)

As seções anteriores mostraram que líderes propagando dentro da nuvem podem impulsionar o desenvolvimento de LR nos ramos decaídos de raios

ascendentes negativos. Esses líderes, ao se propagarem, intensificam o campo elétrico ambiente na região, fazendo com que mais cargas se acumulem nas extremidades dos LR, propiciando o seu desenvolvimento. Nos casos em que há propagação de líderes positivos na nuvem, a extremidade negativa dos LR (originados nos canais decaídos dos raios ascendentes) tendem a se desenvolver em direção ao líder positivo na nuvem. Para o caso do raio ascendente negativo – UP 68, o LR não apresentou energia suficiente para continuar se propagando e gerar conexão com o líder positivo na nuvem. Porém, foram observados dois casos em que houve conexão de LR com líder positivo na nuvem, os quais serão analisados nas próximas seções.

### **4.3 Conexão de líder de recuo com líder positivo**

Foram observados dois eventos que produziram conexões de LR com líderes positivos na nuvem. Depois que ocorrem as conexões, os líderes positivos refazem o caminho percorrido pelos LR e atingem a torre no mesmo ponto de iniciação dos raios ascendentes negativos, gerando uma descarga de retorno subsequente positiva. Não há registros dessas conexões e descargas subsequentes positivas em raios ascendentes negativos na literatura.

Um estudo recentemente publicado por Jiang et al. (2021a) mostrou um caso de um raio ascendente negativo que se iniciou na torre de Cantão, na China. O líder ascendente positivo se propagou em direção à base da nuvem e depois de um tempo seus ramos decaíram. Posteriormente, observou-se atividade intranuvem. O líder positivo dentro da nuvem refez parte do canal decaído do raio ascendente e passou a se propagar pelo ar virgem tocando o solo a 5,4 km da torre. Sabe-se que os raios descendentes positivos são raros. Eles correspondem a 10% de todas as descargas que tocam o solo (RAKOV; UMAN, 2003). Os raios descendentes positivos produzem corrente contínua longa e alguns possuem pico de corrente alta, combinações que potencialmente agravam os danos causados às estruturas atingidas. Portanto, o estudo realizado por Jiang et al. (2021a), assim como o desta dissertação,

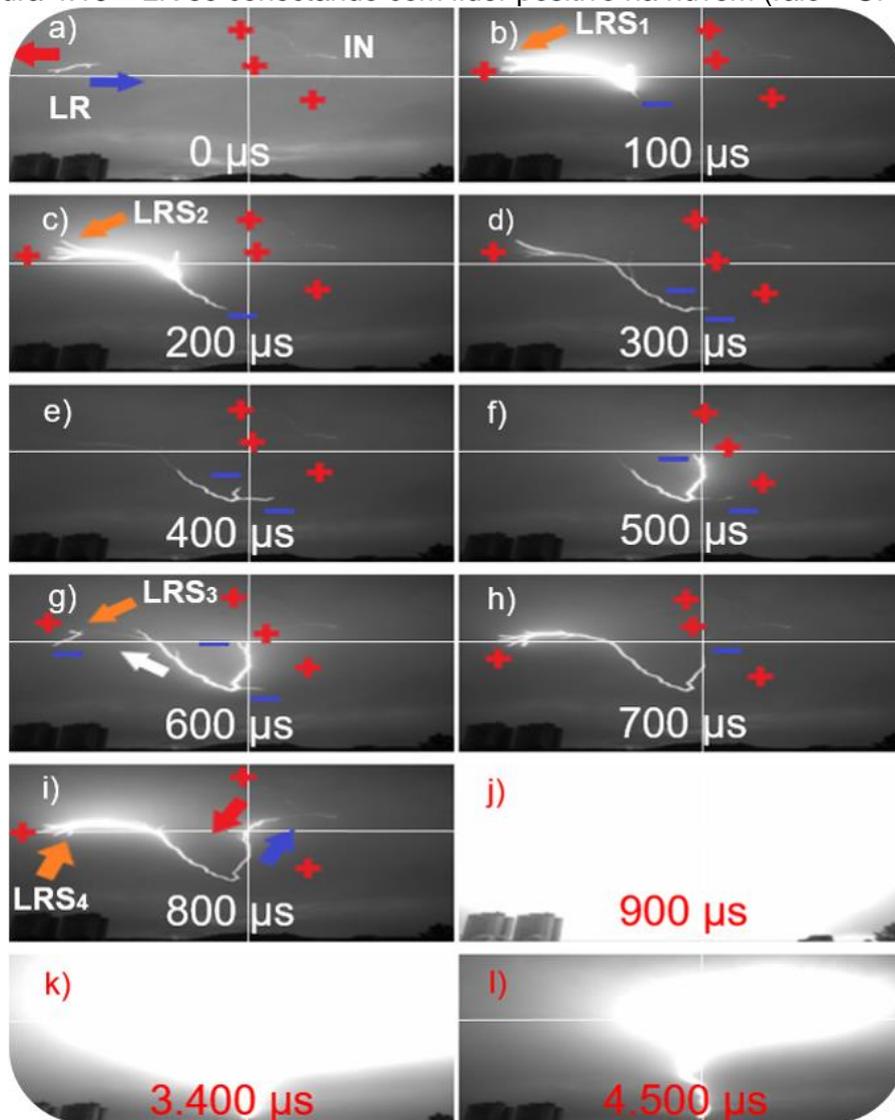
são importantes, pois ajudam a entender como essas descargas positivas são iniciadas.

O que diferencia essa pesquisa de mestrado da realizada por Jiang et al. (2021a) é que a atual pesquisa conseguiu observar conexões de LR com líderes positivos na nuvem. Outra característica é que o líder positivo refaz totalmente o canal decaído do raio ascendente, tocando a torre no seu ponto de iniciação. Além de serem registros inéditos, um aspecto importante mostrado nesse trabalho é o aumento da probabilidade da ocorrência de danos nas estruturas pela combinação entre a corrente contínua longa produzida pelas descargas subsequentes positivas e a corrente contínua inicial dos raios ascendentes. Portanto, essas observações se tornam essenciais. Os eventos analisados serão descritos nas próximas seções.

#### **4.3.1 Primeiro registro de descarga de retorno subsequente positiva em raios ascendentes negativos**

O primeiro registro de descarga de retorno subsequente positiva foi observado no raio ascendente negativo – UP 44 (Figura 4.1). Esse raio produziu ICC com duração de 142 ms. O registro em vídeo da iniciação do líder ascendente positivo foi perdido. Portanto, o valor da duração da ICC está subestimado. Depois que o raio ascendente decaiu surgiram LR. Um desses LR se conectou com um líder positivo na nuvem. A Figura 4.16 mostra a conexão entre o LR (à esquerda) e o líder positivo (à direita) na nuvem. Em média a velocidade de desenvolvimento do líder positivo na nuvem é de  $1,64 \times 10^4$  m/s (WU; WANG; TAKAGI, 2019) e em média a velocidade de propagação dos LR em canais decaídos de líderes positivos é de  $2 \times 10^7$  m/s (JENSEN et al., 2021). Ou seja, a velocidade do LR é aproximadamente 100 vezes maior que a velocidade do líder positivo na nuvem. Essa característica foi perceptível durante o evento analisado (o LR se desenvolveu muito mais rápido do que o líder positivo na nuvem).

Figura 4.16 – LR se conectando com líder positivo na nuvem (raio – UP 44).



A imagem a) mostra a origem de um LR em um ramo decaído do raio ascendente negativo. Ele reioniza o canal do raio e se conecta a um líder positivo na nuvem (imagem i). Os pontos de intersecção entre as linhas horizontal e vertical, mostram a região da conexão. Posteriormente, o líder positivo refaz o trajeto do LR e atinge o solo, gerando uma descarga de retorno subsequente positiva (imagem j).

Fonte: Produção do autor.

Em a) surge um LR no canal decaído (ramo 1) do raio ascendente negativo (canto superior esquerdo da primeira imagem), esse LR surgiu no vídeo em 50.399  $\mu$ s. A seta em azul representa o desenvolvimento da extremidade negativa do LR e a vermelha a positiva. Na parte superior direita da imagem, percebe-se a presença de um líder positivo se propagando na nuvem (raio

intranuvem – IN). A intensificação do campo elétrico gerada pelo líder positivo na nuvem impulsionou a origem do LR no canal decaído do raio ascendente.

Em b) surge o LRS<sub>1</sub> (seta laranja) que se conecta ao precedente, cedendo energia para que ele reionize o canal decaído do raio ascendente negativo. Na imagem c) surge o LRS<sub>2</sub> que também reforça o canal do primeiro LR. Em seguida, em d), a luminosidade do canal decai, as cargas negativas se desenvolvem pelos ramos do raio ascendente negativo. Posteriormente, em e), o LR continua reionizando o ramo 2 do raio ascendente – UP 44.

Em f), um dos ramos da bifurcação decai e o outro prevalece, propagando-se em direção ao líder positivo na nuvem. É possível observar, em f), uma intensificação da luminosidade do canal do LR. O líder positivo na nuvem intensifica o campo elétrico e faz com que mais cargas sejam acumuladas nas extremidades do LR, impulsionando o seu desenvolvimento nas duas extremidades. Também é possível observar que canal do líder ascendente positivo está bastante decaído, o LR não tem energia suficiente para reionizá-lo. Para realizar a conexão com o líder positivo na nuvem seria necessária a aparição de um novo LRS, que surge em g). Porém, a parte negativa do LRS<sub>3</sub>, representada pelo ramo maior na imagem, se propaga em um dos canais da parte positiva decaída do primeiro LR. Ele não fornece energia para que o LR precedente reionize o canal decaído do raio ascendente. Ainda em em g), ocorre novamente o desenvolvimento bidirecional do LR. A extremidade positiva do LR se desenvolve em direção ao LRS<sub>3</sub> (seta branca) e a extremidade negativa em direção ao líder na nuvem (imagem h).

