



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/09.12.16.23-TDI

ESTUDO DAS FASES DOS RAIOS ASCENDENTES

Ismael Jorge Costa Neto

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelo Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba, aprovada em 28 de agosto de 2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/49QJGHE>>

INPE
São José dos Campos
2023

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 INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/09.12.16.23-TDI

ESTUDO DAS FASES DOS RAIOS ASCENDENTES

Ismael Jorge Costa Neto

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelo Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba, aprovada em 28 de agosto de 2023.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/49QJGHE>

INPE
São José dos Campos
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Costa Neto, Ismael Jorge.

C823e Estudo das fases dos raios ascendentes / Ismael Jorge Costa Neto. – São José dos Campos : INPE, 2023.
xxii + 59 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/09.12.16.23-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2023.

Orientador : Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba.

1. Raio ascendente. 2. Corrente contínua inicial. 3. Corrente contínua. 4. Descarga de retorno subsequente. 5. Pulso de corrente contínua inicial. I.Título.

CDU 551.594.22



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 INOVAÇÃO



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

DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE ISMAEL JORGE COSTA NETO
REG. 138622/2020, BANCA Nº 219/2023

No dia 28 de agosto de 2023, 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, com a exigência de que o trabalho final a ser publicado deverá incorporar as correções sugeridas pela Banca Examinadora, com revisão pelo(s) orientador(es).

Título: ESTUDO DAS FASES DOS RAIOS ASCENDENTES

Membros da banca:

Dra. Lívia Ribeiro Alves – Presidente – INPE
Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba – Orientador – INPE
Dr. Istvan Kereszy – Orientador – Universidade da Flórida
Dr. Kleber Pinheiro Naccarato – Membro Interno – INPE
Dr. Marco Antonio da Silva Ferro – Membro Externo – IAE

Declaração de aprovação do Orientador Dr. Istvan Kereszy anexa ao processo.



Documento assinado eletronicamente por **Livia Ribeiro Alves, Pesquisadora**, em 25/09/2023, às 11:27 (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 25/09/2023, às 11:31 (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 **Marco antonio da silva ferro (E), Usuário Externo**, em 26/09/2023, às 16:00 (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 03/10/2023, às 11:37 (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 <https://sei.mcti.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **11392322** e o código CRC **0C15730C**.

Referência: Processo nº 01340.006959/2023-65

SEI nº 11392322

“Não sabendo que era impossível, foi lá e fez”.

(Jean Cocteau)

Dedico esse trabalho à minha família e amigos

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me abençoar, concedendo resiliência, saúde, sabedoria e, me conduzir até o presente momento.

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 Dra. Livia Ribeiro Alves, Dr. Kleber Pinheiro Naccarato, Dr. Marco Antônio da Silva Ferro e Dr. Istvan Kérészy, 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 do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e colegas de trabalho do grupo de pesquisa em eletricidade atmosférica (ELAT). Em especial ao Diego Rhamon, Ivan Cruz, Paola Lauria e Tagianne Silva.

Também agradeço a minha família e amigos pelo apoio emocional, conselhos, incentivo e de sempre acreditarem em mim. Em especial à minha esposa, Lais Costa, aos meus pais Antônio e Silvana Costa, minha irmã, Mariana Costa e minha filha, recém-nascida e motivação diária, Lara Costa.

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

RESUMO

Este estudo aborda os raios ascendentes negativos, descargas elétricas atmosféricas que se originam em estruturas elevadas e se propagam em direção às nuvens. Embora sejam responsáveis por danos em torres de telecomunicação e turbinas eólicas, seu entendimento ainda é limitado. A pesquisa analisou 174 raios registrados no Pico do Jaraguá - SP, com ênfase em suas fases, como corrente contínua inicial, pulsos de corrente contínua inicial, corrente contínua, descarga de retorno subsequente e componente M. Os resultados revelaram que os raios ascendentes têm uma duração média de 400 ms, cerca de duas vezes maior que os raios descendentes, sendo 90% dessa duração atribuída à corrente contínua inicial. A análise também indicou que os pulsos de corrente contínua inicial começam após cerca de 40% do início do raio ascendente, coincidindo com a ocorrência dos líderes de recuo após a primeira bifurcação. Observou-se uma semelhança na distribuição das componentes M nas correntes contínuas de raios ascendentes e descendentes, sugerindo comportamento comum. Além disso, observou-se um padrão de respeito à zona de exclusão em ambos os tipos de raios, onde descargas de retorno subsequente com correntes contínuas de longa duração não exibem picos de corrente acima de 20 kA. Este estudo reforça conclusões anteriores e valida inferências sobre raios ascendentes. Contribuindo para o entendimento dos raios ascendentes, especialmente relevantes para a proteção de estruturas como turbinas eólicas, essa pesquisa inspira investigações adicionais nessa área.

Palavras-chave: Raio ascendente, corrente contínua inicial, corrente contínua, descarga de retorno subsequente, pulso de corrente contínua inicial, componente M e duração do raio.

STUDY OF UPWARD LIGHTNING PHASES

ABSTRACT

The aim of this work is This study addresses negative upward lightning, atmospheric electrical discharges originating from elevated structures and propagating towards clouds. Despite being responsible for damages to telecommunication towers and wind turbines, their comprehension remains limited. The research analyzed 174 lightning events recorded at Pico do Jaraguá - SP, with a focus on their phases, such as initial continuous current, initial continuous current pulses, continuous current, subsequent return stroke, and M component. The findings revealed that upward lightning has an average duration of 400 ms, approximately twice that of downward lightning, with 90% of this duration attributed to the initial continuous current. Analysis also indicated that initial continuous current pulses initiate after about 40% of the onset of upward lightning, coinciding with the occurrence of recoil leaders after the first bifurcation. A similarity was observed in the distribution of M components in the continuous currents of both upward and downward lightning, suggesting common behavior. Furthermore, a pattern of respecting the exclusion zone was observed in both types of lightning, where subsequent return strokes with long-duration continuous currents did not exhibit peak currents exceeding 20 kA. This study reinforces previous conclusions and validates inferences about upward lightning. Contributing to the understanding of upward lightning, especially relevant for the protection of structures such as wind turbines, this research inspires further investigations in this field.

Keywords: Upward lightning, initial continuous current, continuous current, subsequent return stroke, initial continuous current pulses, M component, lightning duration.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Locais de iniciação dos raios segundo a hipótese apresentada por Heinz Kasemir (1950).....	4
Figura 2.2 - Início da formação do líder bipolar bidirecional.....	5
Figura 2.3 - Líder bipolar bidirecional.....	6
Figura 2.4 - Identificação dos tipos de raios que tocam o solo e a forma de propagação dos líderes que iniciam o evento.....	8
Figura 2.5 - Desenvolvimento do líder ascendente positivo.....	10
Figura 2.6 - Raio ascendente negativo – UP 143.....	10
Figura 2.7 - Representação de LR em um raio ascendente negativo.....	12
Figura 2.8 - Descarga de retorno subsequente.....	13
Figura 2.9 - Pulsos de corrente contínua inicial.....	14
Figura 3.1 - Tela de visualização software Cine Viewer.....	16
Figura 3.2 - Barra de tarefas Cv.....	17
Figura 3.3 - Esquema de fases do raio ascendente.....	18
Figura 3.4 - Iniciação do líder ascendente e o momento de sua bifurcação – fase 1 (caso 53).....	19
Figura 3.5 - Pulso de CCI durante a fase inicial do raio – fase 2 (caso 53).....	20
Figura 3.6 - Momento do DRS – fase 4 (caso 53).....	20
Figura 3.7 - Exemplo de uma componente M após a DRS – fase 6 (caso 53).....	21
Figura 4.1 - Dados coletados na pesquisa.....	24
Figura 4.2 - Porcentagem da ocorrência de CCIp (N=593) que acontecem em intervalos de 100 ms entre o início e fim da duração da CCI.....	25
Figura 4.3 - Porcentagem da ocorrência de CCIp (N=593) que acontecem em intervalos de 10% da duração da CCI.....	26
Figura 4.4 - Porcentagem de ocorrência de início da bifurcação do líder ascendente que acontecem em intervalos de 10% da duração da CCI.....	27
Figura 4.5 - Porcentagem de ocorrência do primeiro líder de recuo que acontece em intervalos de 10% da duração da CCI.....	28
Figura 4.6 - Porcentagem de duração da corrente contínua inicial nos raios ascendentes.....	29
Figura 4.7 - Distribuição da multiplicidade dos raios ascendentes.....	30
Figura 4.8 - Porcentagem de duração da corrente contínua nos raios ascendentes.....	31
Figura 4.9 - Porcentagem de duração da corrente contínua nos raios ascendentes e raios descendentes.....	31
Figura 4.10 - Pico de corrente no início das correntes contínuas para raios ascendentes e raios descendentes.....	33

Figura 4.11 - Distribuição dos picos de corrente para a descarga de retorno dos raios descendentes negativos e para as descargas de retorno subsequente dos raios descendentes negativos e raios ascendentes.	34
Figura 4.12 – Localização da torre telecomunicação do Pico do Jaraguá - SP e os pontos indicados pelo sistema de localização das descargas de retorno subsequentes dos raios ascendentes.	35
Figura 4.13 - Distribuição da multiplicidade para raios que possuíram descarga de retorno subsequente	36
Figura 4.14 - Porcentagem da ocorrência de componente M (N=57) que acontecem em intervalos de 10% da duração da corrente contínua.	36
Figura 4.15 - Porcentagem da ocorrência da componente M (N=57) que acontecem em intervalos de 20 ms entre o início e fim da duração da corrente contínua.....	37
Figura 4.16 - Ocorrência da porcentagem de tempo decorrido dos componentes M sobre a duração total da corrente contínua em raios descendentes negativos. $R^2=0,99$	38
Figura 4.17 - Frequência de componente M no raio ascendente durante a corrente contínua. $R^2=0,97$	39
Figura 4.18 - Porcentagem de duração total dos raios ascendentes.	40
Figura 4.19 - Comparação da média aritmética da duração total dos raios.	42
Figura 4.20 - Evolução temporal dos raios ascendente, descendente negativo e descendente positivo de acordo com sua luminosidade.	43
Figura 4.21 - Porcentagem dos tempos entre o final da corrente contínua inicial e primeira descarga de retorno subsequente em intervalos de 10ms.....	44
Figura 4.22 - Porcentagem dos tempos entre descargas de retorno subsequentes em intervalos de 20ms	45
Figura 4.23 - Tempo médio da duração da corrente contínua inicial.....	47
Figura 4.24 - Tempo médio da duração da corrente contínua.....	48
Figura 4.25 - Tempo médio da duração total do raio ascendente.	48
Figura 5.1 - Resumo do comportamento do raio ascendente.....	53

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 - Modelo de análise de dados – raio 165.....	23
Tabela 4.1 - Análise de 174 raios ascendentes.....	24
Tabela 4.2 - Resumo dos resultados do presente trabalho.....	41
Tabela 4.3 - Comparação dos tempos entre descargas.....	46
Tabela 4.4 - Multiplicidade dos raios ascendentes.....	50
Tabela 4.5 - Raios ascendentes que possuem somente corrente contínua inicial	51
Tabela 5.1 - Principais diferenças e semelhanças das correntes contínuas dos raios ascendentes e descendentes	54

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CC	Corrente Contínua
CCI	Corrente Contínua Inicial
CCIp	Pulso de Corrente Contínua Inicial
CCL	Corrente Contínua Longa
Comp. M	Componente M
DR	Descarga de Retorno
DRS	Descarga de Retorno Subsequente
ELAT	Grupo de eletricidade atmosférica
IN	Intranuvem
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Ip	Pico de Corrente
ips	Imagens por segundo
LA	Líder Ascendente
LBB	Líder Bipolar Bidirecional
LN	Líder Negativo
LP	Líder Positivo
LR	Líder de Recuo
NS	Nuvem-solo
NS-	Nuvem-solo Negativo
NS+	Nuvem-solo Positivo
RA	Raio Ascendente
RA-	Raio Ascendente Negativo
RD	Raio Descendente
RD-	Raio Descendente Negativo
RD+	Raio Descendente Positivo
SN	Solo-nuvem
T ₁	Torre 1
T ₂	Torre 2
TUC	Tempo Universal Coordenado

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Contexto histórico	3
2.2 Teoria do Líder Bipolar Bidirecional.....	4
2.3 Classificação dos raios	6
2.3.1 Raios que não envolvem o solo – Raios intranuvem	7
2.3.2 Raios que envolvem o solo.....	7
2.3.2.1 Raio descendente.....	8
2.3.2.1.1 Raio descendente negativo	8
2.3.2.1.2 Raio descendente positivo.....	9
2.3.2.2 Raios ascendentes	9
2.3.2.2.1 Raio ascendente negativo	9
2.3.2.2.2 Raio ascendente positivo.....	11
2.4 Líderes de recuo.....	11
2.4.1 Líder contínuo e descarga de retorno subsequente	12
2.4.2 Pulsos de corrente contínua inicial e componente M.....	13
2.5 Corrente contínua e corrente contínua inicial	14
3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA	16
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	24
4.1 Primeira Fase - Iniciação do líder ascendente na torre de telecomunicação.	25
4.2 Segunda fase - Pulsos de corrente contínua inicial durante o período de corrente contínua inicial	25
4.3 Terceira fase - Medição da duração da corrente contínua inicial nos raios ascendentes	29
4.4 Quarta e quinta fase – Início e término das correntes contínuas dos raios ascendentes.....	30
4.5 Sexta fase – Ocorrência da descarga de retorno subsequente e contagem das componentes M.....	35

4.6 Duração total do raio ascendente	40
4.7 Comparação entre raios ascendentes negativos, raios descendentes positivos e raios descendentes negativos	41
4.8 Tempo entre as descargas de retorno subsequente e tempo entre a corrente contínua inicial e descargas de retorno subsequente	44
4.9 Comparação entre a pesquisa atual, a pesquisa de Schumann (2016) e Diendorfer (2009) sobre raios ascendentes	47
4.10 Resumo capítulo de Resultados e Discussões.....	51
5 CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

Apesar da predominância dos raios descendentes, que se originam nas nuvens e atingem o solo, os raios ascendentes representam uma parcela significativa e peculiar do fenômeno de descargas elétricas atmosféricas. Eles se iniciam em pontos elevados na superfície terrestre, como torres de telecomunicação e turbinas eólicas, propagando-se em direção às nuvens (SABA et al., 2016).

A importância dos raios ascendentes é evidenciada por pesquisas que indicam uma probabilidade consideravelmente maior de estruturas elevadas serem afetadas por raios ascendentes do que por raios descendentes (DIENDORFER et al., 2009). Na Áustria, 236 dos 242 eventos registrados em uma torre instrumentada foram classificados como raios ascendentes. No caso de raios afetarem as turbinas eólicas, os danos podem ser muito prejudiciais à sociedade, podendo fazer com que haja paralisações na produção e fornecimento de energia por semanas, resultando em grandes perdas financeiras, além do custo de manutenção ou troca de peças danificadas (DIENDORFER et al., 2009).

Nesse contexto, foram analisados todos os 174 raios presentes no banco de dados deste estudo, por meio de filmagens com câmeras rápidas no Pico do Jaraguá - SP. Dessa amostra, 73 picos de corrente foram detectados pela rede de detecção de descargas atmosféricas.

Este estudo propõe uma exploração aprofundada das fases dos raios ascendentes. Suas fases serão examinadas, com ênfase na corrente contínua inicial (CCI) e seus pulsos associados, além da correlação com bifurcações e líderes de recuo (LR) iniciais. Será investigada a relação entre a duração total do raio, sua corrente contínua inicial (CCI) e sua corrente contínua (CC), assim como comparações com raios descendentes em termos de corrente contínua, componentes M (comp. M) e duração total. O intervalo temporal entre descargas de retorno subsequente (DRS) de raios ascendentes e descendentes será abordado, bem como uma comparação com estudos anteriores sobre raios ascendentes.

Esta dissertação se organiza em capítulos. O Capítulo 2 realizará uma revisão bibliográfica do tema. No Capítulo 3, serão apresentados os métodos empregados

na pesquisa. Os resultados e discussões serão expostos no Capítulo 4, enquanto o Capítulo 5 apresentará as conclusões deste trabalho, destacando suas contribuições para o campo de estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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

2.1 Contexto histórico

Os raios têm impactado a superfície terrestre desde antes do surgimento da vida como a conhecemos atualmente. Algumas teorias sugerem que os raios podem ter desempenhado um papel vital nas primeiras reações químicas na Terra. Além disso, os raios podem ter desempenhado um papel crucial na evolução humana, pois a descoberta do fogo, facilitada por eles, teve um impacto significativo no desenvolvimento das sociedades (FERRO, 2022).

Já a partir da metade do século XVIII, os cientistas começaram a considerar a possibilidade de existência de eletricidade nas nuvens. Em 1751, Benjamin Franklin propôs um experimento para comprovar sua teoria de que o raio era uma manifestação elétrica. A proposta, endereçada à Royal Society of England, não foi testada pelos cientistas ingleses, mas sim, posteriormente, pelos franceses. Paralelamente, Benjamin Franklin desenvolveu uma outra abordagem para comprovar sua hipótese. Num dia úmido de junho de 1752, na Filadélfia, ele empinou uma pipa em direção a uma nuvem de tempestade. Na extremidade da pipa, fixou um fio condutor elétrico, cuja ponta estava conectada a uma chave. Todo o sistema permanecia eletricamente isolado do solo, sendo mantido fixo por uma fita de seda seca. Ao tocar na chave durante a tempestade, Franklin observou uma faísca, confirmando a presença de eletricidade nas nuvens. (FERRO, 2022).

Desde então, a ciência tem se dedicado a estudar esses fenômenos para compreender melhor suas características e condições, buscando tanto proteger-se de seus efeitos adversos quanto aproveitar suas propriedades.

Em 1950, Heinz Kasemir, um pesquisador do laboratório de tempestades severas da Nasa, propôs que o raio é uma descarga bidirecional que se propaga em ambas as extremidades. Suas ideias foram gradualmente aceitas pela comunidade científica nas décadas de 1970 e 1980, com a contribuição de Vladislav Mazur e seu colega Lothar Ruhnke. Isso representou uma mudança em relação à teoria anteriormente aceita, a Teoria Clássica, que se baseava na ideia de raios unipolares e

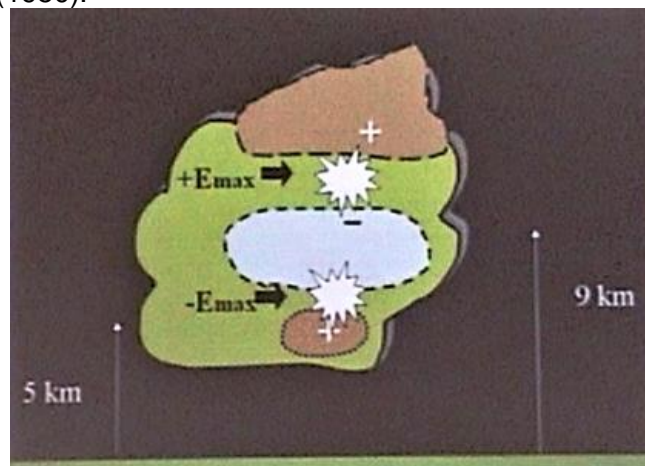
unidirecionais, transportando apenas um tipo de carga (positiva ou negativa) em direção ao solo ou a outra área de carga (FERRO, 2022).

2.2 Teoria do Líder Bipolar Bidirecional

Para compreender a iniciação e propagação de um Líder Bipolar Bidirecional (LBB) dentro de uma nuvem, é fundamental considerar a presença de centros de carga de polaridades opostas dentro dela. Essa disparidade de polaridade cria um campo elétrico entre as regiões dos centros de carga, e à medida que a eletrificação desses centros se intensifica, o campo elétrico aumenta em intensidade.

O incremento na intensidade do campo elétrico em conjunto com a radiação cósmica secundária é relevante para o entendimento da ruptura da rigidez dielétrica em uma região previamente isolante, localizada entre os centros de carga das nuvens. Isso possibilita a formação de um canal condutor. As regiões onde ocorre esse fenômeno podem ser observadas na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Locais de iniciação dos raios segundo a hipótese apresentada por Heinz Kasemir (1950).

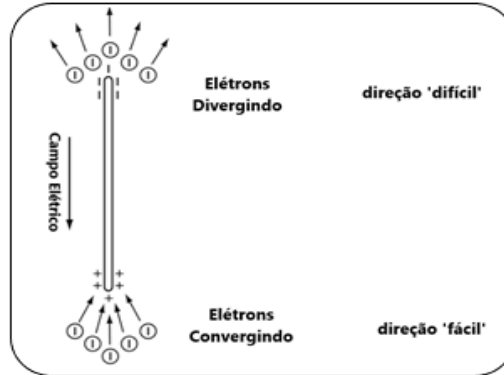


Fonte: Adaptado de Ferro (2022).

Kasemir propôs que a partir do LBB são criadas as condições necessárias para o surgimento das descargas elétricas. O canal condutor do LBB mantém uma carga total líquida zero e é iniciado sem a necessidade de eletrodos, com as cargas positivas concentradas em uma extremidade e as negativas na outra. Esse modo de

propagação do líder é denominada propagação de líder bidirecional (Figura 2.2), conforme proposto por Heinz Kasemir (FERRO, 2022).

Figura 2.2 - Início da formação do líder bipolar bidirecional.

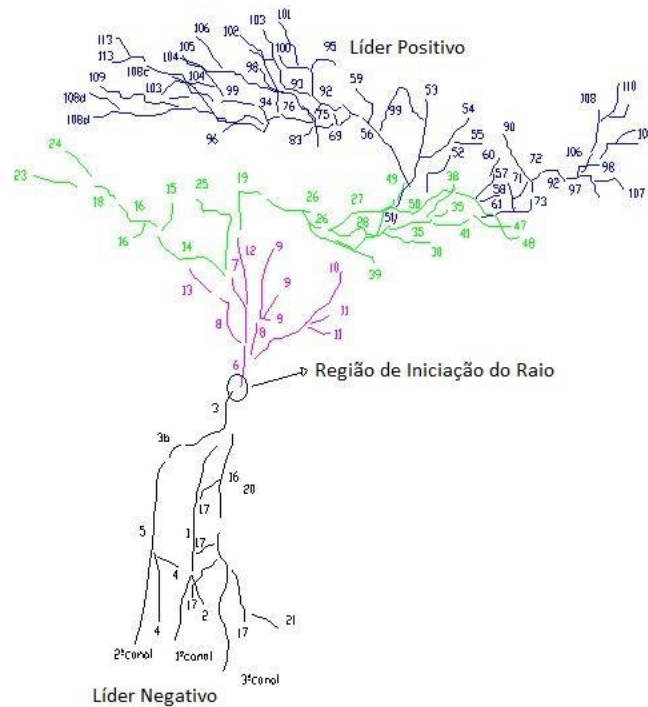


O filamento à esquerda na imagem representa o líder bipolar bidirecional. Na parte superior (extremidade negativa) é possível observar os elétrons divergindo. Enquanto na inferior (extremidade positiva) os elétrons convergem em direção a extremidade positiva.

Fonte: Adaptado de Williams (2006).

Ferro (2007) demonstrou, pela primeira vez, o ponto de iniciação e o desenvolvimento do líder bipolar bidirecional por meio de um raio nuvem-solo, comprovando que o conceito da "árvore de dupla terminação" (Figura 2.3) também é válido para os raios naturais. Essa teoria tem aplicabilidade na explicação da formação de todos os tipos de raios, como por exemplo, intranuvem, nuvem-solo, solo-nuvem, bem como raios provocados artificialmente por dispositivos como foguetes e aeronaves.

Figura 2.3 - Líder bipolar bidirecional.



O círculo central mostra a região de iniciação do líder bipolar bidirecional. A extremidade positiva se desenvolve em direção ao centro de cargas negativas (sentido ascendente). E a negativa em direção ao solo (sentido descendente).

Fonte: Adaptado de Ferro (2022).

2.3 Classificação dos raios

No processo de classificação dos raios, um dos critérios iniciais considerados é a sua interação com o solo, devido à capacidade de causar danos materiais e até mesmo fatalidades. Essa distinção levou à divisão dos raios em dois grupos principais:

I) Os que não envolvem o solo: Esses raios não estabelecem contato com o solo e permanecem confinados dentro da nuvem. Eles constituem aproximadamente 90% de todos os eventos de raios e são conhecidos com o Intranuvem.

II) Os que envolvem o solo: Esses raios fazem contato direto com o solo. Eles representam os 10% restantes dos raios que ocorrem ao redor do globo. Os raios que envolvem o solo ainda são subdivididos em Raios Ascendentes (RA) e Raios Descendentes (RD).

Além disso, outro critério importante para a classificação dos raios é a polaridade da carga que transportam para o solo, o que resulta na categorização em raios positivos ou negativos (FERRO, 2022).

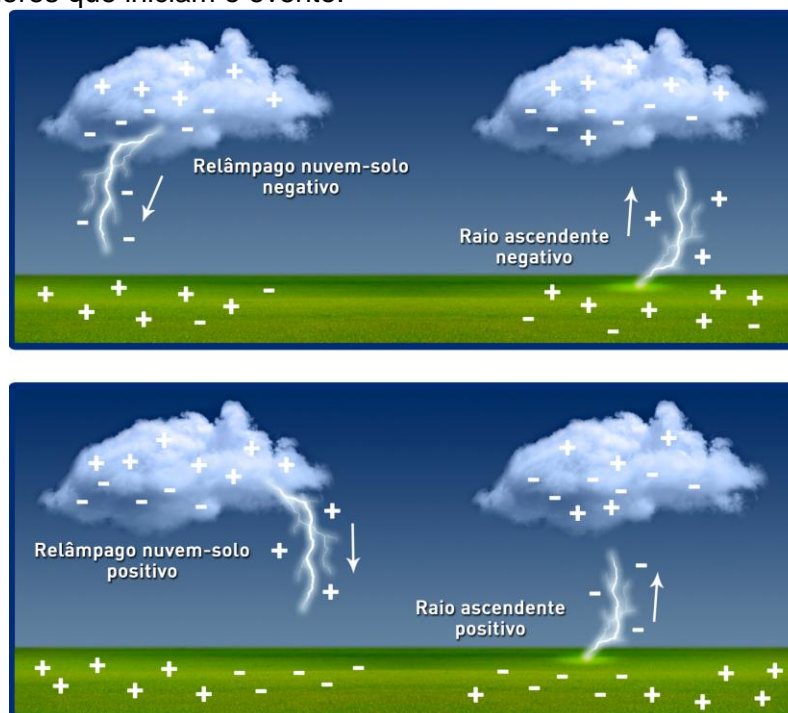
2.3.1 Raios que não envolvem o solo – Raios intranuvem

Na maioria dos raios intranuvem (RIN) os canais por onde passa a corrente elétrica não são muito visíveis, pois ocorrem dentro das nuvens de tempestade. Se apresentam geralmente como um clarão difuso. Nesse tipo de raio, o LBB se inicia em um ponto situado entre os centros de cargas principais positivos e negativos de uma nuvem de tempestade. O Líder Negativo se propaga em direção ao centro de cargas positivas da nuvem, ao passo que o Líder Positivo se propaga em direção ao centro de cargas negativas da mesma nuvem de tempestade.

2.3.2 Raios que envolvem o solo

Os tipos de raios que envolvem o solo podem ser categorizados como: Raio Descendente (nuvem-solo) Negativo (RDN), Raio Descendente (nuvem-solo) Positivo (RDP), Raio Ascendente Negativo (RAN) e Raio Ascendente Positivo (RAP). A Figura 2.4 ilustra como os líderes que iniciam esses raios se propagam.

Figura 2.4 - Identificação dos tipos de raios que tocam o solo e a forma de propagação dos líderes que iniciam o evento.



Fonte: Adaptado de ELAT (2023).

2.3.2.1 Raio descendente

Como já citado, os raios descendentes têm seu LBB originado entre dois centros (positivo e negativo) de cargas no interior da nuvem. Eles representam a maioria dos raios que possuem contato com o solo, sendo cerca de 99% dos que envolvem o solo. Em sua maioria o raio transfere cargas negativas para o solo, ou seja, são os RDNs.

2.3.2.1.1 Raio descendente negativo

O RDN é iniciado por um LBB 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.

O líder positivo se propaga em direção ao centro de cargas negativa e o líder negativo inicialmente se propaga em direção ao centro de cargas positivo na base da nuvem e dependendo da densidade de cargas do centro positivo, o líder segue em direção ao solo (CRUZ, 2022; RAKOV; UMAN, 1990).

2.3.2.1.2 Raio descendente positivo

O RDP é iniciado por um LBB dentro da nuvem. 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 (CRUZ, 2022).

2.3.2.2 Raios ascendentes

Usualmente o campo elétrico no nível do solo não possui intensidade suficiente de provocar quebra da rigidez dielétrica, portanto para a formação de um RA, é necessário que um conjunto de fenômenos ocorram de forma simultânea.

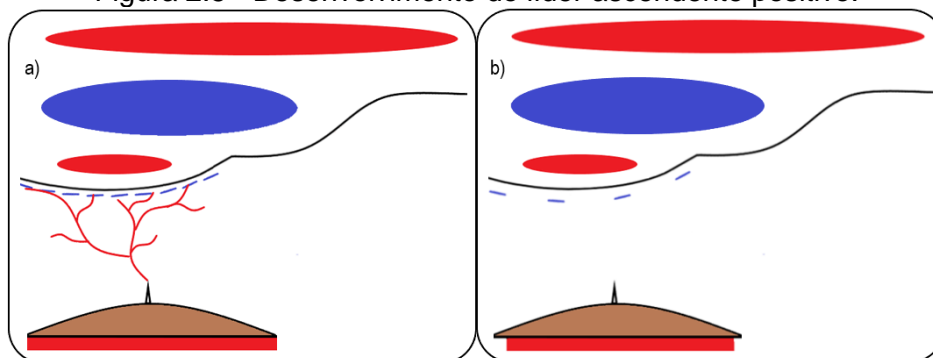
A presença de estruturas como torres podem modificar as isolinhas de campo elétrico, e facilitar sua intensificação, aumentando as chances da quebra da rigidez dielétrica. Mas para que haja o desenvolvimento de um líder, na maioria das vezes é necessário que ocorra uma descarga matriz (descarga geralmente com o desenvolvimento de líder negativo na nuvem de tempestade que se encontra em cima da torre) necessária para que o campo elétrico seja intenso suficiente para iniciar um líder ascendente.

Vale ressaltar que a estrutura onde o líder ascendente se origina, uma torre, turbina eólica, prédio entre outros, pode ser seriamente danificada devido a intensidade das cargas transferidas através dessa estrutura (SCHUMANN, 2016).