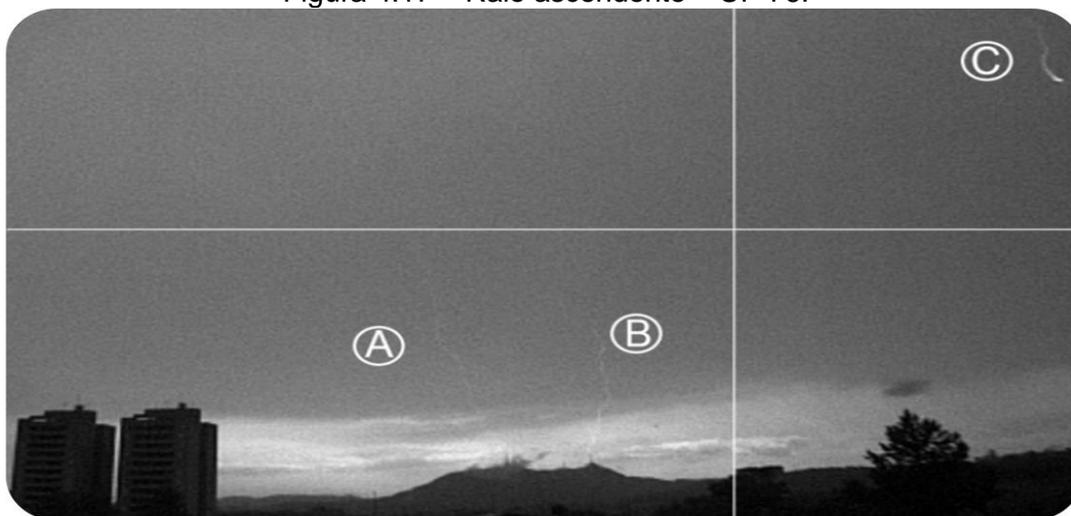
Logo após, em i), surge o LRS<sub>4</sub> que proporciona energia suficiente para que haja a reionização do canal do raio ascendente negativo, realizando a conexão com o líder positivo. Por fim, o líder positivo se conecta e se desenvolve até o solo, originando uma descarga de retorno subsequente positiva, imagem j). Depois da descarga de retorno subsequente as imagens do vídeo ficaram saturadas. Em l) é possível ver o canal do raio ascendente negativo reionizado. Essa descarga de retorno subsequente positiva gera uma corrente contínua longa de 406 ms. Para ocorrer essa conexão foram necessários quatro LRS,

em que três realizaram intensificação na luminosidade do canal, proporcionando energia suficiente para que houvesse a ionização do canal do raio ascendente negativo.

#### 4.3.2 Segundo registro de descarga de retorno subsequente positiva em raios ascendentes negativos

O segundo registro de descarga de retorno subsequente positiva foi observado no raio ascendente negativo – UP 76 (Figura 4.17). Esse evento foi filmado no dia 16 de janeiro de 2014, às 17:05:28 UTC. Ele foi filmado pela câmera Phantom v711, configurada para adquirir dados a uma taxa de 20.000 ips, com período de 50  $\mu$ s. Nesse vídeo foi possível observar a origem de dois líderes ascendentes. O primeiro (evento A) se originou na torre mais alta do pico do Jaraguá ( $T_1$ ), Brasil. E o segundo (evento B) se originou na  $T_2$ . Além da atividade dos líderes ascendentes positivos, no vídeo também era possível visualizar atividade de um líder positivo se propagando na nuvem (evento C).

Figura 4.17 – Raio ascendente – UP 76.

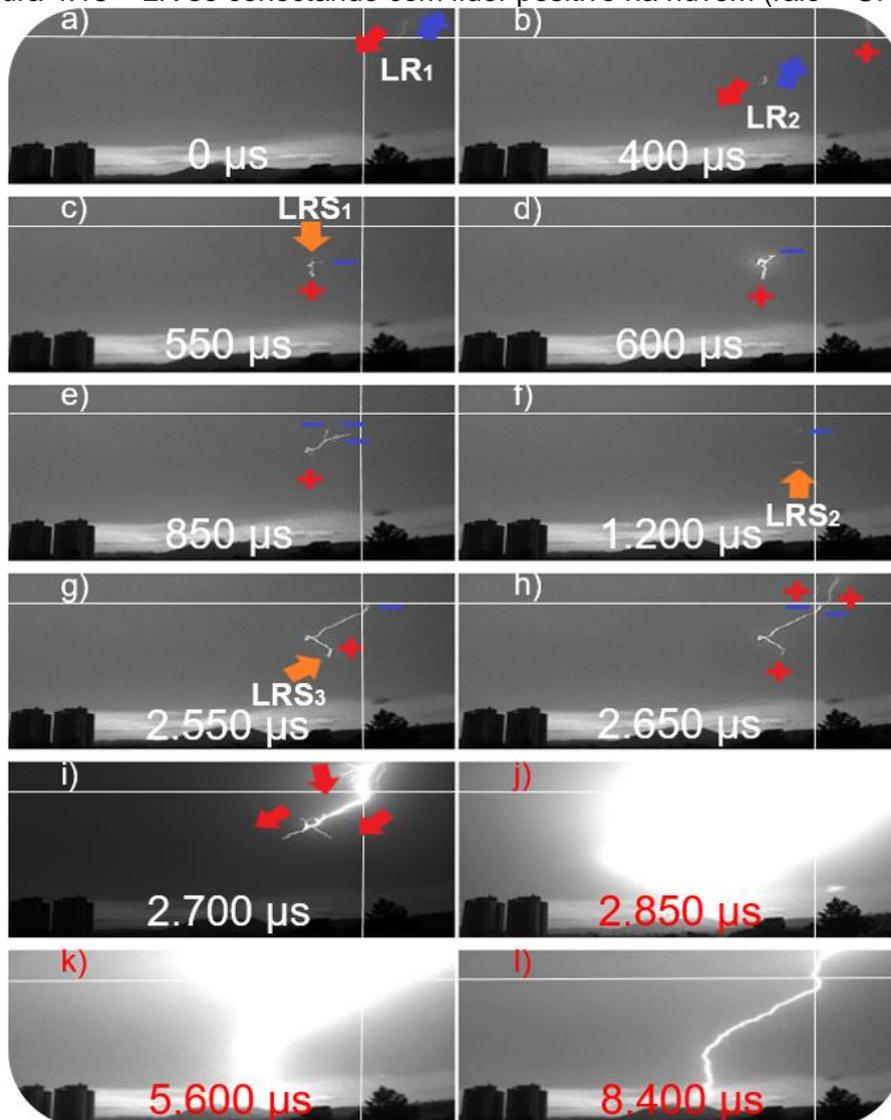


Fonte: Produção do autor.

O LR que se conectou com o líder positivo na nuvem (Figura 4.18) surgiu nos ramos decaídos do segundo líder ascendente positivo (evento B). A região de

origem do LR está sendo mostrada pelo ponto de intersecção entre as duas retas horizontal e vertical. O evento B produziu ICC com duração de 157 ms.

Figura 4.18 – LR se conectando com Líder positivo na nuvem (raio – UP 76).



A imagem mostra a origem de um LR em um canal decaído de um raio ascendente. Ele desenvolve e se conecta com um LR originado na nuvem (imagem h). O cruzamento das linhas horizontal e vertical nas imagens mostra o local da conexão. Em seguida, o líder positivo na nuvem se propaga em direção ao solo, gerando uma descarga de retorno subsequente positiva (imagem j).

Fonte: Produção do autor.

Em a) surge o LR<sub>1</sub> (canto superior direito) em um ramo decaído do líder positivo que se propagava na nuvem (Figura 4.17 – evento C). Em b) origina-se

o LR<sub>2</sub> em um ramo decaído do raio ascendente negativo (Figura 4.17 – evento B). A sua origem é impulsionada pela intensificação do campo elétrico gerada pelo líder positivo na nuvem. Em c) ocorre o LRS<sub>1</sub>, que cede energia para o LR<sub>2</sub> reionizar o canal decaído do raio ascendente negativo.

Posteriormente, o LR<sub>2</sub> continua se desenvolvendo em direção a nuvem. Em f) e g), surgem os LRS<sub>2</sub> e <sub>3</sub> que cedem energia para que o LR<sub>2</sub> continue se desenvolvendo em direção a nuvem. Em h) é possível observar a presença de novos LR associados ao evento C. A extremidade negativa do LR<sub>2</sub> se conecta com a extremidade positiva do LR na nuvem. Por fim, o líder positivo (evento C) refaz o canal criado pela conexão, se desenvolvendo em direção a torre de telecomunicação. Em j) ocorre a descarga de retorno subsequente positiva. As demais imagens mostram a corrente contínua longa com duração de 227 ms.

#### **4.3.3 Considerações finais (descargas de retorno subsequentes positivas)**

Os casos analisados sugerem quais são as condições necessárias para a ocorrência de descargas subsequentes positivas em raios ascendentes negativos. Esses LR tenderão a se propagar em direção ao líder positivo. Como visto anteriormente, muitas vezes os LR criados não possuem energia suficiente para reionizar o canal decaído do líder ascendente positivo, sendo necessária a presença de LRS. Ao se conectarem com o líder positivo na nuvem, este refaz todo o trajeto e atinge a torre no mesmo ponto de iniciação do raio ascendente negativo. Os efeitos das correntes contínuas longas produzidas pelas descargas de retorno subsequentes positivas somados aos efeitos das correntes iniciais dos raios ascendentes negativos potencializam os danos gerados as estruturas atingidas.