2.3.2.2.1 Raio ascendente negativo

Os RANs (Figura 2.5) se desenvolvem a partir um líder ascendente positivo que se origina em estruturas elevadas e se propaga em direção à camada de blindagem (com cargas negativas) próxima à base da nuvem (CRUZ, 2022).

Figura 2.5 - Desenvolvimento do líder ascendente positivo.



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

Fonte: Adaptado de Cruz (2022).

Na Figura 2.5 (a), é possível observar um líder ascendente que se inicia em uma torre (estrutura elevada). Esse início ocorre sob as condições previamente descritas. O campo elétrico na torre se intensifica, resultando no surgimento do líder ascendente. Este líder se desloca em direção às cargas de blindagem na base da nuvem. Nesse cenário, a carga líquida transferida para o solo é negativa, caracterizando o raio como ascendente negativo (Figura 2.6).

Figura 2.6 - Raio ascendente negativo – UP 143.



Fonte: INPE (2016).

2.3.2.2 Raio ascendente positivo

O RAP tem sua origem a partir de um líder ascendente negativo. Esse fenômeno se inicia em estruturas elevadas e se desloca em direção ao centro de cargas positivas, localizado próximo à base da nuvem.

A ocorrência desse tipo de raio também requer a intensificação do campo elétrico em estruturas altas, semelhante ao processo descrito anteriormente (CRUZ, 2022). No Brasil, não existem ainda registros de ocorrência de raios ascendentes positivos.

2.4 Líderes de recuo

Os líderes de recuo (LR) têm origem nos canais previamente ionizados pelo líder positivo, reconstruindo esses caminhos de forma parcial ou completa. Tais conceitos foram observados e melhor entendidos por meio de câmeras de alta velocidade (SABA et al., 2008). Atualmente, compreende-se que os LR constituem canais condutores flutuantes, com polaridades opostas em suas extremidades, sendo apropriadamente definidos como líderes bipolares bidirecionais (MAZUR, 2016).

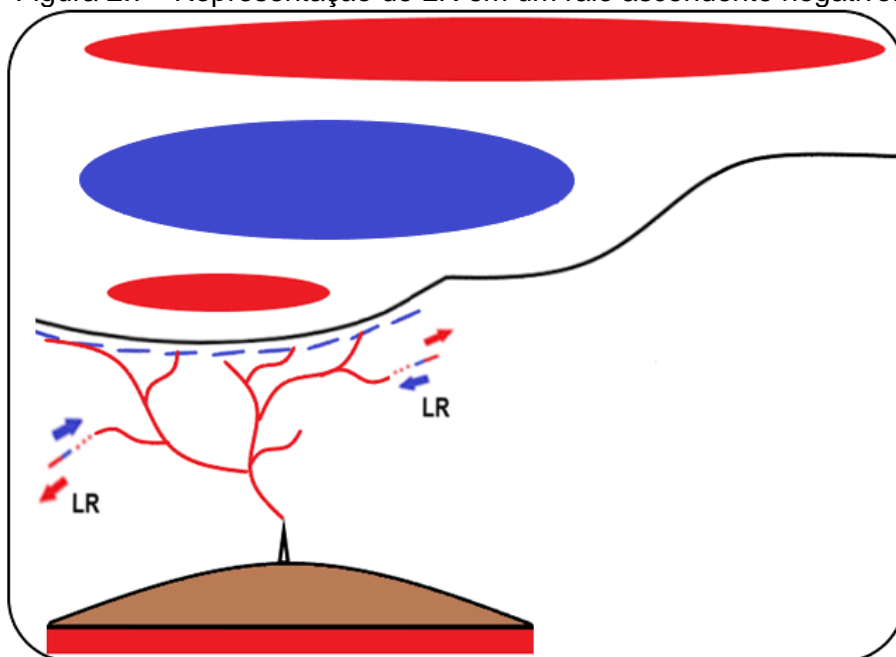
Um modelo explanatório para a formação dos LR foi elaborado por Mazur (MAZUR, 2016). O âmago desse modelo é fundamentado no decaimento e interrupção do canal percorrido pelo líder positivo. Tal decaimento ocorre devido à relação inversa entre a resistência do canal e a corrente elétrica que por ele flui (HECKMAN, 1992).

O canal de um raio pode ser categorizado como estável ou instável. Canais instáveis caracterizam-se por serem extensos, porém com corrente de menor intensidade. Em contrapartida, os canais estáveis possuem comprimentos mais curtos e sustentam correntes elétricas intensas. Conforme o desenvolvimento do líder positivo avança, a resistência do canal aumenta, culminando na transição do canal de uma condição estável para uma instável, o que resulta em sua interrupção (FERRO, 2022).

Quando ocorre a interrupção do canal, a porção desconectada do líder positivo se transforma em um condutor flutuante imerso em um campo elétrico circundante que o polariza. Assim, esse canal condutor flutuante age como um líder bipolar bidirecional. Na extremidade próxima ao rompimento do canal, ocorre o acúmulo de cargas negativas. O líder negativo se desenvolve ao longo do canal previamente ionizado, enquanto a parte positiva do LR se propaga na outra extremidade

(MAZUR, 2016). A Figura 2.7 ilustra a representação de um LR em um raio ascendente negativo.

Figura 2.7 - 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: Adaptado de Cruz (2022).

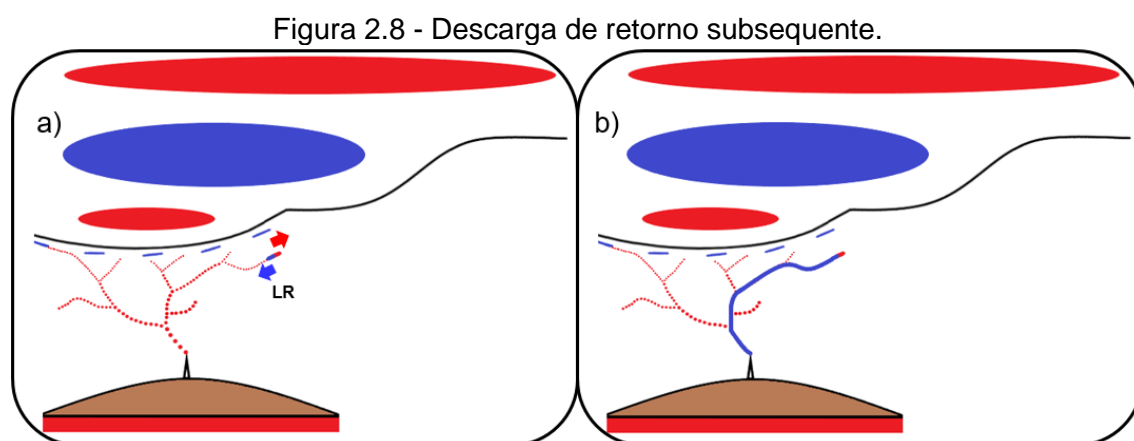
Na Figura 2.7, as direções de propagação das duas extremidades do LR são discerníveis, sendo a parte negativa em azul e a parte positiva em vermelho. O processo de propagação do LR se desenrola em duas etapas. Na primeira fase, o líder avança em ambas as direções. A parte positiva se encontra em uma região onde a diferença de potencial elétrico (ddp) é suficiente para provocar a ionização do ar à sua frente. Na segunda fase, o LR prossegue unidirecionalmente. A extremidade positiva do LR interrompe sua propagação à medida que a ddp atinge um limite mínimo (FERRO, 2022).

2.4.1 Líder contínuo e descarga de retorno subsequente

Os líderes de recuo (LR) originam como resultado do decaimento dos canais dos raios ascendentes positivos. Em alguns casos, esses líderes percorrem esses caminhos decaídos, alcançando o solo no mesmo ponto de iniciação do líder

ascendente positivo. Esse fenômeno é conhecido como "líder contínuo". Em sequência, uma rápida intensificação luminosa ocorre em direção à nuvem, caracterizando a descarga de retorno subsequente.

O termo "multiplicidade" é utilizado para descrever o número de descargas de retorno subsequentes que se sucedem após o decaimento dos líderes ascendentes (SABA et al., 2016). A Figura 2.8 (a) ilustra o canal do líder que decaiu (pontos em vermelho) e a origem de um LR que percorre novamente o canal, resultando em um líder contínuo como demonstrado na Figura 2.8 (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.

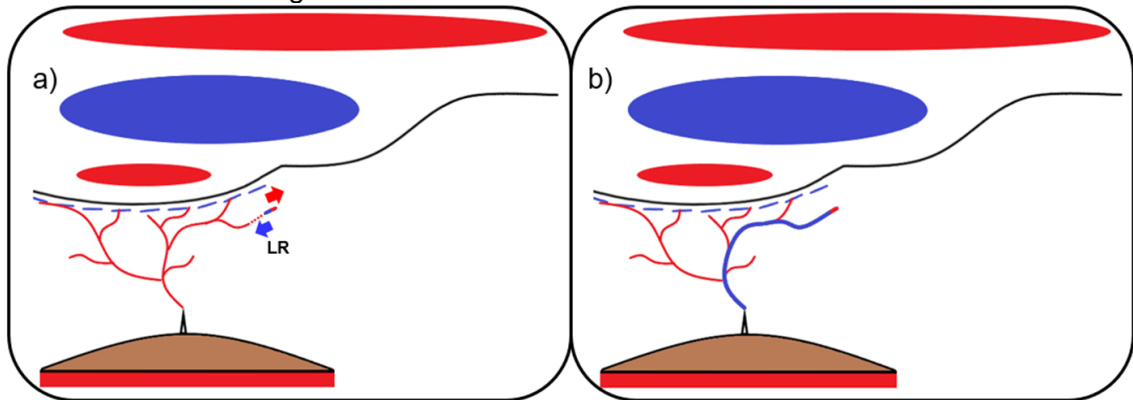
Fonte: Adaptado de Cruz (2022).

2.4.2 Pulsos de corrente contínua inicial e componente M

Os pulsos de corrente contínua inicial (denominados em inglês como "initial continuous current pulses") e as componentes M são fenômenos semelhantes. Ambos produzem um aumento da corrente no canal principal, resultado da propagação de um LR ao longo desse canal. Esse aumento na corrente gera um aquecimento no plasma, resultando em uma maior luminosidade. Quando a corrente cessa, a luminosidade retorna ao nível anterior. A principal distinção entre esses dois processos está no momento em que os LR ocorrem: nos pulsos de corrente contínua inicial, os LR surgem antes da primeira descarga de retorno subsequente, intensificando assim a corrente contínua inicial dos raios ascendentes (Figura 2.9);

enquanto nas componentes M, os LR emergem após a primeira descarga de retorno, intensificando a corrente contínua subsequente (MAZUR, 2016).

Figura 2.9 - 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: Adaptado de Cruz (2022).

2.5 Corrente contínua e corrente contínua inicial

A corrente contínua é um fenômeno caracterizado pelo fluxo de cargas elétricas através do canal de um raio, ocorrendo após uma descarga de retorno ou descarga de retorno subsequente (no caso de raios descendentes). Esse fluxo contínuo de cargas elétricas entre a nuvem e o solo resulta em uma corrente elétrica contínua persistente, que ilumina o canal do raio por um período prolongado. Quanto mais prolongada for a duração desse fenômeno, maior será a quantidade de cargas transportada entre a nuvem e o solo.

A corrente contínua no canal do raio pode persistir por um tempo considerável, causando danos nas estruturas em solo, devido ao aquecimento que a transferência contínua de cargas produz no local do contato desse raio com a estrutura. (BALLAROTTI; SABA; PINTO JUNIOR, 2005; COORAY, 2015).

Ballarotti, Saba e Pinto Junior (2005) destacam a importância de diferenciar entre a corrente contínua inicial e a corrente contínua nos raios ascendentes. Embora ambas representem momentos nos quais há fluxo de cargas elétricas pelo canal do raio, esses momentos ocorrem em fases diferentes do raio ascendente. A CC em um

raio ascendente ocorre após uma DRS, continuando até que o canal do raio decaia completamente. Por outro lado, a corrente contínua inicial CCI tem início desde o momento em que o líder positivo é iniciado em uma estrutura elevada, persistindo até o completo decaimento do canal.

O próximo capítulo apresentará a metodologia para a medição da duração dos intervalos nos raios ascendentes e nas suas diferentes fases.

3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

Os dados utilizados nesta pesquisa foram obtidos por meio do banco de dados do INPE. Há quatro *storages* com informações armazenadas sobre raios, dentre os quais há o registro de 174 raios coletados em São Paulo, no Brasil.

As câmeras rápidas utilizadas nessa pesquisa são os modelos V711, V9, MIRO 4 e V310 da marca *Phantom Ametek*, *Photrom Fast Cam 512* e vídeos em VHS que coletaram aproximadamente 174 amostras. As imagens foram gravadas no período de 15 de março de 2012 até 22 de fevereiro de 2019.

O *software* utilizado para realizar as análises visuais foi o *Cine Viewer* (Cv) versão 3.4. Este *software* é do mesmo fabricante das câmeras rápidas, *Phantom Ametek*, utilizadas para a pesquisa, e sua tela de visualização pode ser conferida na Figura 3.1.

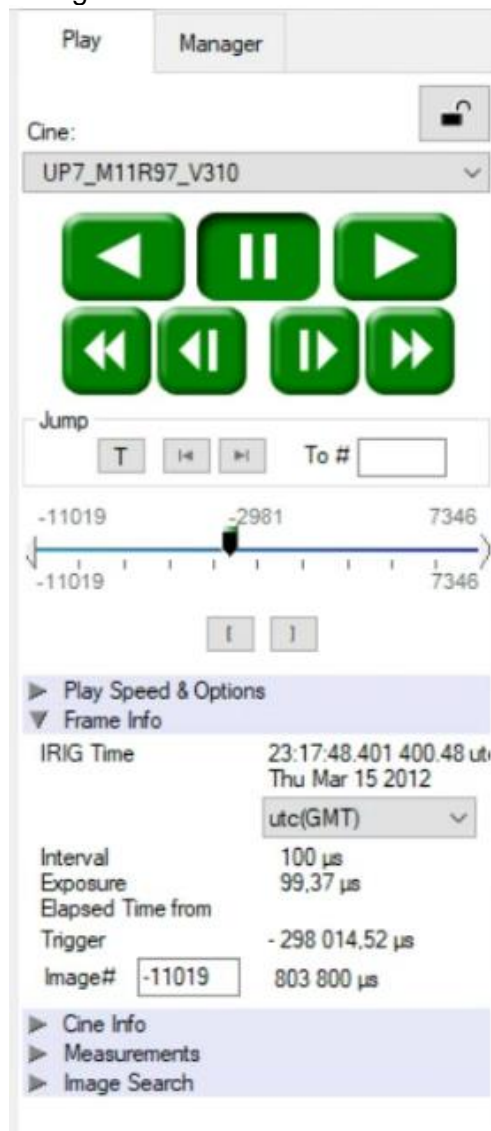
Figura 3.1 - Tela de visualização software Cine Viewer.



Fonte: Produção do autor.

Na barra de tarefas do Cv (Figura 3.1) o tempo em que o raio ocorreu é analisado em Tempo Universal Coordenado (TUC). Conforme mostra a Figura 3.2, o raio ocorreu em 15/03/2012 às 23:17:48 (hh:mm:ss) e 401400,48 µs, horários com referência no Meridiano de Greenwich e o frame do evento citado foi -2961.

Figura 3.2 - Barra de tarefas Cv.