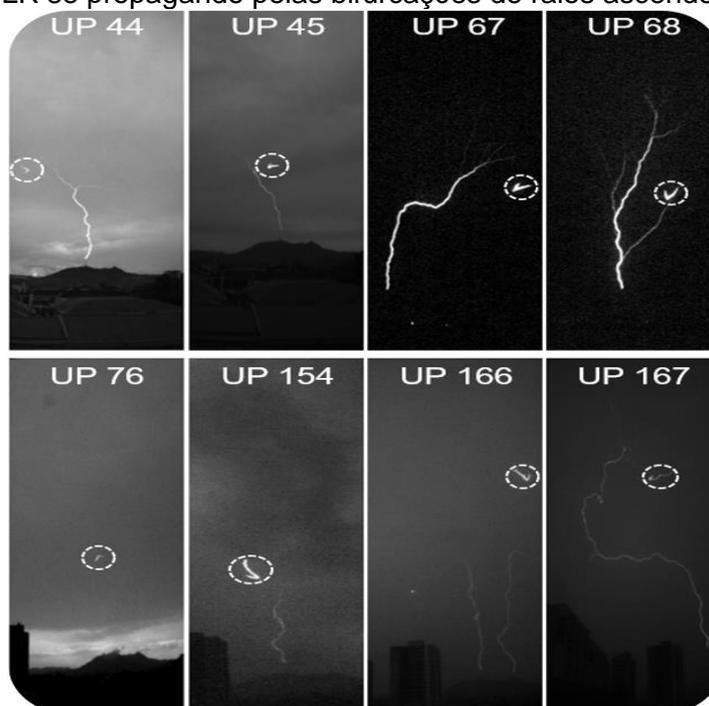
No raio ascendente negativo – UP 44 o tempo da ICC foi obtido quando o líder já estava desenvolvido, apresentando um tempo de 142 ms e a descarga de retorno subsequente positiva produziu corrente contínua longa de 406 ms. Somando as duas obtém-se um intervalo total de 548 ms de exposição à

corrente contínua. Para o raio ascendente negativo – UP 76 a ICC foi de 157 ms e a corrente contínua longa produzida pela descarga de retorno subsequente positiva foi de 227 ms. Somando as duas obtém-se 384 ms de corrente contínua. Os dois intervalos são bastante expressivos o que sugere, portanto, que esses eventos são potencialmente muito prejudiciais às estruturas atingidas. Os resultados dessa pesquisa poderão, no futuro, ser levados em consideração na atualização das atuais normas de proteção contra descargas atmosféricas, uma vez que o potencial de avarias nas estruturas atingidas por esses tipos de eventos é significativo.

#### 4.4 Líder de recuo do tipo “V”

Em todos os casos observados foi possível visualizar uma tendência de propagação dos LR pelas bifurcações dos raios ascendentes negativos, apresentando um padrão característico (Figura 4.19).

Figura 4.19 – LR se propagando pelas bifurcações de raios ascendentes negativos.

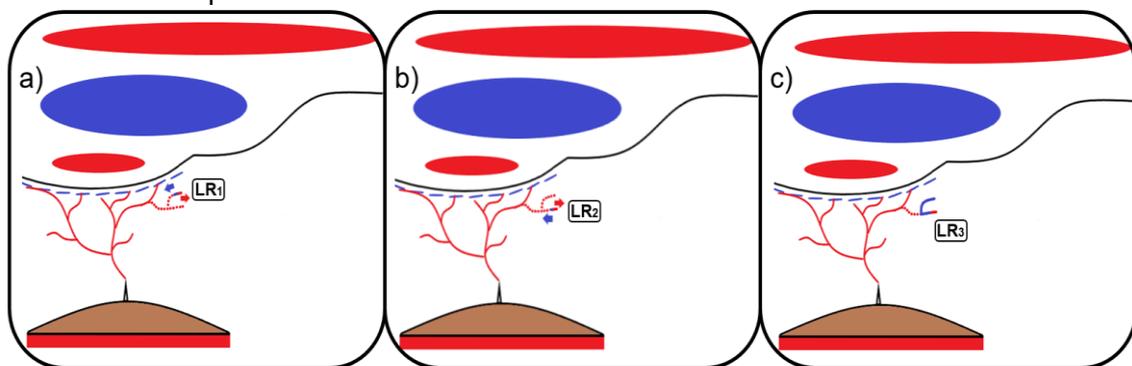


Os círculos na imagem representam LR se propagando pelas bifurcações dos raios ascendentes negativos.

Fonte: Produção do autor.

Esse padrão ocorre quando o LR encontra uma bifurcação e, ao invés de prosseguir descendo pelo ramo principal que deu origem a ela, prossegue pelo outro ramo da bifurcação. Esse evento foi discutido pela primeira vez na literatura por Warner et al. (2011). Os autores mostraram que o LR ao se propagar por uma bifurcação gera luminosidade em forma de “V”, ou um padrão de “marca de verificação”. Esse mesmo fenômeno será denominado neste trabalho como LR do tipo “V”. Warner et al. (2011) apenas descrevem o LR do tipo “V” e comentam brevemente que o LR tendeu a se propagar pela bifurcação, pois esta região poderia estar mais condutiva que o canal principal. Pensando nessa possibilidade, foi idealizada uma hipótese para explicar esse comportamento. Foi observado que esse tipo de LR ocorre após o desenvolvimento de alguns LR pelos ramos decaídos dos raios ascendentes. A Figura 4.20 mostra LR prévios iniciados antes do LR do tipo “V” em raios ascendentes negativos.

Figura 4.20 – LR prévios aquecendo e reionizando os canais do líder ascendente positivo.

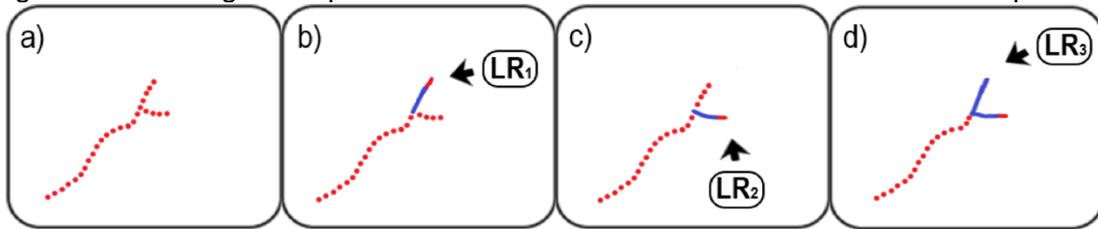


A sequência de imagens mostra dois LR reionizando canais da bifurcação de um raio ascendente negativo, tornando-os mais condutivos. Em seguida, surge o terceiro LR que tende a se propagar pela bifurcação, apresentando o padrão característico.

Fonte: Produção do autor.

A Figura 4.21 mostra a ampliação de um canal decaído de um líder ascendente positivo, com LR prévios deixando o canal da bifurcação mais condutivo que o canal principal.

Figura 4.21 – Imagem ampliada de um canal decaído de um líder ascendente positivo.



A figura acima mostra a representação ampliada de LR se propagando por canais decaídos de um raio ascendente negativo. Os dois primeiros LR reionizaram os canais da bifurcação, tornando-os mais condutivos. E em seguida, surge o LR do tipo “V”.

Fonte: Produção do autor.

Em a) está representado um trecho de canal decaído do raio ascendente negativo que apresenta uma bifurcação. Em b) surge o LR<sub>1</sub> em um dos ramos da bifurcação desse canal. Em seguida, na imagem c), surge o LR<sub>2</sub> no outro ramo do canal do raio ascendente negativo. Os dois ramos fazem parte da mesma bifurcação, os LR se propagam apenas em um dos ramos e não se desenvolvem muito. Acredita-se que os LR<sub>1</sub> e <sub>2</sub> aquecem essa parte do canal, deixando-a ionizada por processos térmicos. Posteriormente, surge o LR<sub>3</sub>, mostrado na imagem d), que se propaga pelos dois ramos, pois estão mais ionizados e mais condutivos em relação ao canal principal do líder ascendente positivo, gerando o padrão característico do LR do tipo “V”.

Essa hipótese se baseia na similaridade observada em descargas de retorno subsequentes em raios descendentes negativos. Após ocorrer o decaimento da corrente na extremidade positiva do raio NS- dentro da nuvem, inicia-se um LR que se propaga pelo canal em direção ao solo. Esse LR pode se desenvolver pelo mesmo canal, anteriormente criado, tocando o solo em um mesmo ponto (líder contínuo). Ou pode gerar um novo caminho, tocando o solo em um ponto diferente (líder contínuo-escalonado). Por meio da análise dos raios descendentes negativos é possível determinar a tendência dos LR se propagarem pelos mesmos canais.

Para entender essa tendência de propagação dos LR foi feito um levantamento histórico que exhibe essa característica. Em 1962, foi mostrado que quando um LR surge em um tempo menor que 100 ms, logo após o canal do líder positivo decair, um líder contínuo (propagando-se pelo mesmo canal) é formado. E

quando ele surge em um tempo maior que 100 ms, um líder contínuo escalonado é originado (se propaga em um novo canal) (BROOK; KITAGAWA; WORKMAN, 1962). Posteriormente, Rakov e Uman (1990) observaram em uma amostra de 115 descargas de retorno subsequentes, que 22 dessas descargas ocorriam no mesmo canal em um tempo superior a 100 ms. Nesse intervalo de tempo não havia surgimento de um novo ponto de contato no solo, mostrando que a teoria de Kitagawa, Brook e Workman (1962) estava errada.