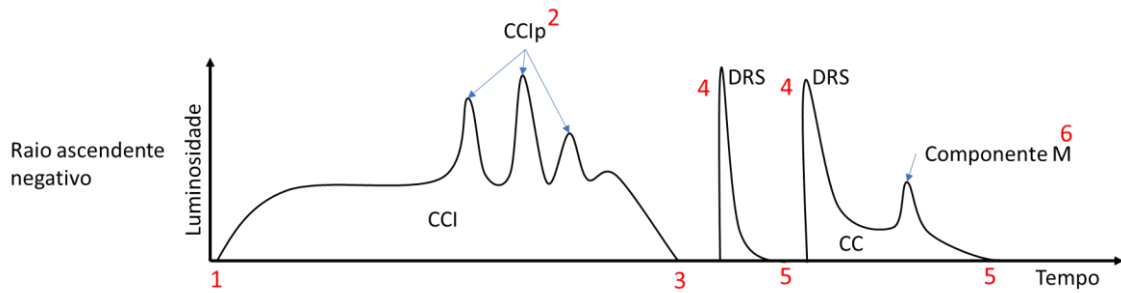


Fonte: Produção do autor.

Em *Interval* é possível obter o intervalo de tempo entre cada *frame* disponibilizado pela imagem. Na Figura 3.2, o *Interval* corresponde a 100 μ s.

As informações dos raios são coletadas e transferidas para uma tabela onde é possível ordenar os dados para que sejam realizadas as análises de tempo e quantidade de eventos que são registrados. Pretende-se analisar as fases do raio ascendente ilustradas na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Esquema de fases do raio ascendente.



Fonte: Produção do autor.

Foram analisadas as fases dos raios ascendentes, identificando os diferentes estágios e sua relação com os líderes de recuo (LR). Na primeira fase, ocorre a iniciação do líder ascendente na torre, marcando a origem da corrente contínua inicial (CCI) do raio. Nesse momento, o líder ascendente avança na direção oposta aos tradicionais raios descendentes, ou seja, do solo para a nuvem de tempestade.

A segunda fase é representada pelos pulsos de corrente contínua inicial (CCIp), que ocorrem durante as CCIs. Os CCIPs são originados pelos LRs que intensificam a corrente do canal principal.

Na terceira fase, o líder ascendente se apaga e a luminosidade cessa. Nesse momento, é importante determinar o tempo final do CCI, indicando o término desta fase da descarga.

Após essa etapa, alguns raios ascendentes avançam para a quarta fase, caracterizada pelo retorno da descarga elétrica na forma de uma descarga de retorno subsequente (DRS) e conseqüentemente determina o possível início da corrente contínua. A DRS é um processo no qual a corrente percorre o mesmo canal utilizado pelo líder ascendente momentos antes. Essa descarga é de polaridade negativa e se origina no canal decaído do líder ascendente pelos LRs. Na quinta fase é analisado o término da corrente contínua (CC) posterior à DRS. Se a intensidade luminosa no canal após à DRS é menor que 3 ms, então não se considera que houve CC. Caso contrário, a CC pode ser definida em: **muito curta** com duração entre 3 ms e 10 ms, **curta** com duração entre 10 ms e 40 ms e **longa** com duração maior que 40 ms.

A última fase identificada é a sexta, na qual é representada pelas chamadas componentes M (comp. M), que são originadas depois das DRSs. Elas são pulsos de corrente que ocorrem durante a fase de corrente contínua. Os LRs também são os responsáveis pelas componentes M, que intensificam a corrente aumentando a luminosidade do raio até o topo da torre.

Em determinadas situações, as fases 4, 5 e 6 podem não ocorrer, resultando apenas na presença das três primeiras fases.

O exemplo de identificação de cada uma das fases pode ser verificado entre Figura 3.4 e Figura 3.7 a seguir, para o raio 53.

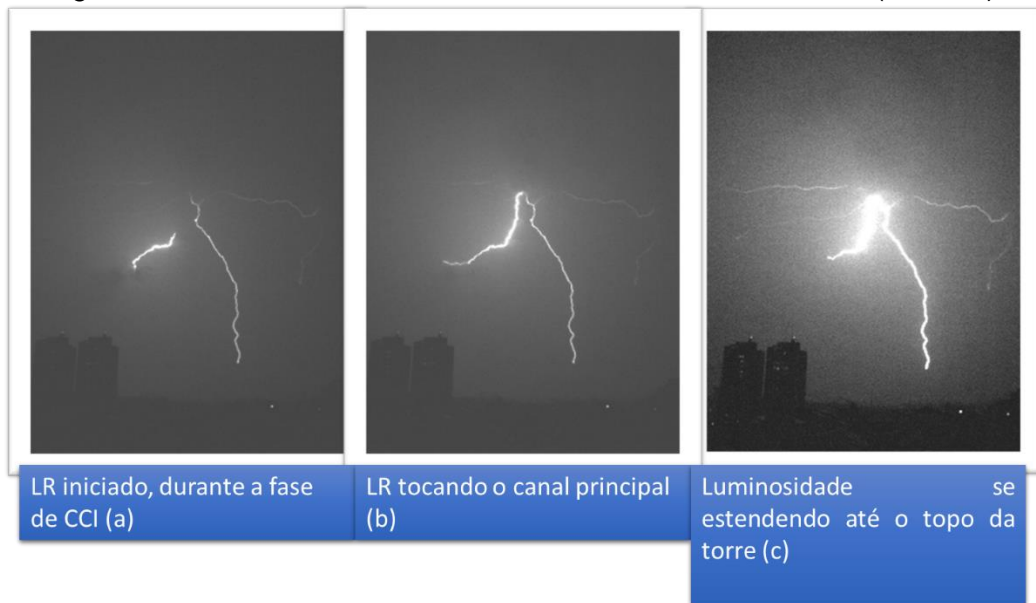
Figura 3.4 - Iniciação do líder ascendente e o momento de sua bifurcação – fase 1 (caso 53).



Fonte: Produção do autor.

Na imagem (a) da Figura 3.4, pode ser notado a iniciação do líder ascendente na torre, representando a origem da CCI. Na imagem (b) da Figura 3.4, observa-se a expansão do líder ascendente positivo que se bifurca durante sua propagação. Na fase 2 do raio é possível notar os pulsos de CCI (Figura 3.5).

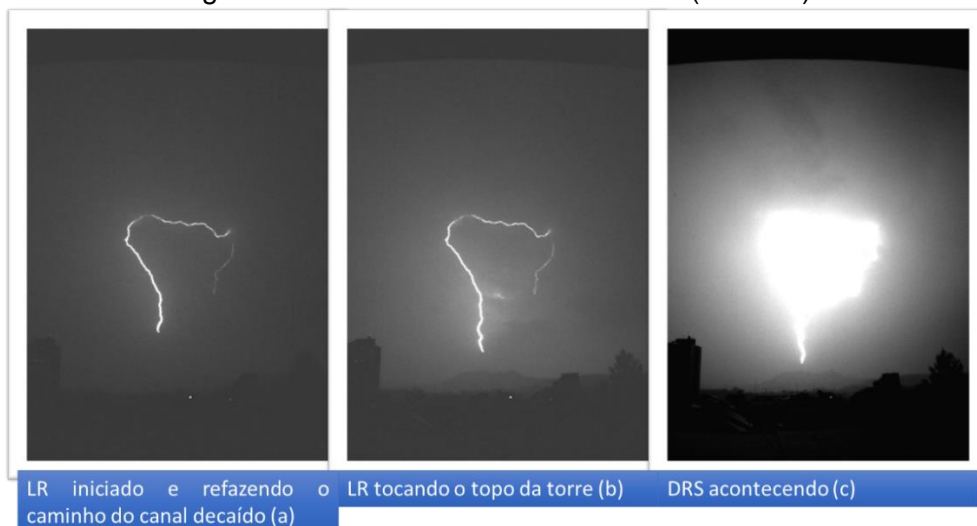
Figura 3.5 - Pulso de CCI durante a fase inicial do raio – fase 2 (caso 53).



Fonte: Produção do autor.

A imagem (a) da Figura 3.5 ilustra a formação do LR, que nas imagens (b) e (c) se conectam com o canal principal e propagam em direção ao topo da torre. A CCI termina juntamente com ausência de luminosidade do canal do raio, indicando o fim da fase 3. Apesar da maioria dos raios terminarem nessa fase, alguns apresentam DRS, como na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Momento do DRS – fase 4 (caso 53).



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 3.6, é possível identificar a DRS. Em (a) identifica-se o LR se desenvolvendo em direção ao solo. Em (b) ele toca o solo e uma intensificação da luminosidade em sentido ascendente acontece, imagem (c), que é denominada como DRS. A contagem CC é iniciada após a ocorrência da DRS.

Na Figura 3.7, se vê os pulsos de corrente que provocam intensificação da luminosidade até o topo da torre durante a fase de CC após a DRS, ou seja, a componente M.

Figura 3.7 - Exemplo de uma componente M após a DRS – fase 6 (caso 53).



Fonte: Produção do autor.

A imagem (a) da Figura 3.7 ilustra o canal existente durante a CC do raio. Na imagem (b), é possível identificar o LR sendo originado próximo a uma extremidade do canal do raio. O LR se propaga no canal em direção ao solo promovendo uma intensificação da luminosidade em sentido descendente até o topo da torre, imagem (c).

É importante ressaltar que os LRs são originados em diferentes ramificações. O LR que produziu a comp. M (Figura 3.7) está localizado na bifurcação mais à direita, direção oposta ao LR que iniciou a CCIp (Figura 3.5). Esse fenômeno indica que o raio possui ramificações que se estendem, e todas essas ramificações têm potencial para enfraquecer e gerar um LR adicional, que eventualmente poderá se conectar ao canal principal do raio e provocar luminosidade até o topo da torre.

À medida que as fases dos raios ocorrem as informações do tempo são anotadas e inseridas em uma planilha. Nesse momento é realizado o cálculo da duração das ocorrências, incluindo o intervalo de tempo entre elas. Um exemplo detalhado desse procedimento pode ser observado na Tabela 3.1, com a amostra do raio 165. Posteriormente, uma análise dos dados coletados é conduzida, seguida por uma comparação com estudos prévios, buscando identificar padrões e tendências relevantes.

Tabela 3.1 - Modelo de análise de dados – raio 165.

Raio	Câmera	Ano	Mês	Dia	Hora	Minuto	Segundo	Microsssegundos	Frame	Tipo de Descarga	Duração (us)
165	V711	2019	1	25	20	7	35	325392	-11496	Início da CCI	0
165	V711	2019	1	25	20	7	35	505801	-4673	CCIp	0
165	V711	2019	1	25	20	7	35	524866	-3952	CCIp	0
165	V711	2019	1	25	20	7	35	537161	-3487	CCIp	0
165	V711	2019	1	25	20	7	35	555908	-2778	CCIp	0
165	V711	2019	1	25	20	7	35	565268	-2424	CCIp	0
165	V711	2019	1	25	20	7	35	566617	-2373	CCIp	0
165	V711	2019	1	25	20	7	35	579176	-1898	CCIp	0
165	V711	2019	1	25	20	7	35	585522	-1658	CCIp	0
165	V711	2019	1	25	20	7	35	588907	-1530	CCIp	0
165	V711	2019	1	25	20	7	35	609478	-762	CCIp	0
165	V711	2019	1	25	20	7	35	609478	-762	CCIp	0
165	V711	2019	1	25	20	7	35	610271	-722	CCIp	0
165	V711	2019	1	25	20	7	35	702843	2779	Término da CCI	377451
165	V711	2019	1	25	20	7	35	742320	4272	DRS e início da CC	0
165	V711	2019	1	25	20	7	35	753901	4710	Comp. M	0
165	V711	2019	1	25	20	7	35	758422	4881	Término da CC	16102
165	V711	2019	1	25	20	7	35	758422	4881	Duração total	413285

Fonte: Produção do autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

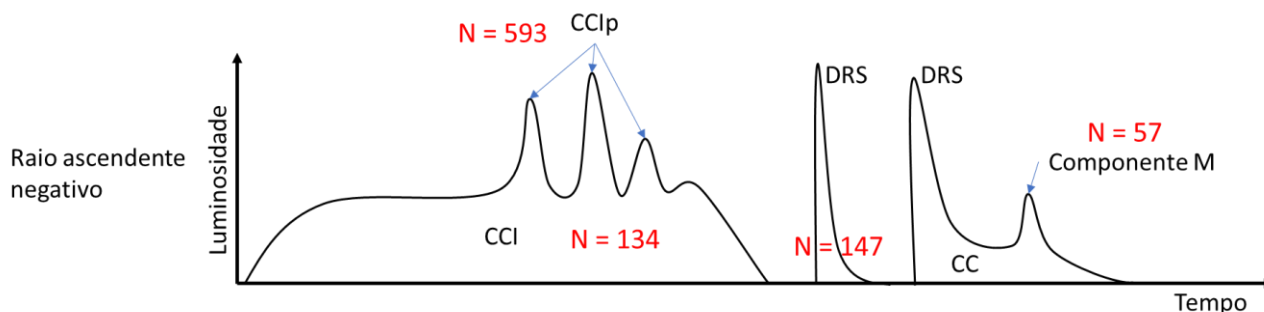
Para o trabalho vigente, todos os 174 raios do banco de dados foram analisados. Em 48 raios não foi possível realizar a análise das etapas, pois as amostras apresentavam dados inconsistentes para a observação, como por exemplo não possuir vídeo de câmera rápida ou já ter o raio iniciado antes do início da gravação do vídeo. Foram analisadas as fases de 134 raios, sendo que em alguns vídeos era possível ver dois raios ascendentes simultâneos. A Tabela 4.1 e a Figura 4.1 mostram os parâmetros que foram coletados durante a realização da pesquisa.

Tabela 4.1 - Análise de 174 raios ascendentes.

Resumo das informações coletadas na pesquisa	
Número de Raios Analisados - CCI iniciado e visualizado	134
Número de Descargas de Retorno Subsequente - Números de Corrente Contínua	147
Raios com dados inconsistentes - não foi possível a análise	48
Número de Pulsos de Corrente Contínua Inicial (CCIp)	593
Número de Componentes M	57
Número de Bifurcações	58
Número de raios com líderes de recuo	58

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.1 - Dados coletados na pesquisa.



Fonte: Produção do autor.

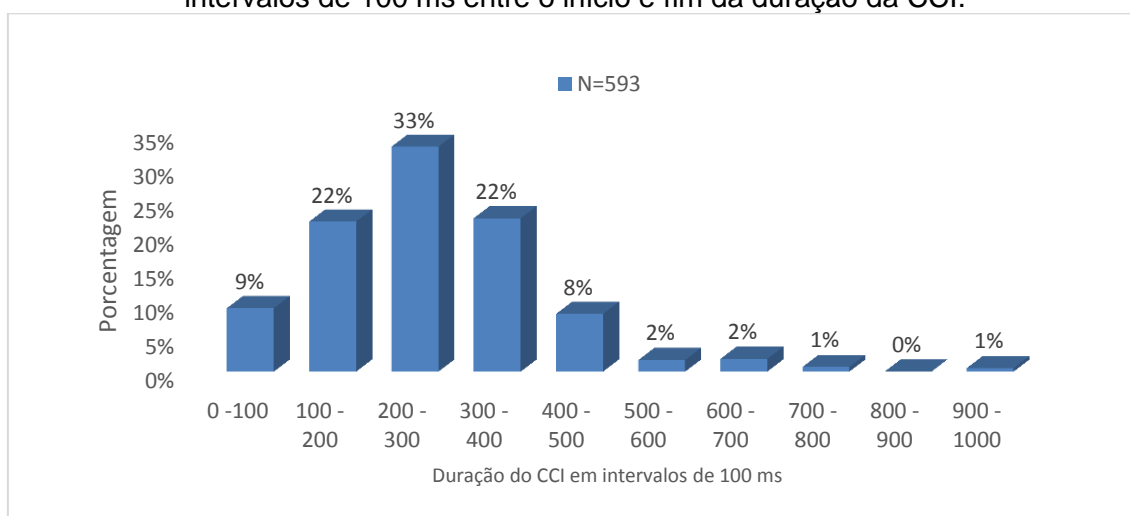
4.1 Primeira fase - Iniciação do líder ascendente na torre de telecomunicação

Durante a primeira fase dos raios ascendentes, foram identificados 134 líderes positivos sendo iniciados em uma torre de telecomunicação.