Em seguida, Ferro, Saba e Pinto Junior (2012) analisaram uma amostra de 186 raios NS-, observando 736 descargas de retorno subsequentes. Sendo mostrado que para um tempo médio de 34,4 ms ocorriam líderes contínuos, após duas ou mais descargas de retorno subsequente. E para um tempo médio de 119,8 ms era possível observar um líder contínuo escalonado, criando um novo ponto de contato no solo. Essa informação se contradiz com o que foi mostrado por Rakov e Uman (1990), pois a amostragem de dados nesta pesquisa era maior. Nela também foi mostrado que o número de LR que ocorrem no canal do raio reforçam o desenvolvimento de líderes contínuos.

Portanto, para comprovar a hipótese da tendência de propagação dos LR por bifurcações de raios ascendentes negativos deverá ser observado se ocorreram LR precedentes nas bifurcações dos raios ascendentes, como mostra a Figura 4.21. Aquecendo e mantendo-o mais condutivo em relação ao restante do canal, fazendo com que o LR tenda a se propagar pelas ramificações.

#### **4.4.1 Análise de câmera rápida**

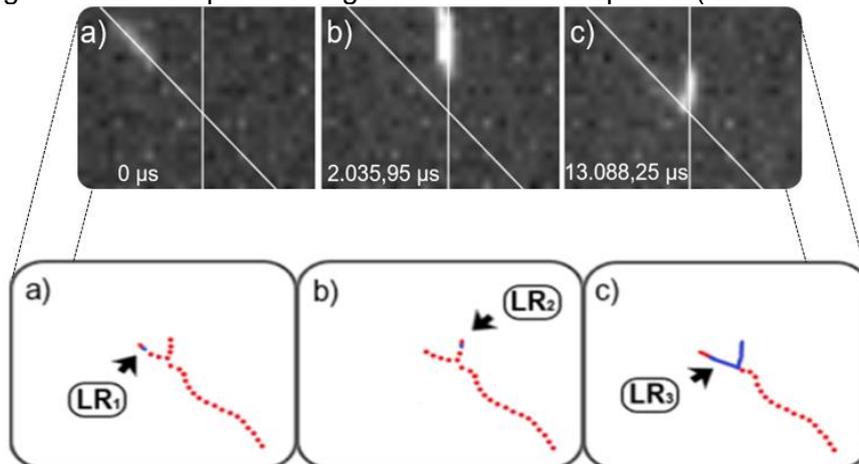
Os LR do tipo “V” ocorrem em um curto intervalo de tempo, portanto, para explicá-los foram estudados os raios filmados com taxa de aquisição superior a 10.000 ips, sendo excluídos os raios UP 44 e 45. Obteve-se uma amostra de 150 LR se propagando pelas bifurcações dos raios ascendentes negativos. As observações mostraram que o LR do tipo “V” se desenvolve de três formas: 1) originado após ocorrer LR prévios pelo canal (60 LR); 2) gerado sem a

presença de LR precedentes em seu canal (35 LR); 3) iniciado no ponto de bifurcação do canal do raio ascendente negativo (55 LR).

#### 4.4.1.1 Refutação da hipótese dos líderes de recuo prévios

Ao analisar os eventos percebeu-se que 40% da amostra (60 de 150 LR) apresentaram LR prévios. Pode-se notar que eles reionizavam parcialmente ou integralmente o canal, onde o terceiro LR se desenvolveria pela bifurcação. Um exemplo desses LR prévios que reionizaram parcialmente os canais da bifurcação é mostrado pela Figura 4.22. Os LR foram observados no raio ascendente negativo – UP 154. O primeiro LR prévio se origina em 107.485,07  $\mu$ s no vídeo.

Figura 4.22 – LR prévios originando um LR do tipo “V” (raio – UP 154).



A sequência de imagens mostra dois LR prévios reionizando parcialmente as bifurcações de um canal decaído de um raio ascendente negativo. Em seguida, um terceiro LR surge e se propaga pela bifurcação, apresentando o padrão comum observado (imagem c).

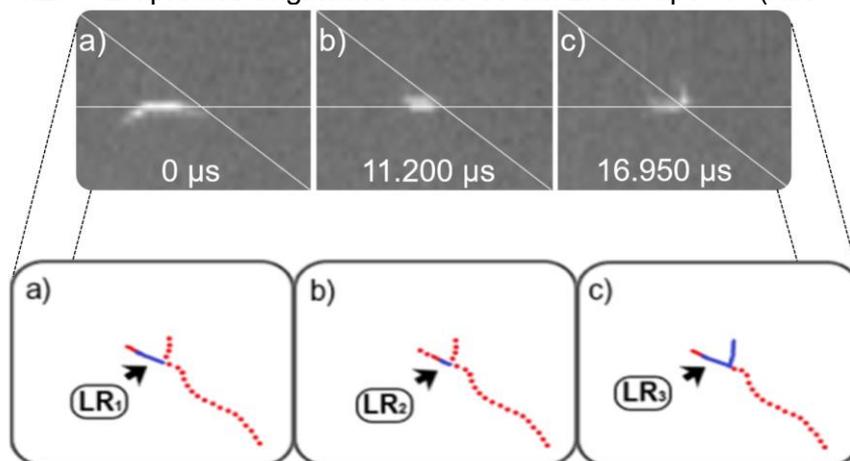
Fonte: Produção do autor.

Em a) é mostrada a origem do LR<sub>1</sub> em um dos canais da bifurcação (extremidade positiva representada pela cor vermelha e a negativa pela azul). Percebe-se que esse líder reioniza parcialmente o canal. Em b) surge o LR<sub>2</sub> que também reioniza parcialmente o segundo ramo da bifurcação. Por fim, em c), surge o LR<sub>3</sub> que tende a se propagar pela bifurcação. Os LR<sub>1</sub> e 2 se

desenvolveram parcialmente pelos canais da bifurcação. Segundo a hipótese idealizada para explicar esse comportamento, esses LR deveriam se propagar por todo o canal, reionizando e deixando-o mais condutivo, porém isso não ocorre. Essa característica foi observada em vários casos, mostrando a primeira divergência com a hipótese.

Um outro exemplo que invalida a hipótese do aquecimento dos ramos das bifurcações do líder ascendente positivo é o de LR prévios se originando apenas em um dos ramos da bifurcação. O evento analisado ocorreu no raio ascendente negativo – UP 76. O primeiro LR precedente foi iniciado no vídeo em 799.792  $\mu\text{s}$  (Figura 4.23).

Figura 4.23 – LR prévios originados antes de um LR do tipo “V” (raio – UP 76).



A sequência de imagens mostra dois LR prévios reionizando um único ramo da bifurcação de um raio ascendente negativo. Em seguida, surge um terceiro LR que se propaga pela bifurcação, apresentando o padrão característico observado.

Fonte: Produção do autor.

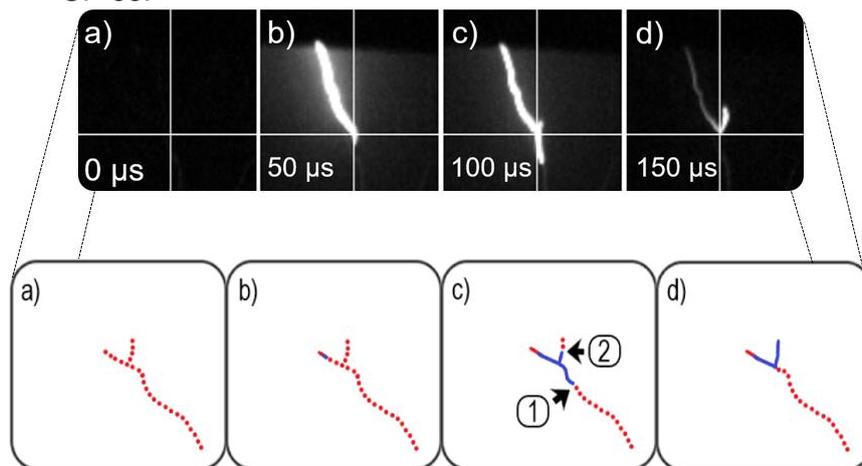
Em a) ocorre a origem do LR<sub>1</sub> em um ramo da bifurcação do líder ascendente positivo (extremidade negativa representada pela cor azul e positiva pela vermelha). Em b) surge o LR<sub>2</sub>, ocorrendo no mesmo ramo do primeiro. Por fim, em c), surge o LR<sub>3</sub> que se desenvolve em ambos os ramos da bifurcação, apresentando o perfil analisado. Esse caso proporcionou mais um fator para invalidar a hipótese do aquecimento dos canais da bifurcação por LR prévios. Os LR precedentes surgem no mesmo ramo aquecendo e reionizando apenas

um dos dois ramos da bifurcação. Portanto, o LR<sub>3</sub> não deveria se propagar pelo segundo ramo. Outro fator que invalida a hipótese proposta são os 23,3% da amostra total (35 de 150 LR) que são LR do tipo “V” que surgiram sem a presença de LR prévios. Com isso, prova-se que Warner et al. (2011) estavam errados, os ramos da bifurcação não estão mais condutivos. Portanto, o LR do tipo “V” se forma por outros processos, sendo explicados nas próximas seções.