4.2 Segunda fase - Pulsos de corrente contínua inicial durante o período de corrente contínua inicial

Durante a segunda fase dos raios ascendentes, foram identificados 593 CCIs. O gráfico da Figura 4.2 mostra a distribuição dos intervalos de tempo entre o momento de ocorrência dos CCIs em relação ao início do CCI. Pode-se observar que a maioria (86%) dos CCIs ocorrem dentro dos primeiros 400 ms do início do CCI, com uma proporção significativa acontecendo entre 100 e 400 ms após o início do CCI (77%) e é interessante notar que a ocorrência de CCI diminui gradualmente conforme o tempo avança após 400 ms do início do CCI (14%). Esse comportamento está relacionado com o fato de a maioria, aproximadamente 65%, da CCI dos raios terem duração entre 0 e 400 ms e aproximadamente 35% terem duração superior a 400 ms. A distribuição da duração total do CCI pode ser vista no tópico seguinte na Figura 4.6.

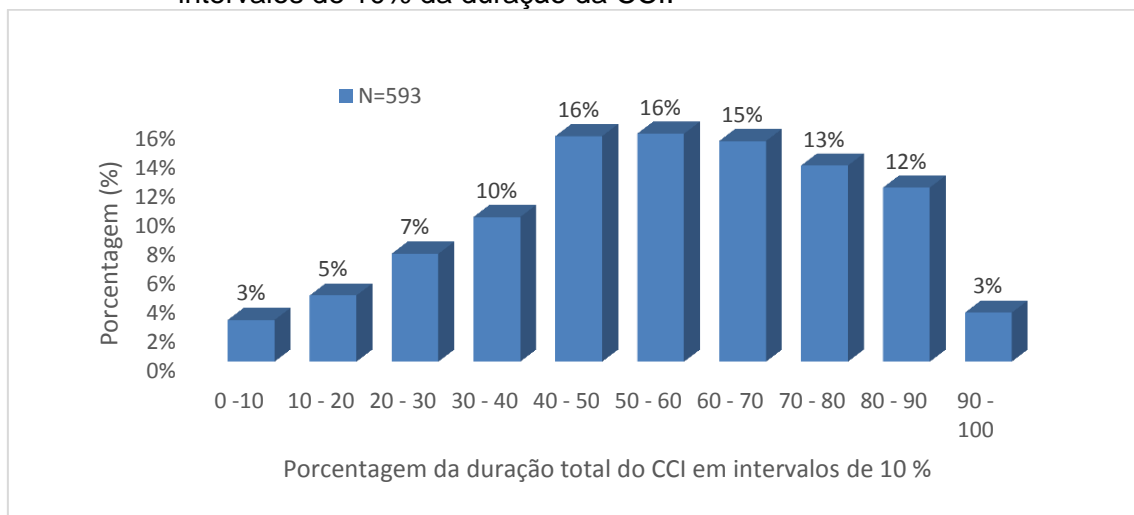
Figura 4.2 - Porcentagem da ocorrência de CCI (N=593) que acontecem em intervalos de 100 ms entre o início e fim da duração da CCI.



Fonte: Produção do autor.

O gráfico apresentado na Figura 4.3 ilustra a frequência dos CCIp durante a CCI em relação à porcentagem da duração total do evento. Observou-se que os pulsos de CCI se tornam mais frequentes (75% da ocorrência de CCIp) após os 40% do tempo que se passou desde o início da CCI, e questionou-se, durante a pesquisa, o porquê de os CCIs não serem mais frequentes no início da CCI. Tal questionamento provocou o estudo das características físicas que antecedem os CCIs em um raio ascendente e gerou uma análise de quando ocorrem a bifurcação e o primeiro LR no raio ascendente. Os dados sobre esses fenômenos físicos estão apresentados nas figuras Figura 4.4 e Figura 4.5.

Figura 4.3 - Porcentagem da ocorrência de CCIp (N=593) que acontecem em intervalos de 10% da duração da CCI.

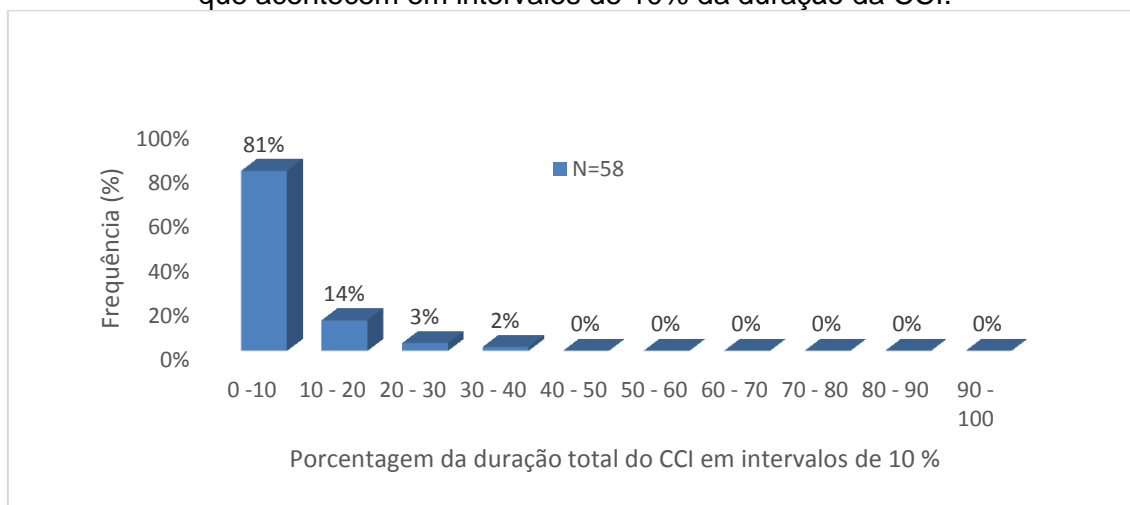


Fonte: Produção do autor.

Durante a coleta de dados do momento da bifurcação e do primeiro líder de recuo presente nos raios ascendentes percebeu-se que esses eventos ocorrem bem antes do primeiro CCIp.

Início da Bifurcação: A frequência de início da bifurcação do líder ascendente durante a CCI, pode ser vista na Figura 4.4, observa-se que cerca de 81% do início das bifurcações começa nos primeiros 10% da CCI, ou seja, estão bem no início.

Figura 4.4 - Porcentagem de ocorrência de início da bifurcação do líder ascendente que acontecem em intervalos de 10% da duração da CCI.



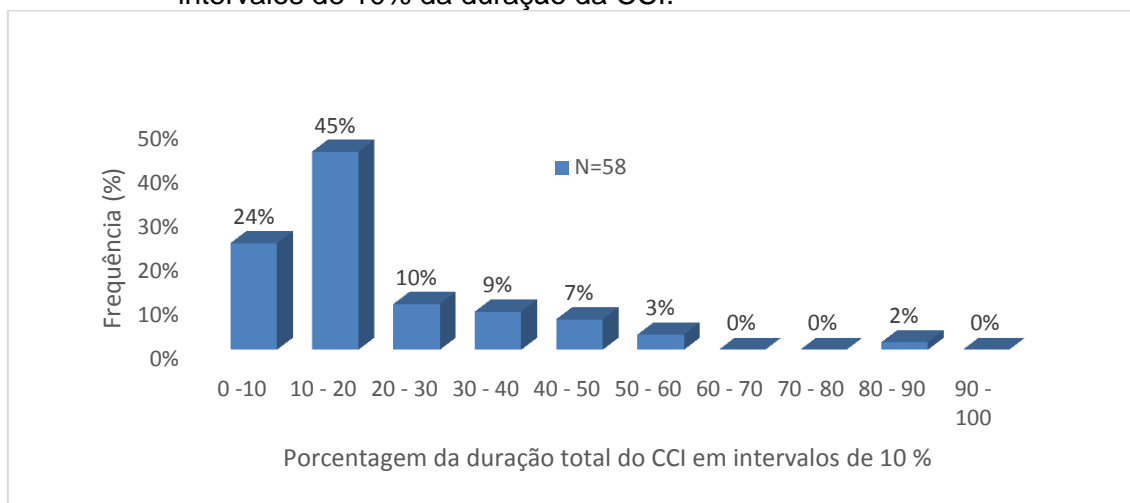
Fonte: Produção do autor.

Primeiro Líder de Recuo: A presença do primeiro líder de recuo durante a CCI é uma indicação importante sobre a instabilidade dos líderes ascendentes nessa fase. Os líderes de recuo costumam acontecer quando o líder positivo no seu movimento ascendente perde intensidade e se enfraquece. Os primeiros líderes de recuo identificados nos raios ascendentes estão descritos na Figura 4.5. Observar-se que a maioria (55%) deles ocorrem entre 10% e 30% da duração da CCI, ou seja, depois da primeira bifurcação (entre 0 e 10%) e antes de iniciarem os CCIp (a partir dos 40%).

À medida que o raio inicia seu processo de bifurcação, o líder positivo associado começa a manifestar instabilidades em suas extremidades devido à redução gradual da corrente que se propaga através de suas ramificações. Após esse processo de decaimento, na região próxima à extremidade da ramificação do líder original, surgem líderes bipolares e bidirecionais que se originam na área decaída da ramificação do líder original.

Esse líder se propaga pelo canal principal em direção à região de origem do raio ascendente. Esse fenômeno específico é caracterizado como um líder de recuo, dada a sua ação de retrair em direção oposta o trajeto do líder ascendente original.

Figura 4.5 - Porcentagem de ocorrência do primeiro líder de recuo que acontece em intervalos de 10% da duração da CCI.



Fonte: Produção do autor.

Intensificação dos CCIPs: alguns líderes de recuo evoluem para os CCIPs, que são líderes de recuo mais intensos que alcançam o topo da torre com luminosidade. Esses CCIPs podem contribuir para a duração prolongada do raio ascendente negativo, pois adicionam corrente elétrica à descarga.

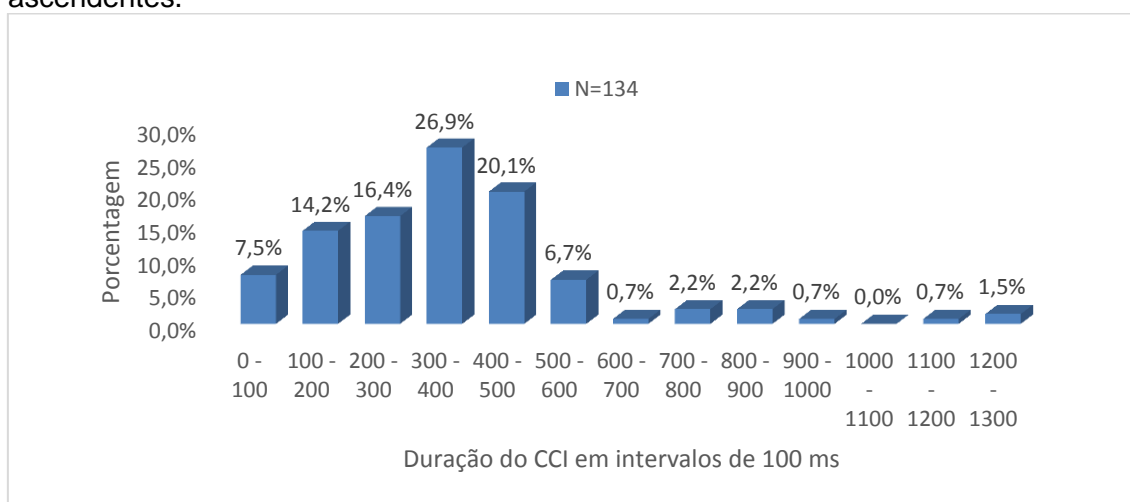
Em resumo, os resultados obtidos sugerem que o início da bifurcação durante a CCI, com a diminuição da corrente em cada ramo e a subsequente formação de líderes de recuo, desempenha um papel fundamental na determinação da duração dos raios ascendentes.

Ao considerarmos que 75% dos CCIPs ocorrem após 40% do tempo desde o início da CCI, e levando em conta que a média aritmética da duração da CCI é de 361 ms (conforme será exposto na Tabela 4.2), é possível inferir que a maioria dos CCIPs ocorrem após aproximadamente 144 ms desde o início da CCI. No caso dos raios descendentes negativos, observou-se a ocorrência das comp. M (fenômeno similar aos CCIP (LR) nos raios ascendentes) logo após cerca de 42 ms a partir do início dos raios descendentes, conforme identificado por Campos (2007). Esses dados reforçam que os raios ascendentes demandam um período mais longo de desenvolvimento do líder para a ocorrência dos CCIP em comparação com o tempo que antecede as componentes M dos raios descendentes.

4.3 Terceira fase - Medição da duração da corrente contínua inicial nos raios ascendentes

Durante a terceira fase dos raios ascendentes, foram realizadas medições do tempo de duração de todas as CCI presentes nos 134 raios analisados.

Figura 4.6 - Porcentagem de duração da corrente contínua inicial nos raios ascendentes.



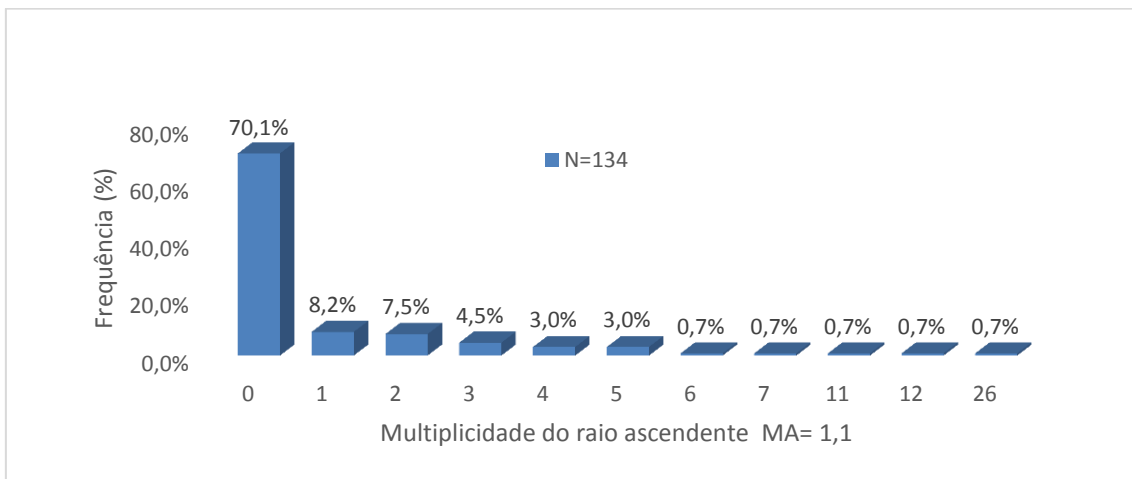
Fonte: Produção do autor.

Pode-se observar na Figura 4.6 a distribuição da porcentagem de ocorrência do CCI em relação ao início do raio ascendente. Nota-se que a maioria dos raios ascendentes apresentam uma CCI com duração predominantemente concentrada na faixa entre 200 ms e 500 ms, representando cerca de 63% dos casos analisados.

Os resultados da duração da CCI são relevantes para elucidar a duração total do raio ascendente, esse assunto está detalhado no Tópico 4.6.

Para finalizar a terceira fase e iniciar a quarta fase é importante analisar a Figura 4.7 que fornece informações se os RA possuem ou não descarga de retorno subsequente (DRS) e sobre a multiplicidade do raio.

Figura 4.7 - Distribuição da multiplicidade dos raios ascendentes.



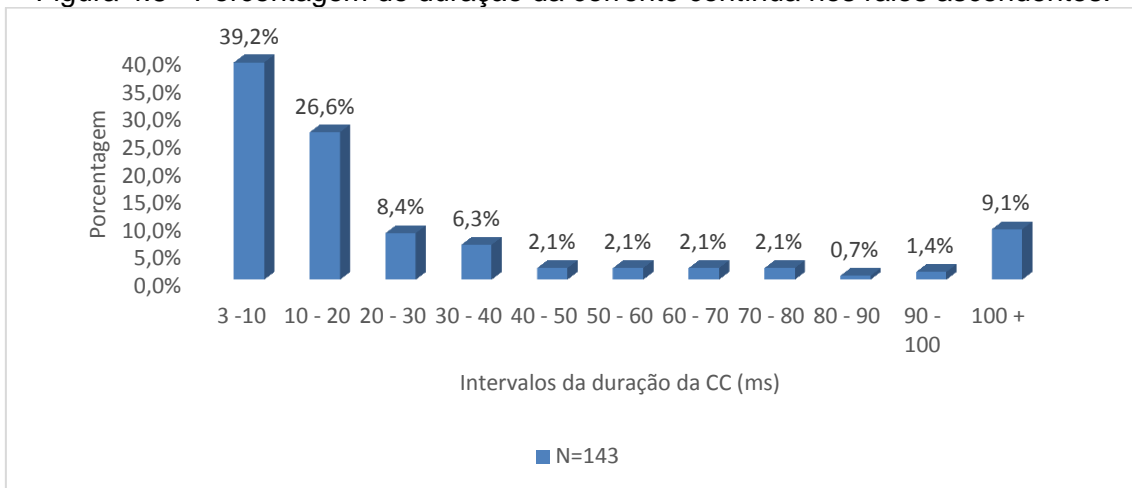
Fonte: Produção do autor.

Observa-se que cerca de 70% dos raios ascendentes analisados (94 de 134) encerram seu ciclo na fase 3, possuindo somente a CCI. Para os raios com multiplicidade maior ou igual a 1, que correspondem a 30% do total, se faz necessário a análise das fases 4, 5 e 6.

4.4 Quarta e quinta fase – Início e término das correntes contínuas dos raios ascendentes

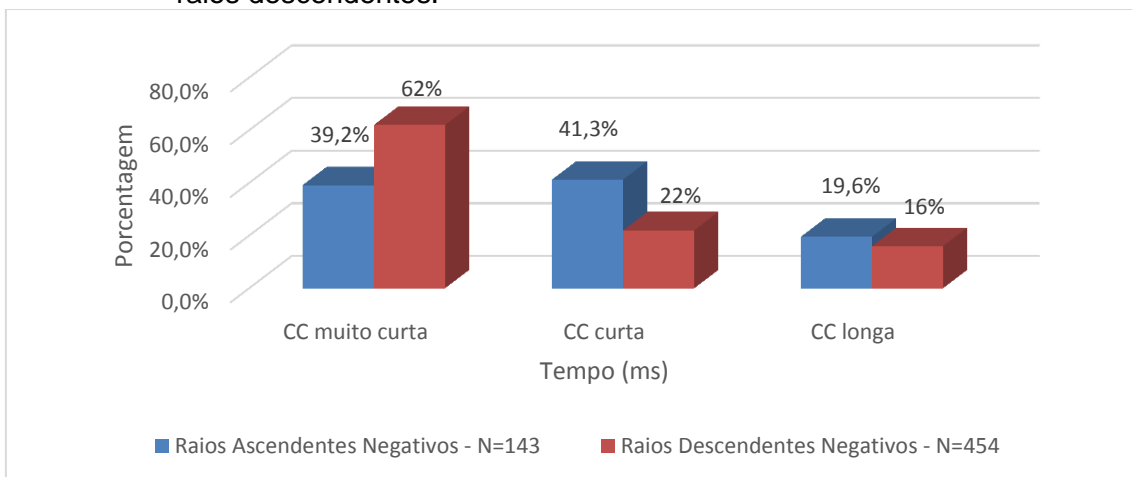
Dos 134 raios ascendentes analisados, 40 (30%) apresentaram CC. Um raio que possui CC pode possuir mais de uma CC dentro de sua duração e, portanto, desses 40 foram observados 143 eventos de CC. As figuras Figura 4.8 e Figura 4.9 ilustram a distribuição da duração da CC nos raios ascendentes e mostram uma predominância de raios com CC de duração curta (39,2%) e muito curta (41,3%).

Figura 4.8 - Percentagem de duração da corrente contínua nos raios ascendentes.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.9 - Percentagem de duração da corrente contínua nos raios ascendentes e raios descendentes.



Fonte: Adaptado de Saba, Pinto Junior e Ballarotti (2006b).

De acordo com o estudo de Saba, Pinto Junior e Ballarotti (2006b) foi observado um conjunto de 248 raios descendentes negativos seguidos por CC. A distribuição das durações da CC nesses raios pode ser observada na Figura 4.9.

A comparação dos dados revela algumas diferenças entre as descargas ascendentes e descendentes. Enquanto nos raios ascendentes, a maior percentagem de CC foi classificada como curta (41,3%), seguida pelas muito

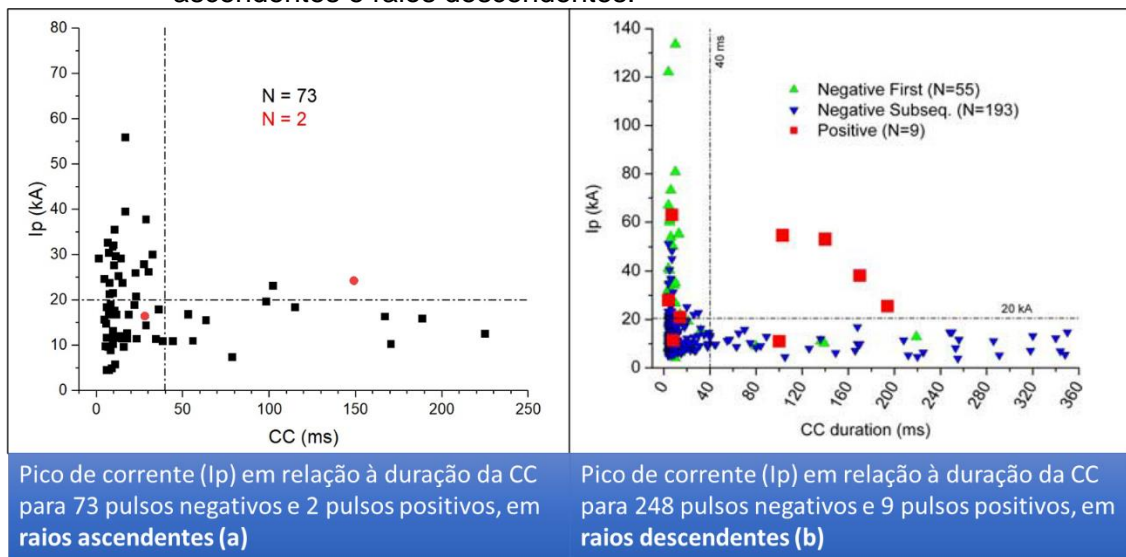
curtas (39,2%) e longas (19,6%), nos raios descendentes negativos, a maior porcentagem de CC foi classificada como muito curta (62%), seguida pelas curtas (22%) e longas (16%). Portanto, é possível observar que as descargas ascendentes tendem a apresentar uma maior proporção de CC de duração curta, enquanto as descargas descendentes negativas tendem a ter uma quantidade maior de CC muito curta.

A interpretação do gráfico da Figura 4.9 sugere uma hipótese plausível para explicar a frequência de CCs curtas e longas nos RAs em comparação com os RDNs. A diferença pode ser atribuída ao desenvolvimento da CCI nos RAs. Devido à CCI ter uma longa duração, o canal de descarga se estabelece de maneira mais consistente, formando ramificações extensas em direção à base da nuvem. Esse cenário favorece a ocorrência de CCs com durações maiores nos RAs em comparação com os RDNs. Os RDNs não possuem uma CCI, o que resulta em CCs de duração menor.

Para uma interpretação mais precisa das CCs nos RAs, também foi analisado o pico de corrente (I_p) das DRSs que deram origem às CCs. Na Figura 4.10(a) estão apresentados os valores desses picos de corrente e as correspondentes durações das CC subsequentes às DRSs. Além disso, na Figura 4.10(b), são mostrados os picos de corrente e as CCs dos RDNs. É notável observar que, em ambas as situações, há uma zona de exclusão, onde raios com CCs de longa duração não exibem picos de corrente superiores a aproximadamente 20 kA. As zonas de exclusão são válidas somente para as DRSs de polaridade negativa, quando a polaridade é positiva o comportamento ainda precisa ser melhor estudado para as inferências serem geradas.

Para CCs muito curtas e curtas, as I_p s das DRSs variam em sua maioria entre 0 e 40 kA, tanto para RDNs quanto para RAs. Esse padrão confirma a semelhança entre os comportamentos das DRSs nos RAs e nos RDNs.

Figura 4.10 - Pico de corrente no início das correntes contínuas para raios ascendentes e raios descendentes.



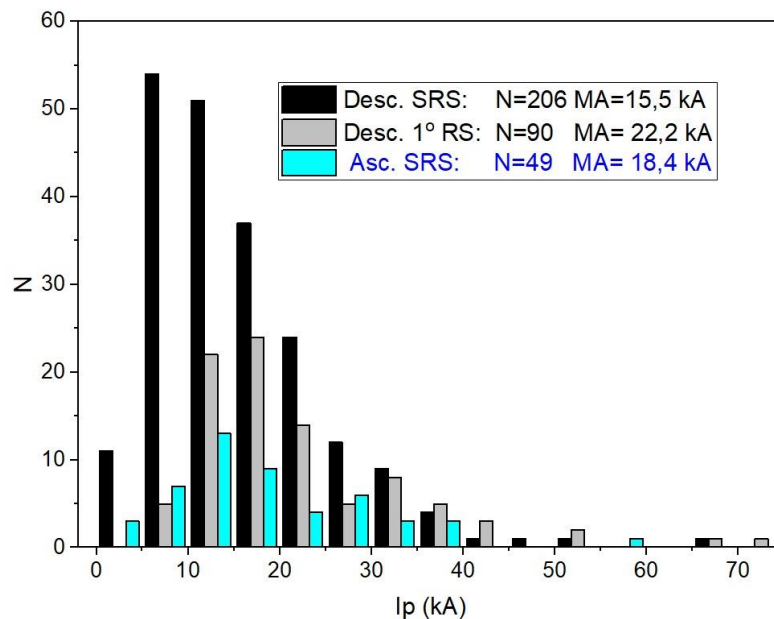
Fonte: Adaptado de Saba, Pinto Junior e Ballarotti (2006b).

O gráfico da Figura 4.11 apresenta a distribuição dos picos de corrente das DRS dos RDNs e RAs, assim como para a DR dos RDNs. Os dados referentes aos RDNs foram obtidos de Saba, Pinto Junior e Ballarotti (2006b), enquanto os dados dos RAs foram coletados no presente estudo. Foi estabelecida uma análise para os RAs nos anos de 2016 a 2018, os mesmos anos dos RDNs, visando uma comparação durante um período uniforme. Testes estatísticos (Teste T) realizados com as distribuições mencionadas indicaram que não há diferenças estatisticamente significativas ao comparar os dados das DRSs dos RAs com as DRSs e DRs dos RDNs. O Teste T é um teste estatístico frequentemente utilizado para testar hipóteses sobre diferenças entre até duas médias.

Observa-se que as DRSs dos RAs são mais intensas em relação às dos RDNs. Apesar dessa maior intensidade, verifica-se uma maior incidência de eventos de CC tanto curta quanto longa nos RAs (Figura 4.9). Isso se deve a um maior condicionamento do canal, resultante de uma CCI longa precedendo as DRSs nos RAs e tempos reduzidos entre as DRSs e entre a CCI e a primeira DRS nos RAs (Tópico 4.8). É relevante ressaltar que a média dos picos de corrente das DRSs dos RDNs é inferior à dos RAs, não devido aos picos de corrente

mais intensos nos RAs, mas sim pela presença de muitos picos de corrente nos RDNs que são inferiores a 20 kA.

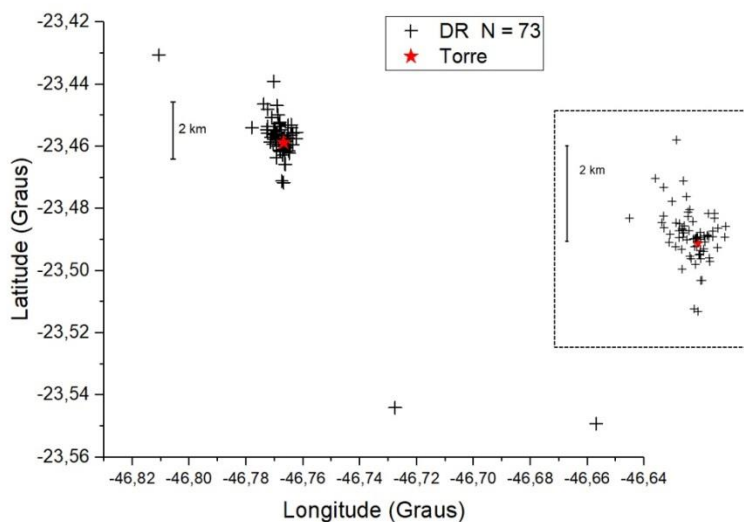
Figura 4.11 - Distribuição dos picos de corrente para a descarga de retorno dos raios descendentes negativos e para as descargas de retorno subsequente dos raios descendentes negativos e raios ascendentes.



Fonte: Adaptado de Saba, Pinto Junior e Ballarotti (2006b).

Por último, realizou-se uma análise da localização das DRS nos RAs com o objetivo de averiguar a precisão de localização do sistema de detecção utilizado neste estudo. O sistema utilizado para as análises foi o *Earth Networks Total Lightning Network* (ENTLN), método que precisa que três ou mais sensores para calcular a localização dos raios. O gráfico apresentado na Figura 4.12 ilustra a distribuição da localização das descargas em torno da torre de telecomunicação do Pico do Jaraguá (ponto vermelho da Figura 4.12). Em 70 dos 73 casos analisados, observou-se que o erro de distância entre o ponto de ocorrência informado pelo sistema de localização e a torre principal, responsável pela geração dos raios ascendentes, situa-se abaixo de 3 km, com a maioria das ocorrências concentradas em uma distância menor do que 1 km.