#### 4.4.1.2 Divisão da corrente do líder de recuo

Como a hipótese dos LR prévios aquecendo os ramos da bifurcação dos líderes ascendentes positivos foi refutada, juntou-se a amostra dos LR do tipo “V” que ocorreram com e sem a presença de LR prévios, representando 63,3% da amostra total dos LR analisados (95 de 150). Em todos esses casos percebeu-se que esses LR dividiam a corrente quando chegavam no ponto de bifurcação, gerando o LR do tipo “V”. A Figura 4.24 mostra um LR que se originou em um dos ramos decaídos do raio ascendente negativo – UP 68, iniciado no vídeo em 902.922  $\mu$ s.

Figura 4.24 – Divisão da corrente do LR pela bifurcação do raio ascendente negativo – UP 68.



A sequência de imagens mostra um LR dividindo a sua corrente em uma bifurcação de um canal decaído de um raio ascendente negativo. Parte da corrente do LR se propaga em direção ao canal principal e outra parte se direciona para o canal da bifurcação. Em seguida, a corrente do canal principal cessa, restando apenas a corrente na bifurcação.

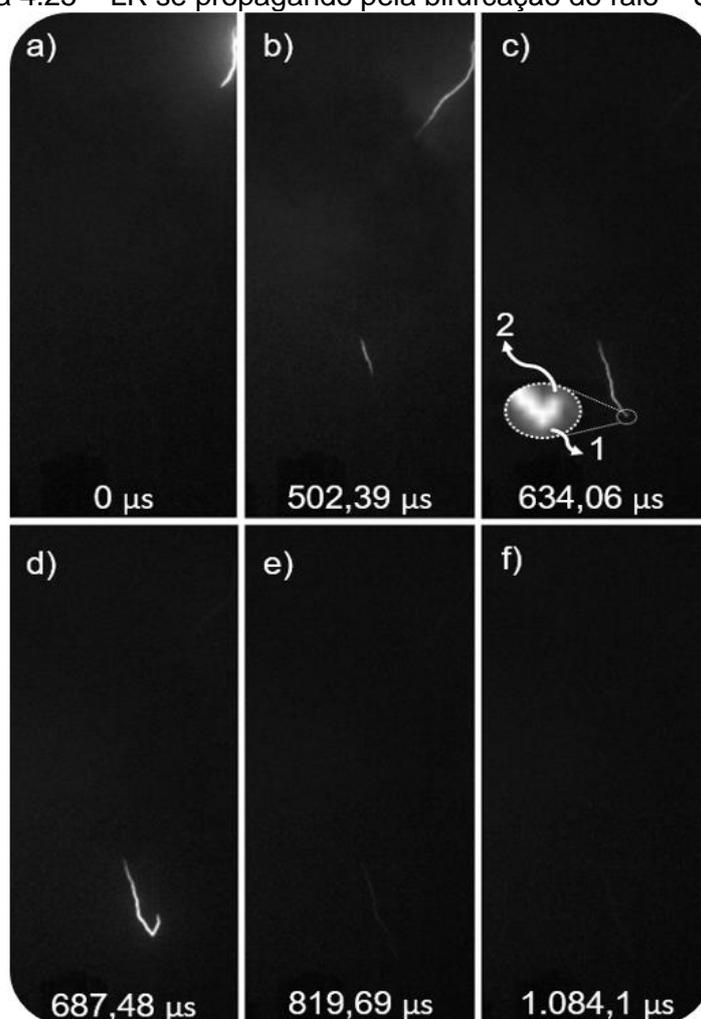
Fonte: Produção do autor.

Em a) está representado um canal decaído do raio ascendente negativo (linha pontilhada vermelha). Em b) ocorre a origem do LR analisado em um dos ramos da bifurcação. A extremidade positiva é representada pela cor vermelha e a negativa pela azul. Em c) a extremidade negativa do LR passa pela bifurcação e divide a corrente, parte se propaga em direção ao outro ramo da bifurcação e outra parte se desenvolve em direção ao canal principal. Por fim, em d), a luminosidade do canal principal cessa, restando apenas a da bifurcação.

Concluiu-se, partindo dessas observações, que os LR ao dividirem a corrente no ponto de bifurcação, poderão continuar ou não o seu desenvolvimento pelo canal decaído do líder ascendente positivo, dependendo apenas da ddp encontrada na frente da extremidade negativa desses líderes. Na

Figura 4.24 c) em (1) a ddp do LR não era suficientemente grande para continuar a reionização, cessando seu desenvolvimento. Enquanto, a sua ddp em (2) era suficientemente grande para continuar reionizando o outro ramo da bifurcação, continuando seu desenvolvimento, gerando o padrão observado. Esse padrão também foi observado em uma tentativa de líder que ocorreu no raio ascendente – UP 154. O raio em questão se bifurcou próximo a  $T_1$  no pico do Jaraguá (Figura 4.25). No vídeo o LR analisado se origina em 344.478  $\mu$ s.

Figura 4.25 – LR se propagando pela bifurcação do raio – UP 154.



A sequência de imagens mostra um LR se desenvolvendo em um canal decaído de um raio ascendente negativo, quando ele chega em uma bifurcação a sua corrente é dividida, parte se propaga em direção à ramificação (imagem c – canal 2) e a outra parte em direção ao canal principal (imagem c – canal 1).

Fonte: Produção do autor.

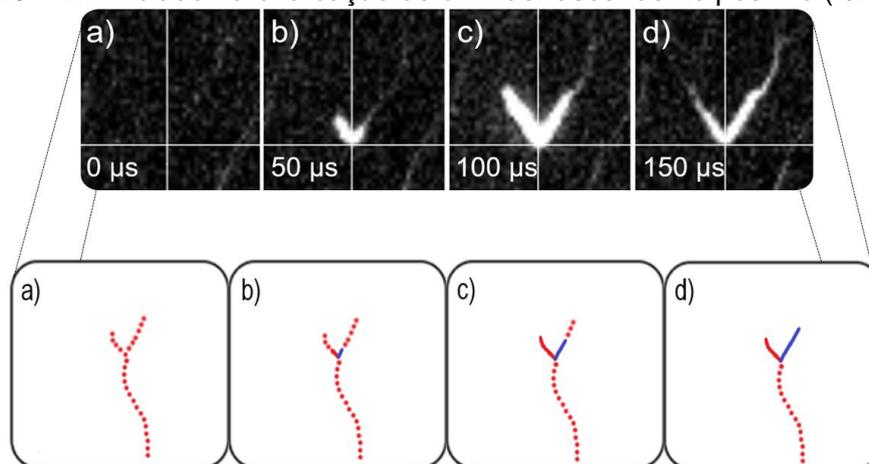
A imagem a) mostra a origem do LR em um dos canais decaídos do raio ascendente. Esse líder se desenvolve pelo canal e próximo à base da torre de telecomunicação encontra uma bifurcação, dividindo sua corrente. Em c) é possível ver a extremidade negativa do LR se propagando nas duas direções (1 e 2). Percebe-se que a extremidade (1) cessa seu desenvolvimento, pois a ddp não é suficientemente grande para continuar seu desenvolvimento, enquanto a extremidade (2) continua. Depois de um tempo o LR também cessa seu desenvolvimento no outro ramo da bifurcação, pois novamente a ddp não é suficientemente grande para reionizar o canal. Depois disso o canal decai,

gerando uma tentativa de líder. Esse comportamento ocorre apenas em parte da amostra, os demais casos serão explicados nas próximas seções

#### 4.4.1.3 Líder de recuo do tipo “V” iniciado no ponto de bifurcação

Por fim, 36,7% da amostra de LR analisados (55 de 150 LR) se originaram no ponto de bifurcação do canal do líder ascendente positivo. A Figura 4.26 mostra um LR iniciado na bifurcação do raio ascendente negativo – UP 68, originado no vídeo em 208.392  $\mu\text{s}$ .

Figura 4.26 – LR iniciado na bifurcação de um líder ascendente positivo (raio – UP 68).



A sequência de imagens mostra o desenvolvimento de um LR no ponto de bifurcação de um canal decaído de um raio ascendente negativo.

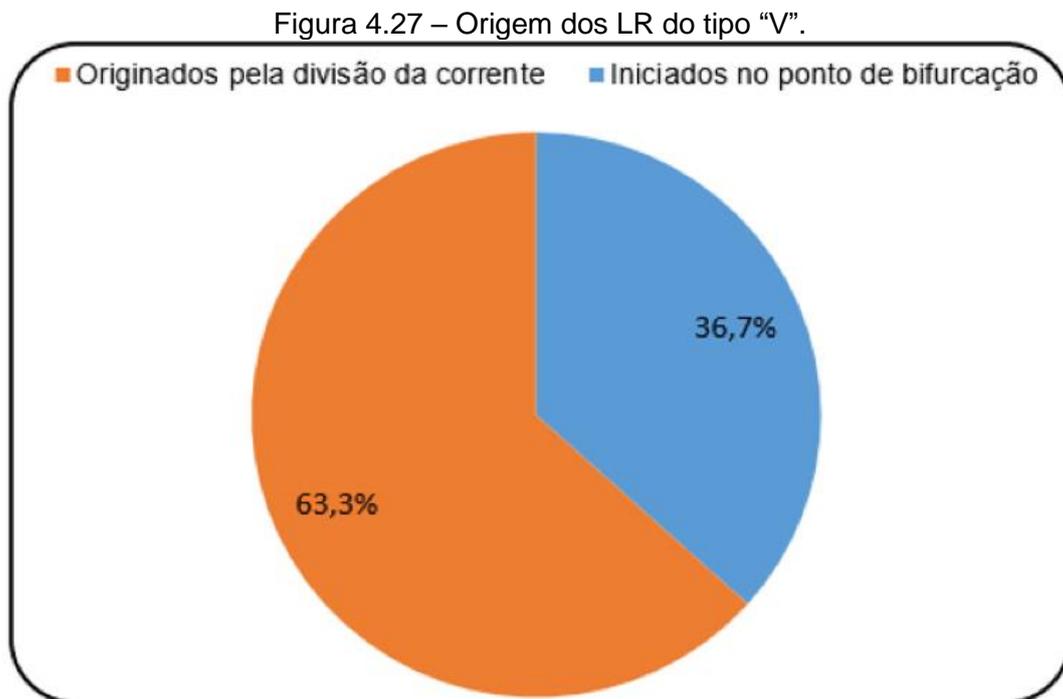
Fonte: Produção do autor.

Em a) é mostrada uma região ampliada de um canal decaído de um raio ascendente negativo (linha pontilhada vermelha). Em b) ocorre a origem do LR, sendo iniciado em um ponto de divisão da corrente do líder ascendente positivo. A extremidade negativa do LR (representada pela cor azul) se desenvolve pelo ramo da direita e a positiva (cor vermelha) no canal a esquerda. Em c) as duas extremidades do LR se desenvolvem. Por fim, em d), a extremidade positiva cessa sua propagação e a negativa continua se movimentando, decaindo depois de um tempo. Nesses casos, quando ocorre o corte da corrente do líder ascendente positivo, um canal condutor flutuante

polarizado desenvolve-se no ponto em que ocorreu a ramificação desse raio. Uma das extremidades do LR se propaga em um dos ramos e a outra pelo outro, originando o perfil do LR do tipo “V”.

#### 4.4.2 Considerações finais (Líder de recuo do tipo “V”)

Nas análises anteriores foi mostrado que os LR do tipo “V” podem ocorrer de duas formas. Uma em que os LR se originam no ponto de bifurcação dos canais decaídos de líderes positivos ascendentes e a outra pela divisão da corrente (Figura 4.27).



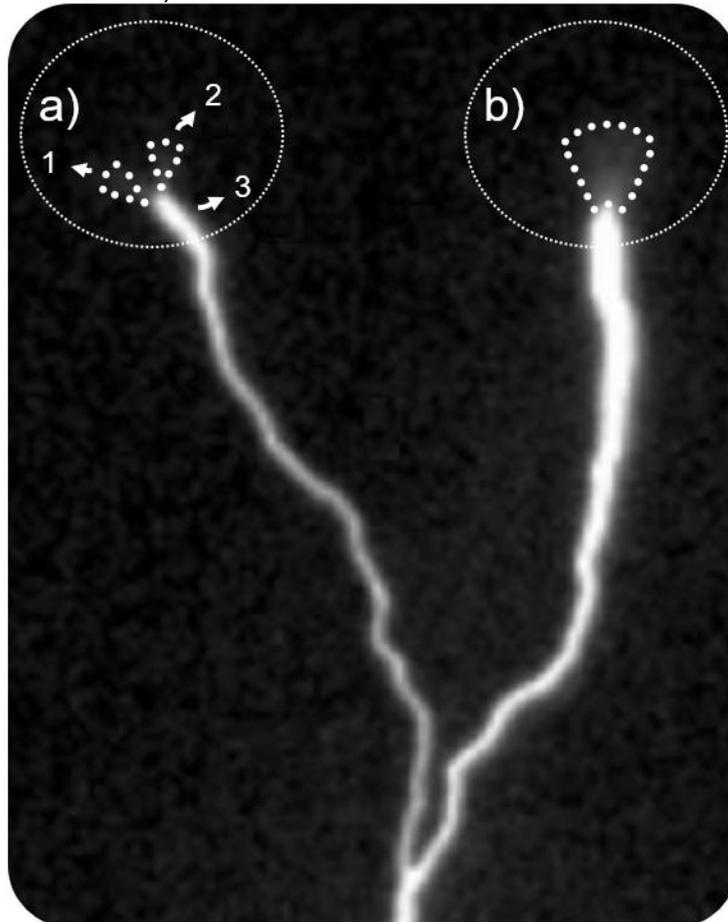
Fonte: Produção do autor.

Quando os LR dividem a corrente pelos ramos do raio ascendente, percebe-se que ocorre uma tendência de propagação pelos canais da bifurcação, ao invés deles continuarem se propagando pelo canal principal. Logo, a ddp necessária para que o LR reionize a bifurcação é menor do que a do canal principal.

Esse aspecto pode ser explicado pelo desenvolvimento do líder ascendente positivo. No processo de ramificação do raio ascendente negativo, percebe-se

que o canal principal divide sua corrente. A Figura 4.28 a) mostra o pincel de *streamers* no início da divisão da corrente de um líder ascendente positivo. E a Figura 4.28 b) revela o líder ascendente positivo se propagando sem ocorrer divisão da sua corrente.

Figura 4.28 – Divisão da corrente de um líder ascendente positivo (pincel de *streamers*).



A imagem exibe duas formas de pincel de *streamers* na frente da extremidade de um líder ascendente positivo. A imagem a) mostra o momento em que o líder se ramifica, percebe-se que a área do pincel de *streamers* se divide em duas regiões. Em b) é mostrado um exemplo de um líder positivo se propagando sem que ocorra divisão de corrente, a área do pincel de *streamer* é maior.

Fonte: Adaptado de Saba et al. (2020).

O pincel de *streamers* indica a região em que o líder positivo se desenvolverá, quanto maior a sua área de varredura, maior será sua seção transversal. Na Figura 4.28 a) o pincel de *streamers* se dividiu em duas direções (1 e 2),

ficando com uma área menor em cada uma delas. Portanto, os líderes ao se propagarem apresentarão uma área de seção transversal menor do que o canal principal (3). É possível observar essa característica em fotos de raios ascendentes. Um exemplo é mostrado no raio ascendente negativo – UP 67 (Figura 4.29).

Figura 4.29 – Canais com seções de áreas menores do que o canal principal (raio – UP 67).



As setas brancas na imagem indicam as ramificações do raio durante o seu desenvolvimento, percebe-se que elas estão mais atenuadas do que o canal principal (possuem área de seção transversal menor do que o canal principal).

Fonte: Produção do autor.

As setas mostram os canais na bifurcação, eles são aparentemente mais tênues do que o ramo principal. Com base nessa característica será analisado o decaimento desses líderes para os dois casos (ramo principal e bifurcação).

Para estudar o decaimento dos canais foram utilizados dados obtidos pelo INPE em pesquisas realizadas no Centro Nacional de Estudos de Raios Naturais e Trigados (PINTO JUNIOR et al., 2005). Nesse local havia uma base de lançamento de pequenos foguetes, com fio de cobre acoplado a eles. A

Figura 4.30 mostra a base de lançamento de foguetes para o desenvolvimento de raios induzidos.

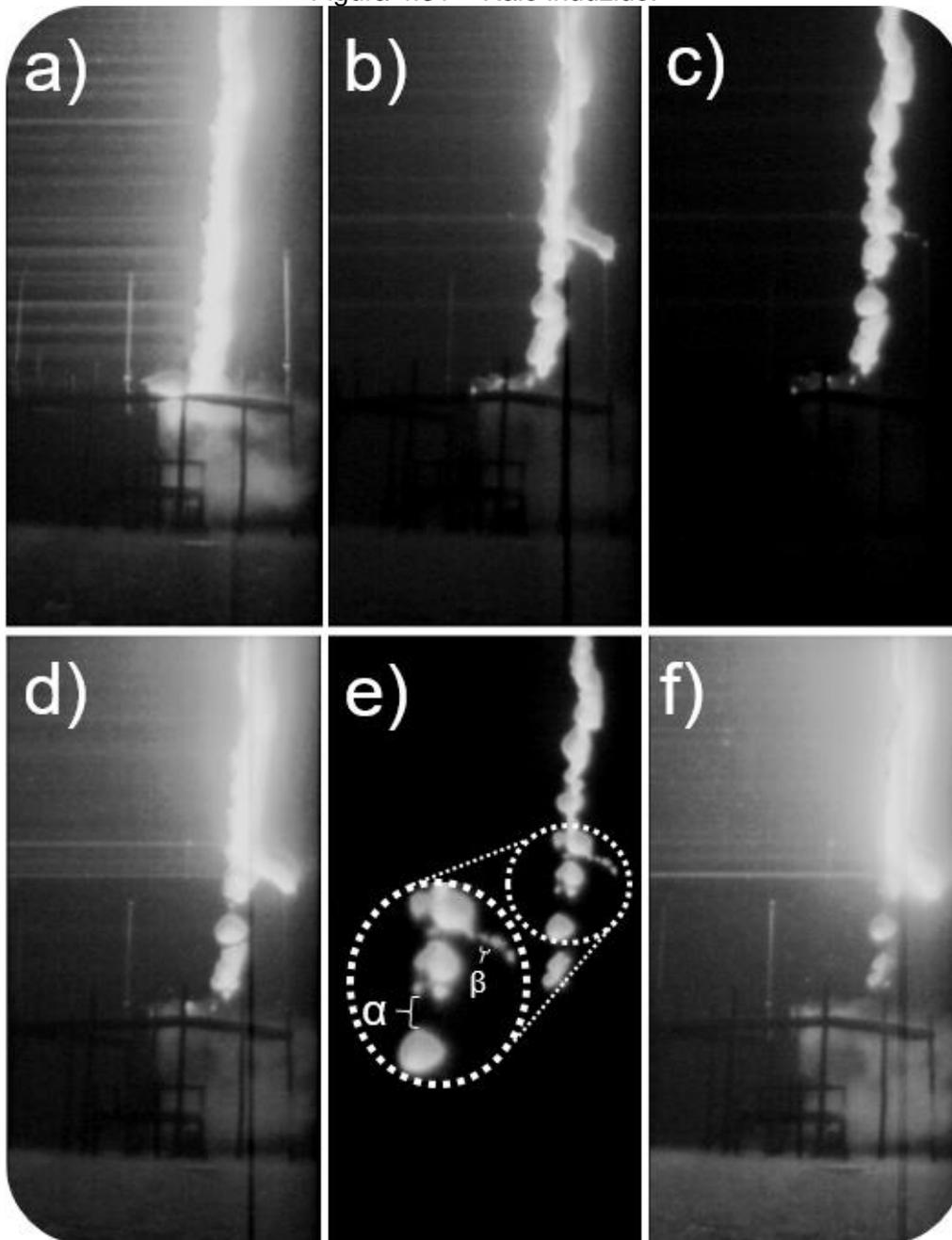
Figura 4.30 – Base de lançamento de foguetes para raios induzidos.