Figura 4.12 – Localização da torre telecomunicação do Pico do Jaraguá - SP e os pontos indicados pelo sistema de localização das descargas de retorno subsequentes dos raios ascendentes.



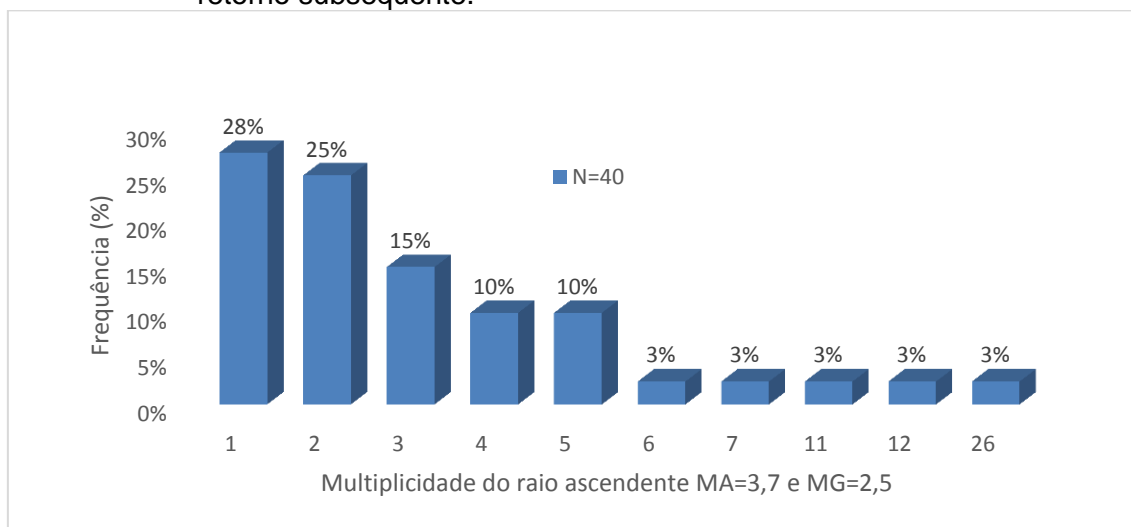
Fonte: Produção do autor.

4.5 Sexta Fase – Ocorrência da descarga de retorno subsequente e contagem das componentes M

De acordo com a Figura 4.7 aproximadamente 30% (40 de 134) dos raios ascendentes alcançaram a fase 4 (descarga de retorno subsequente) e puderam prosseguir para as fases 5 e 6, dependendo das características específicas de cada raio.

É importante destacar que os raios com multiplicidade maior ou igual a 1 demonstram características distintas e mais complexas em seu comportamento. Eles podem apresentar componentes M, durante a fase de CC após a DRS. Esses pulsos são causados pelos LR que se propagam pelo canal decaído do líder ascendente provocando uma intensificação da corrente e da luminosidade. A Figura 4.13 exibe a multiplicidade dos raios que possuíram DRS. Essas informações serão comparadas ao dos raios descendentes no Tópico 4.7.

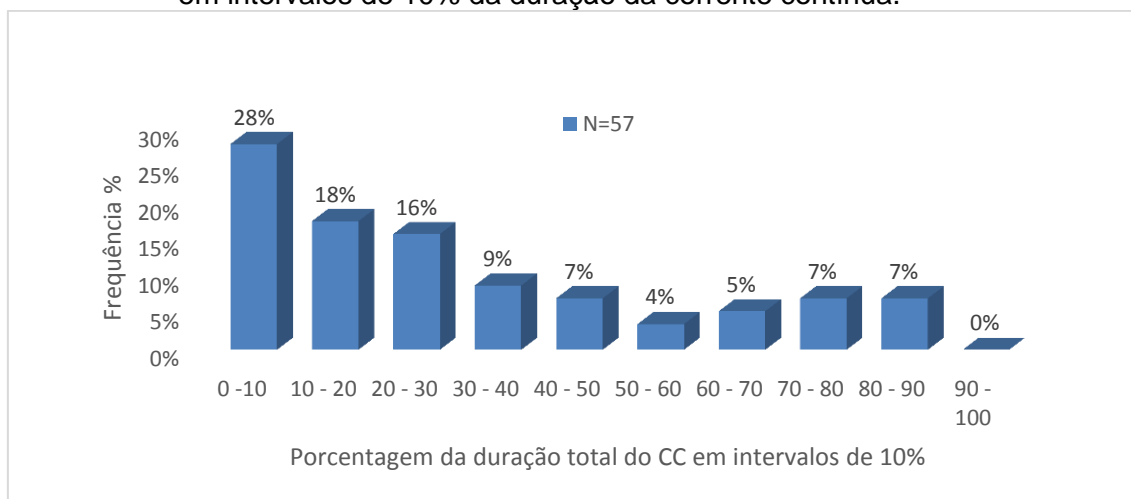
Figura 4.13 - Distribuição da multiplicidade para raios que possuíram descarga de retorno subsequente.



Fonte: Produção do autor.

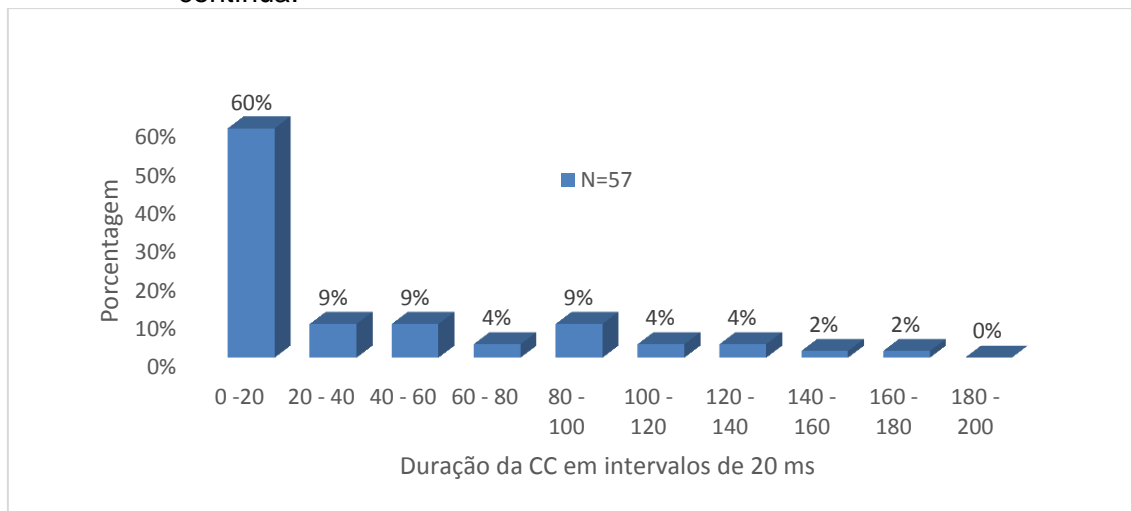
Dos 40 raios ascendentes que apresentaram descarga de retorno subsequente, foram identificados um total de 57 ocorrências de componente M durante a CC. A distribuição dessas ocorrências ao longo do tempo da CC pode ser observada a partir das Figura 4.14 e Figura 4.15.

Figura 4.14 - Porcentagem da ocorrência de componente M (N=57) que acontecem em intervalos de 10% da duração da corrente contínua.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.15 - Porcentagem da ocorrência da componente M (N=57) que acontecem em intervalos de 20 ms entre o início e fim da duração da corrente contínua.



Fonte: Produção do autor.

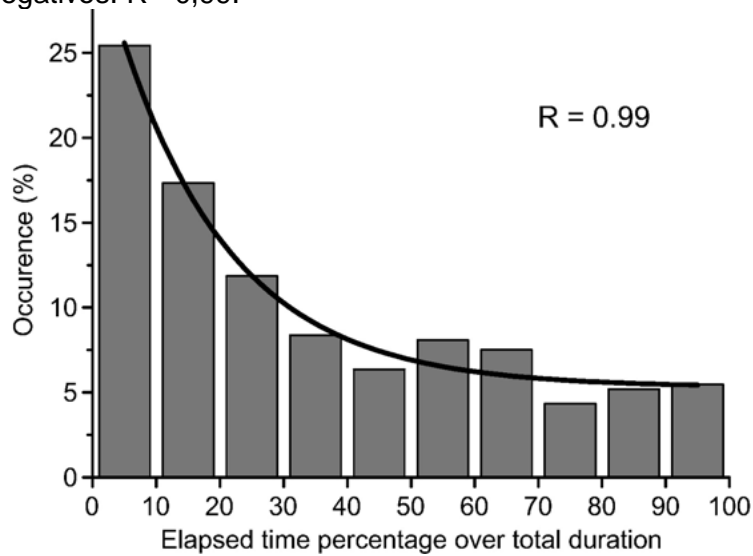
Esses resultados indicam que as ocorrências de componentes M nos raios ascendentes são mais frequentes nos primeiros 20 ms da descarga (60% dos casos). A distribuição da ocorrência de comp. M em relação ao tempo normalizado da CC, mostra que 28% das comp. M ocorrem nos primeiros 10% do tempo da CC e que 62% das comp. M ocorrem nos primeiros 30% do tempo da CC, ou seja, elas são mais frequentes no início da CC.

Nos raios descendentes negativos que possuem multiplicidade maior ou igual a 1 após a DR, ocorre a formação da DRS. Da mesma forma, nos raios ascendentes com multiplicidade maior ou igual a 1 após o final da CCI, também se observa a formação da DRS. Tanto nos casos de raios ascendentes (RAs) quanto raios descendentes (RD), a DRS formada pelo LR, apresentam comp. M que ocorrem durante o período da CC.

Os gráficos das Figura 4.14 e Figura 4.16 mostram uma distribuição semelhante das comp. M nos raios ascendentes e descendentes em relação ao tempo total de CC. Nos raios ascendentes, aproximadamente 62% das componentes M ocorrem nos primeiros 30% da duração da CC, assim como nos raios descendentes, cerca de 53% das componentes M ocorrem nos primeiros 30% da duração da CC (CAMPOS et al., 2007).

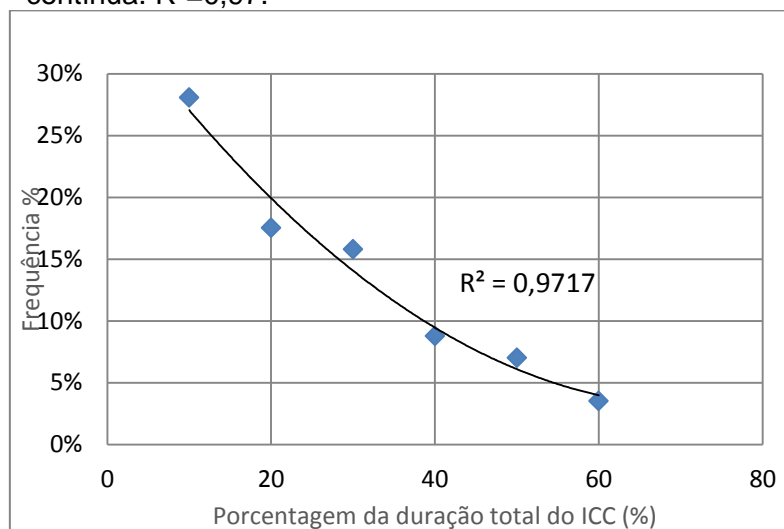
Vale ressaltar que, nas situações em que ocorrem as componentes M em um raio, o comprimento total do canal de descarga já está bem definido devido à ocorrência da DRS. Então nesses casos é possível observar que as comp. M tendem a ocorrer no início da CC (Figura 4.16). Por outro lado, nos casos dos CClp em um raio ascendente, o canal ainda está em processo de desenvolvimento, por isso, aproximadamente 75% dos primeiros CClp ocorrem após 40% do início da CCl.

Figura 4.16 - Ocorrência da porcentagem de tempo decorrido dos componentes M sobre a duração total da corrente contínua em raios descendentes negativos. $R^2=0,99$.



Fonte: Campos et al. (2007).

Figura 4.17 - Frequência de componente M no raio ascendente durante a corrente contínua. $R^2=0,97$.



Fonte: Produção do autor.

Tanto nos raios ascendentes como nos descendentes analisados no trabalho de Campos et al. (2007), observa-se que a frequência das comp. M seguem o mesmo padrão de decaimento com qualidade de ajuste R^2 similares (Figura 4.16 e Figura 4.17). Isso sugere que o processo físico que rege das comp. M nos RDN e RA são semelhantes. O que não se pode dizer com relação às CClp pelos motivos expostos acima.

Para observarmos a semelhança entre as CC dos RA e as CC dos RDN podemos também comparar a frequência das componentes M durante os períodos de CC dos dois tipos de raios. É conhecido que o número médio de comp. M por CCLs (corrente contínua longa) nos RDN é de 5,5 (CAMPOS et al., 2007).

Nos RAs analisados neste estudo, foram identificadas 57 comp. M nas 147 CCs dos RAs, resultando em uma média de 0,4 comp. M por C. Para os 28 casos de CCL obteve-se uma média de 1,6 comp. M por CCL. Isto mostra que durante as CCL nos RA a frequência de LRs produzindo comp. M é aproximadamente 3 vezes menor do que nas CCL dos RDN.

No entanto se compararmos a frequência de LR produzindo CClp durante as CCI dos RA, encontramos uma taxa de 4,4 CClp por CCI (593 CClps em 134 CCI).

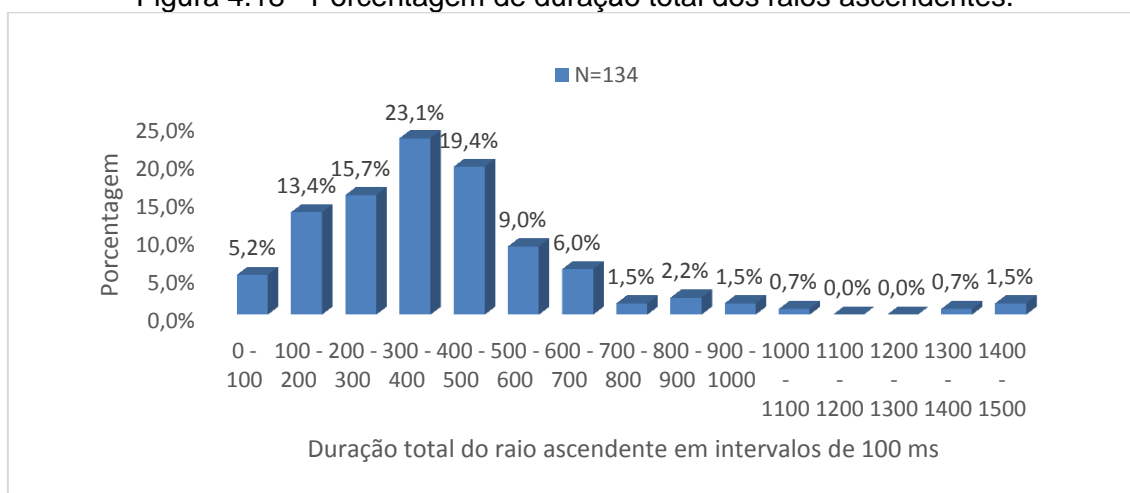
Para o RA, considerando que tanto as comp. M durante a CCL e os CClps durante a CCI são todos LR, pode-se obter que a média de LR nos RA é igual a: $1,6 \text{ compM/CCL} + 4,4 \text{ CClp/CCI} = 6,0 \text{ LR/CC}$. Ou seja, uma frequência similar à de comp. M nas CCL dos RDN.