Fonte: Pinto Junior et al. (2005).

O foguete ao se mover verticalmente em direção à nuvem de tempestade gera uma rápida intensificação do campo elétrico, desencadeando o desenvolvimento de um líder bipolar bidirecional. Uma das extremidades do líder se propaga em direção à nuvem e a outra em direção ao solo a partir da extremidade inferior do fio condutor, se conectando a um dos para-raios instalados na base de lançamento. A Figura 4.31 mostra uma dessas conexões. Esse raio induzido foi filmado com uma câmera com taxa de aquisição de 1.000 ips.

Figura 4.31 – Raio induzido.



A sequência de imagens indica a formação de um raio induzido, que produziu algumas descargas de retornos subsequentes. O raio se conectou com dois para-raios na base de lançamento. Nela é possível observar o decaimento do canal do raio.

Fonte: Produção do autor.

A imagem a) mostra a conexão de um raio induzido com a base de lançamento. O vento nessa região estava intenso, gerando o deslocamento do canal do raio para o lado onde se encontra uma haste para-raios. Na imagem b), percebe-se o decaimento do líder que conectou na base de lançamento e

uma conexão lateral com a haste para-raios. Com o rompimento do canal surge um LR. Ele refaz o trajeto decaído e se bifurca, realizando uma nova conexão lateral com a haste para-raios. Na imagem b) é possível observar que a área de seção transversal da bifurcação é menor. Em c) o canal decaí novamente. Em seguida, em d), ocorre outro LR que se conecta mais uma vez na haste para-raios. Em e) observa-se o canal se desfazendo novamente. Percebe-se que os canais de plasma flutuantes são maiores no canal principal, devido a sua área de seção transversal ser maior que a da bifurcação. Isso resulta em um espaçamento maior entre os canais condutores flutuantes que, ao decaírem, se distanciam ainda mais. Enquanto na bifurcação lateral o espaço entre os canais condutores flutuantes é menor (a distância de  $\alpha > \beta$ ). Em f) novamente surge outro LR, que refaz o canal na bifurcação, atingindo o segundo para-raios.

Assumindo esse mesmo perfil para os líderes ascendentes positivos, conclui-se que as bifurcações (canais com área de seção transversal menor) possuirão canais de plasmas flutuantes com dimensões e espaçamento menores que o canal principal. Desta forma, no processo de reionização do raio ascendente, o LR terá que vencer esses *gaps* pelo caminho. Como o campo elétrico é inversamente proporcional à distância ao quadrado, quanto mais próximo estiverem esses canais flutuantes (*gap* menor), mais intenso será o campo elétrico na região, ocorrendo mais facilmente a quebra de rigidez dielétrica do ar. Destarte, o LR, ao encontrar uma ramificação pelo canal decaído de um raio ascendente, dividirá a sua corrente, tendendo a se propagar em direção à bifurcação, pois os *gaps* dos canais flutuantes são menores. Essa característica explica o padrão observado pelos LR do tipo “V” em raios ascendentes negativos.

Para que o LR se desenvolva pelo canal principal (*gap* maior) é necessário que ele tenha muito mais energia, pois o campo elétrico terá que ser maior. Isso é bem perceptível nos vídeos: LR com maior luminosidade tende a continuar se propagando em direção ao canal principal, enquanto LR com menor luminosidade se move em direção a bifurcação.

## 5 CONCLUSÃO

O objetivo desta pesquisa é estudar os processos de propagação dos LR em raios ascendentes negativos. Durante o desenvolvimento deste trabalho foram analisados oito raios ascendentes negativos (UP – 44, 45, 67, 68, 76, 154, 166 e 167). Nas análises encontrou-se quatro características inéditas sobre os LR. Os resultados obtidos foram agrupados de duas formas: 1 Resultados associados aos processos físicos ocasionados por LR em raios ascendentes negativos; 2 Resultados relacionados a iniciação e propagação de LR em raios ascendentes negativos pela interação de raios intranuvem.

1) Resultados associados aos processos físicos ocasionados por LR em raios ascendentes negativos: Para esse subgrupo foram observadas duas características inéditas que ampliaram o conhecimento sobre alguns processos físicos observados nesses raios: a) LRS; b) LR do tipo “V”.

a) LRS: A primeira característica observada foi a de canais flutuantes se propagando e conectando a eventos de LR. Esses canais flutuantes foram observados pela primeira vez por Wu et al. (2019). Durante o desenvolvimento dessa pesquisa foram analisados dados de oito raios ascendentes negativos. Observou-se que todos os canais flutuantes examinados nesses eventos, se desenvolviam em canais decaídos de líderes positivos, sendo classificados como LRS. O presente trabalho também mostrou a importância desses LRS no desenvolvimento de LR precedentes sobre os ramos decaídos de líderes positivos. Foi mostrado que os LRS cedem energia para que os LR precedentes continuem se propagando, influenciando diretamente o desenvolvimento de líderes contínuos, pulsos de corrente contínua inicial e componentes M que são processos básicos em descargas atmosféricas. Nessa pesquisa também foi mostrado que para um LR se propagar pelo canal decaído de um líder positivo, ele dependerá de dois fatores: da ionização desse canal e da intensidade do LR (representado pela luminosidade nos vídeos de câmeras rápidas). Quanto maior for a luminosidade dos LR e mais ionizado estiver o canal, mais facilmente ele se desenvolverá. Porém, se essas características não forem satisfeitas, o LR necessitará ser reenergizado por LRS para dar

origem a pulsos de corrente contínua inicial, componentes M e líderes contínuos.

b) LR do tipo "V": A segunda propriedade relacionada aos processos físicos gerados por LR em raios ascendentes negativos está associada à tendência do LR a se propagar pelas bifurcações dos canais decaídos de líderes ascendentes positivos (LR do tipo "V"). Os primeiros a observarem esse fenômeno foram Warner et al. (2011). Como tentativa de explicar o evento, eles imaginaram que os canais na bifurcação estariam mais condutivos, por isso os LR tenderiam a se propagar por eles. Nesta pesquisa de mestrado utilizou-se a mesma linha de raciocínio, sendo proposto que LR prévios reionizariam as bifurcações, deixando esses canais mais condutivo. Porém, foi mostrado durante o desenvolvimento do trabalho que essa reionização não ocorre. O mecanismo para explicar essa característica é outro. Percebeu-se que os LR do tipo "V" ocorrem de duas formas: por LR iniciados nas bifurcações; e por LR que dividem a sua corrente quando passam por um ponto de bifurcação. Na divisão da corrente descobriu-se que os LR tendem a se propagar pela bifurcação, pois nesse ponto a ddp necessária para reionizar o canal é menor do que a do canal principal. Os ramos da bifurcação possuem seção de área transversal menor que o canal principal, fazendo com que os canais de plasmas flutuantes permaneçam mais próximos, tornando mais fácil a quebra de rigidez dielétrica do ar. Essa característica ajuda a entender como o processo de tentativa de líder ocorre. A ddp necessária para que o LR reionize o canal principal deverá ser maior do que nos ramos das bifurcações. Essa característica reforça a ideia de que os LR prévios com pouca luminosidade necessitam de LRS para gerarem pulsos de corrente contínua inicial, componentes M e líderes contínuos.

2) Resultados relacionados com a iniciação e propagação de LR em raios ascendentes negativos pela interação de raios intranuvem: Nesse subgrupo também foram discutidas duas características inéditas: a) impulsionamento do desenvolvimento de LR; b) primeiros registros de descargas de retorno subsequentes positivas observadas em raios ascendentes negativos.

a) Impulsionalamento do desenvolvimento de LR: O primeiro aspecto analisado nesse subgrupo foi o de líderes dentro da nuvem de tempestade influenciando o desenvolvimento de LR sobre os ramos decaídos de raios ascendentes negativos. Alguns raios ascendentes negativos são acompanhados de atividade de raios intranuvem. Os líderes dentro da nuvem ao se propagarem intensificam o campo elétrico em seu entorno, impulsionalando o desenvolvimento de LR em canais decaídos de raios ascendentes negativos. Mais cargas são acumuladas nas extremidades dos canais condutores flutuantes, forçando a propagação dos LR. Também foi mostrado que a extremidade negativa de LR que surgem em canais decaídos de raios ascendentes negativos, tendem a se mover em direção a líderes positivos que se propagam na nuvem, podendo gerar conexões.

b) Primeiros registros de descargas de retorno subsequentes positiva observadas em raios ascendentes negativos: Por fim, a última característica analisada foi de conexões de LR com líderes positivos na nuvem, que ocorreram graças à reenergização gerada por LRS. Quando ocorre a conexão, o líder positivo refaz o caminho do LR e continua se propagando em direção ao ponto de início do raio ascendente negativo, gerando uma descarga de retorno subsequente positiva. Esse processo nunca foi descrito anteriormente pois o que sempre se observou em raios ascendentes negativos foram descargas de retorno negativas acontecendo no canal traçado por líderes ascendentes positivos que parte das estruturas altas. Outro aspecto é que as correntes contínuas nessas descargas de retorno subsequentes positivas são bem mais longas do que as observadas em descargas de retorno negativas. Portanto, esses registros inéditos são importantes para que no futuro sejam levados em consideração nas normas de proteção contra descargas atmosféricas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBRECHT, R. I.; SABA, M. M. F.; SOUZA, J. C. S. Estudos das tempestades que geram raios ascendentes. In: SEMINÁRIOS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E INICIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO, 2015, São José dos Campos, SP. **Anais...** São José dos Campos, SP: 2015.

BALLAROTTI, M. G.; SABA, M. M. F.; PINTO JUNIOR, O. High-speed camera observations of negative ground flashes on a millisecond-scale. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 23, p. 1–4, 2005.

BROOK, M.; KITAGAWA, N. I.; WORKMAN, E. J. Quantitative study of strokes and continuing currents in lightning discharges to ground. **Jornal of Geophysical Research**, v. 67, n. 2, p. 649–659, 1962.

BROOKS, I. M.; SAUNDERS, C. P. R. Thunderstorm charging: laboratory experiments clarified. **Atmospheric Research**, v. 39, n. 4, p. 263–273, 1995.

CAMPOS, L. Z. S. **On the mechanisms that lead to multiple ground contacts in lightning**. 2016. 283 p. Thesis (PhD in Space Geophysics) – National Institute for Space Research (INPE), São José dos Campos, 2016.

COORAY, V. **The lightning flash**. 2. ed. United Kingdom: IET Power and Energy Series 69, 2014. 897 p. ISBN (9781849196925).

COORAY, V. **An introduction to lightning**. Uppsala, Sweden: Springer, 2015. 391 p. ISBN(9789401789387).

FERRO, M. A. S. **Características dos relâmpagos nuvem-solo negativos que apresentam múltiplos canais**. 2008. 245 p. (INPE-15400-TDI/144). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2008.

FERRO, M. A. S. **Apostila lightning physics**. São José dos Campos, SP: INPE, s.d. 164 p.

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

HARE, B. M.; et al. Needle-like structures discovered on positively charged lightning branches. **Nature**, v. 568, n. 7752, p. 360–363, 2019.

HARRISON, R. Atmospheric electricity and cloud microphysics. **Cern European Organization for Nuclear Research-Reports-Cern**, p. 75–86, 2001.

HECKMAN, S. **Why does a lightning flash have multiple strokes?** 1992. 134 p. Thesis (PhD in philosophy) – Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, Massachusetts (EUA), 1992.

HEIDLER, F. H.; MANHARDT, M.; STIMPER, K. The slow-varying electric field of negative upward lightning initiated by the Peissenberg tower, Germany. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 55, n. 2, p. 353–361, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Glossário**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/glossario/massa-de-ar>. Acesso em: 3 mar. 2021.

JENSEN, D. P.; SONNENFELD, R. G.; STANLEY, M. A.; EDENS, H. E.; DA SILVA, C. L.; KREHBIEL, P. R. Dart-leader and K-leader velocity from initiation site to termination time-resolved with 3D interferometry. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 126, n. 9, p. 1–27, 2021.

JIANG, R.; LYU, W.; WU, B.; QI, Q.; CHEN, L.; MA, Y.; LYU, F.; ZHU, Y.; RAKOV, V. A. First documented downward positive cloud-to-ground lightning initiated by an upward negative lightning. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 2021a.

JIANG, R.; YUAN, S.; QIE, X.; LIU, M.; WANG, D. Activation of abundant recoil leaders and their promotion effect on the negative-end breakdown in an intracloud lightning flash. **Geophysical Research Letters**, 2021b.

KASEMIR, H. W. Qualitative übersicht ueber potential-feld und ladungsverhältnisse bei einer blitzentladung in der bewitterwolke. In: MAYER-TASCH, P. C. (Ed.). **Das gewitter**. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Ges. Geest und Portig K. -G, 1950. p. 112–125.

MAZUR, V. A physical model of lightning initiation on aircraft in thunderstorms. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. D3, p. 3326–3340, 1989.

MAZUR, V. Physical processes during development of lightning flashes. **Comptes Rendus Physique**, v. 3, n. 10, p. 1393–1409, 2002.

MAZUR, V. The physical concept of recoil leader formation. **Journal of Electrostatics**, v. 82, p. 79–87, 2016.

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

MAZUR, V.; RUHNKE, L. H.; WARNER, T. A.; ORVILLE, R. E. Recoil leader formation and development. **Journal of Electrostatics**, v. 71, n. 4, p. 763–768, 2013.

MONTANYA, J.; VAN DER VELDE, O.; WILLIAMS, E. R. The start of lightning: Evidence of bidirectional lightning initiation. **Scientific Reports**, v. 5, p. 1–6, 2015.

OGAWA, T. Lightning currents. In: VOLLAND, H. (Ed.). **Handbook of atmospheric electrodynamics**. Boca Raton: CRC Press, 1995. p. 93–137.

OGAWA, T.; BROOK, M. The mechanism of the intracloud lightning discharge. **Journal of Geophysical Research**, v. 69, n. 24, p. 5141–5150, 1964.

PAIVA, A. R. **Estudos das descargas de retorno e componentes M e sua detecção**. 2015. 105 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015.

PINTO JUNIOR, O.; PINTO, I. R. C. A.; SABA, M. M. F.; SOLORZANO, N. N.; GUEDES, D. Return stroke peak current observations of negative natural and triggered lightning in Brazil. **Atmospheric Research**, v. 76, n. 1–4, p. 493–502, 2005.

QI, Q.; LU, W.; MA, Y.; CHEN, L.; ZHANG, Y.; RAKOV, V. A. High-speed video observations of the fine structure of a natural negative stepped leader at close distance. **Atmospheric Research**, v. 178–179, p. 260–267, 2016.

RAKOV, V. A.; TRAN, M. D. The breakthrough phase of lightning attachment process: from collision of opposite-polarity streamers to hot-channel connection. **Electric Power Systems Research**, v. 173, p. 122–134, 2019.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Some properties of negative cloud-to-ground lightning flashes versus stroke order. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, p. 5447–5453, 1990.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning physics and effects**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. ISBN(9781626239777).

ROGERS, R. R.; YAU, M. K. **A short course in cloud physics**. Butterworth, 1976. 308 p.

SABA, M. M. F.; PAIVA, A. R.; CONCOLLATO, L. C.; WARNER, T. A.; SCHUMANN, C. Optical observation of needles in upward lightning flashes. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–6, 2020.

SABA, M. M. F.; SCHUMANN, C.; WARNER, T. A.; FERRO, M. A. S.; PAIVA, A. R. DE; HELSDON JUNIOR, J.; ORVILLE, R. E. Upward lightning flashes characteristics from high-speed videos. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, p. 8493–8505, 2016.

SAUNDERS, C. P. R. A review of thunderstorm electrification processes. **Journal of Applied meteorology**, v. 32, p. 642–655, 1992.

SCHUMANN, C. **Estudo dos raios ascendentes a partir de observações de câmeras de alta resolução temporal e de medidas de campo elétrico**. 2016. 180 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016.

SCHUMANN, C.; SABA, M. M. F.; WARNER, T. A.; FERRO, M. A. S.; HELSDON, J. H.; THOMAS, R.; ORVILLE, R. E. On the triggering mechanisms of upward lightning. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1–9, 2019.

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, 1995.

WARNER, T. A.; SABA, M. M. F.; ORVILLE, R. E. Characteristics of upward leaders from tall towers. In: ASIA-PACIFIC INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING (APL2011), 7., 2011. **Proceedings...** 2011. p.1-4.

WARNER, T. A.; SABA, M. M. F.; SCHUMANN, C.; HELSDON JUNIOR, J. H.; ORVILLE, R. E. Observations of bidirectional lightning leader initiation and development near positive leader channels. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 121, p. 9251–9260, 2016.

WILLIAMS, E. R. Problems in lightning physics - the role of polarity asymmetry. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 15, n. 2, 2006.

WU, B.; LYU, W.; QI, Q.; MA, Y.; CHEN, L.; JIANG, R.; ZHU, Y.; RAKOV, V. A. High-Speed video observations of recoil leaders producing and not producing return strokes in a Canton-Tower upward flash. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 14, p. 8546–8553, 2019.

WU, T.; WANG, D.; TAKAGI, N. Velocities of positive leaders in intracloud and negative cloud-to-ground lightning flashes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 17–18, p. 9983–9995, 2019.

YOSHIDA, S.; et al. The initial stage processes of rocket-and-wire triggered lightning as observed by VHF interferometry. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, n. 9, p. 1–12, 2012.

YUAN, S.; JIANG, R.; QIE, X.; SUN, Z.; WANG, D.; SRIVASTAVA, A. Development of side bidirectional leader and its effect on channel branching of the progressing positive leader of lightning. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 3, p. 1746–1753, 2019.