A razão física desta semelhança é um tema que merece um estudo mais aprofundado e que poderia ser feito com uma análise criteriosa da perturbação no campo elétrico produzido durante estas fases.

4.6 Duração total do raio ascendente

Com base na análise dos 134 eventos foi possível determinar a duração total dos RAs, que compreende desde o início da CCI até o final da última fase relacionada a essas descargas. Os RAs possuem uma duração total concentrada em sua maioria entre 100 e 700 ms (77,6%), com poucos raios superando 1 s (Figura 4.18).

Figura 4.18 - Porcentagem de duração total dos raios ascendentes.



Fonte: Produção do autor.

Ao analisar os dados da Figura 4.18, é possível fazer uma comparação entre a duração total dos raios ascendentes e a duração da CCI (Figura 4.6) que representa a primeira fase dessas descargas. Observa-se que a duração da CCI é, de fato, o aspecto mais predominante na duração total do raio ascendente.

A Tabela 4.2 mostra que o valor da média aritmética (MA) da duração total do RA é 400 ms, enquanto a MA da duração da CCI é 361 ms. Ao se utilizar a média geométrica (MG) para a comparação, os valores de MG para a duração total do RA é 325 ms e da duração da CCI é 291 ms. Tanto para a MA e MG os valores entre duração total do RA e duração da CCI se aproximam e pode-se concluir por meio da razão entre esses valores que o tempo médio de duração da CCI representa aproximadamente 90% do tempo médio de duração total do RA.

Tabela 4.2 - Resumo dos resultados do presente trabalho.

	Número de amostras	Min	Max	Média Aritmética	Média Geométrica	Mediana	Desvio Padrão
Corrente contínua inicial ICC - duração (ms)	134	4,4	1259	361	291	331	218
Corrente contínua CC - duração (ms)	143	3,1	278	33	17	12	49
Duração total do raio ascendente (ms)	134	4,4	1456	400	325	360	250
Multiplicidade do raio ascendente que possui descarga de retorno (>=1)	40	1	26	3,7	2,5	2	4,4
Multiplicidade do raio ascendente	134	0	26	1,1	-	-	2,9

Fonte: Produção do autor.

A CCI está presente em todos os RAs analisados contribuindo de forma significativa para a duração total do RA já que apenas 30% possuem DRS.

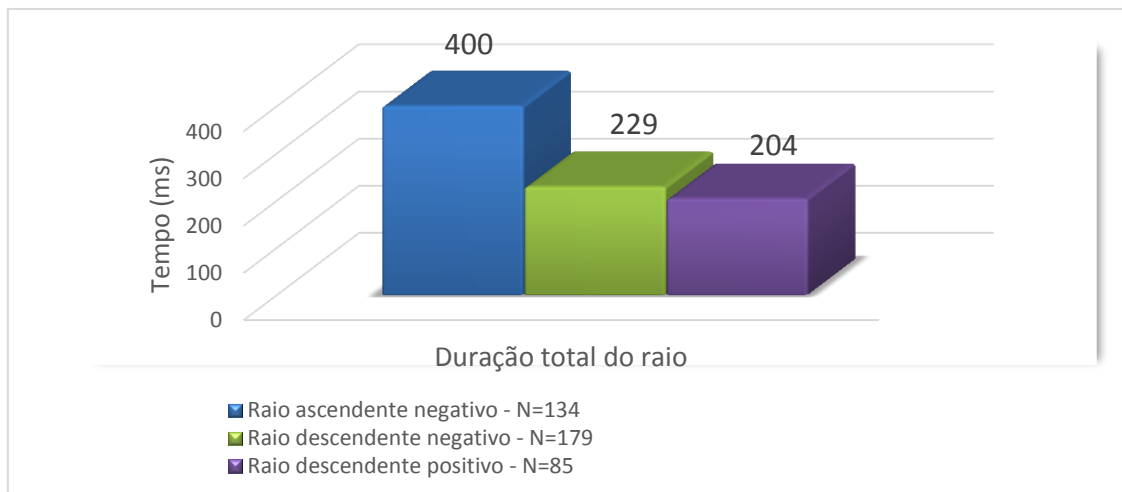
4.7 Comparação entre raios ascendentes negativos, raios descendentes positivos e raios descendentes negativos

Como indicado no Tópico 4.6, o valor médio da duração da CCI corresponde aproximadamente 90% do valor médio da duração total do raio ascendente. Em

contrapartida, a duração média da corrente contínua do raio ascendente negativo compreende apenas 8% do valor médio da duração total do raio.

Para a comparação entre a duração total dos RANs, RDNs e RDPs utilizou-se o trabalho de Saba et al. (2010) para os RDPs e o trabalho de Saraiva et al. (2010) para os RDNs (Figura 4.19).

Figura 4.19 - Comparação da média aritmética da duração total dos raios.

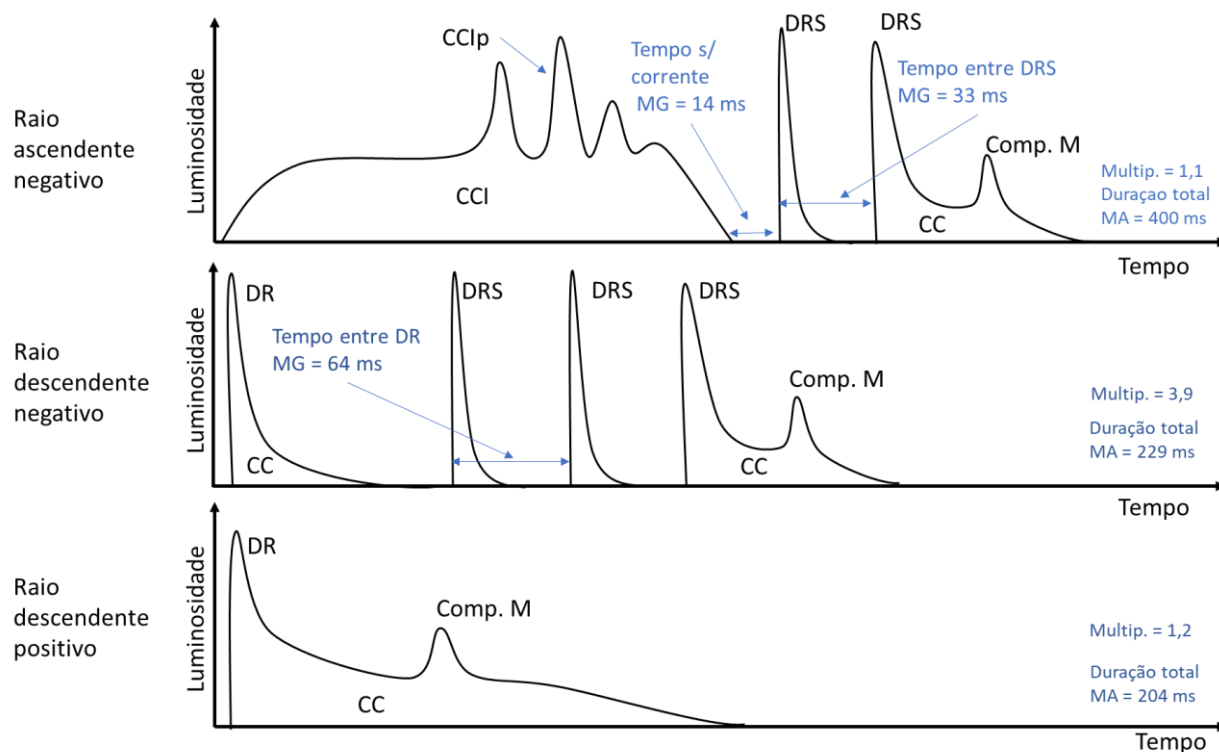


Fonte: Produção do autor.

A análise mostra que a duração total dos raios ascendentes negativos (MA=400 ms) é aproximadamente o dobro tanto da duração total dos raios descendentes negativos (MA=229 ms) quanto da duração total dos raios descendentes positivos (MA=204 ms).

A Figura 4.20 apresenta o perfil da luminosidade dos raios durante seu desenvolvimento.

Figura 4.20 - Evolução temporal dos raios ascendente, descendente negativo e descendente positivo de acordo com sua luminosidade.



Fonte: Produção do autor.

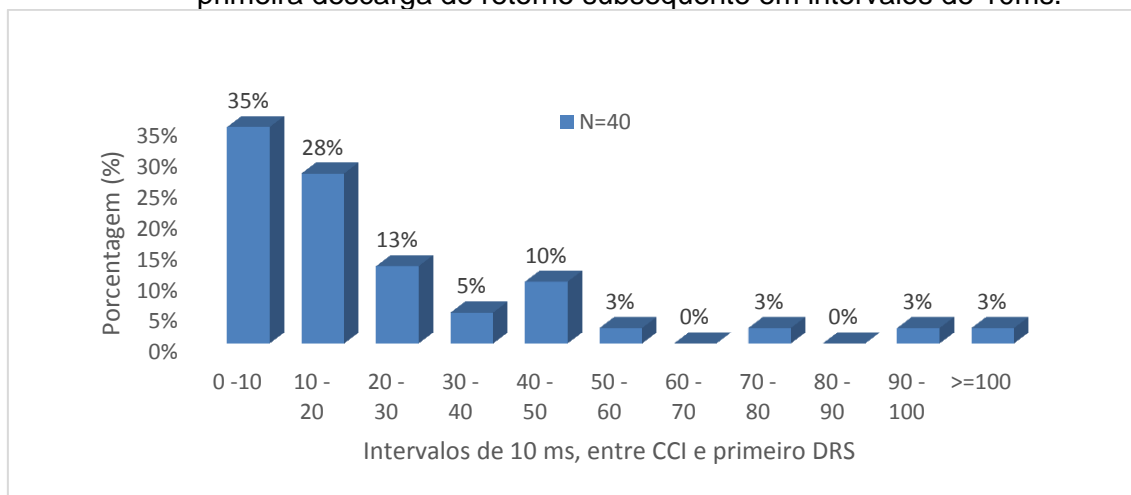
No decorrer da presente pesquisa, surgiram questionamentos a respeito da duração dos RAs ser maior do que os RD, apresentando uma diferença de quase 200 ms. Inicialmente, considerou-se a possibilidade de que essa diferença decorresse do fato de que os RAs possuem seu tempo de início contabilizado a partir do momento em que se originam nas torres, enquanto os RDs têm seu início aferido no momento em que tocam o solo. Essa distinção temporal, embora relevante, não se mostrou suficiente para explicar plenamente essa discrepância. Considerando que o intervalo de tempo entre a formação do líder bipolar bidirecional, que dá origem a um RD, e o momento em que efetivamente toca o solo, segundo Rakov e Uman (1990) e Thottappillil (2002), é da ordem de aproximadamente 35 ms e 26 ms respectivamente, essa diferença de aproximadamente 30 ms não pode ser responsável pelo acréscimo de 200 ms na duração dos RAs em relação aos RDs.

Uma possível explicação para a duração maior dos RA seria que, nos RDs, o contato do líder descendente com o solo proporciona, ao promover a descarga de retorno, o fim da fase de desenvolvimento do líder descendente negativo. Em contrapartida, nos RAs os líderes se originam no solo e propagam em direção aos centros de carga nas nuvens de tempestades. No entanto, esses centros não funcionam como um eletrodo tradicional para a dissipação e descarga elétrica do RA. Como resultado, o RA percorre um trajeto extenso e de longa duração na região próxima à base da nuvem, se expandindo até que ocorra seu decaimento.

4.8 Tempo entre as descargas de retorno subsequente e tempo entre a corrente contínua inicial e descargas de retorno subsequente

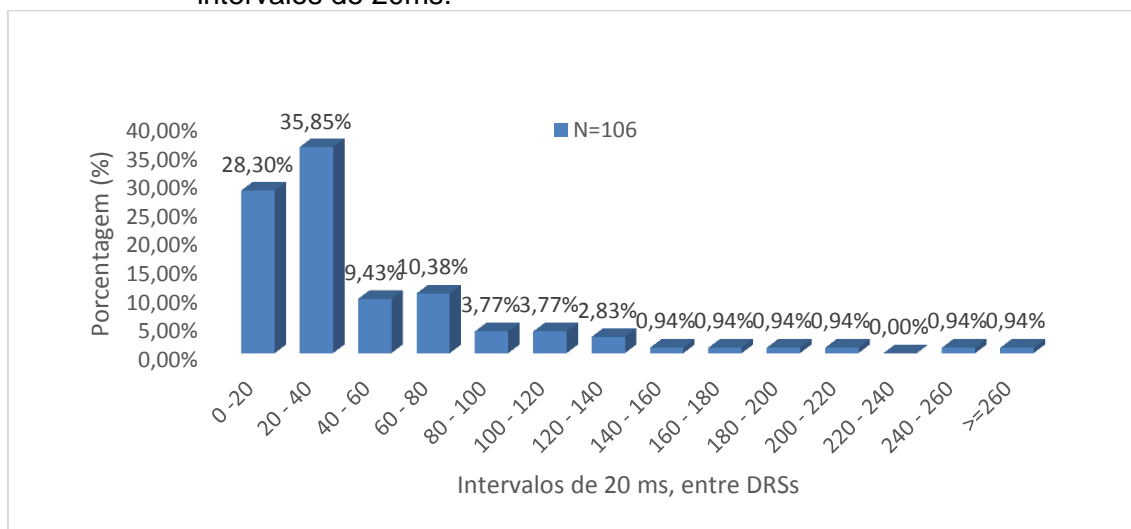
A análise dos RA que apresentam DRS incluiu a investigação dos intervalos de tempo entre o término da CCI e a primeira DRS, bem como entre as próprias DRS. As distribuições desses intervalos estão ilustradas nas Figura 4.21 e Figura 4.22.

Figura 4.21 - Porcentagem dos tempos entre o final da corrente contínua inicial e primeira descarga de retorno subsequente em intervalos de 10ms.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.22 - Porcentagem dos tempos entre descargas de retorno subsequentes em intervalos de 20ms.



Fonte: Produção do autor.

Inicialmente, era esperado que os intervalos entre as DRS encontrados para os RAs fossem semelhantes aos intervalos entre as DRS dos RDNs, por se tratar do mesmo fenômeno com a origem em um líder de recuo, conforme discutido no Tópico 4.4. Entretanto, os resultados não atendem essa expectativa.

Por meio da Tabela 4.3 (e da Figura 4.20), observa-se que o intervalo médio entre as DRS nos RDN foi de 64 ms, enquanto nos RA foi significativamente menor, apenas 33 ms. Notavelmente, o intervalo médio entre a CCI e a primeira DRS nos RA foi ainda mais curto, totalizando 14 ms. Vale ressaltar que, de acordo com a Tabela 4.3, é mais apropriado utilizar os valores de média geométrica (MG) para avaliar os intervalos entre as descargas, dado que a amostra exibe um comportamento em que a mediana se aproxima mais da MG do que da média aritmética (MA) (distribuição lognormal).

Tabela 4.3 - Comparação dos tempos entre descargas.

	N	MA (ms)	MG (ms)	Mediana (ms)
RA - Tempo sem corrente (entre CCI e DRS) - Este Trabalho	40	26,7	13,6	16,0
RA - Tempo entre DRSs - Este Trabalho	106	49,3	33,2	30,4
RA - Tempo entre DRSs - Diendorfer (2009)	476		17,3	18,6
RA - Tempo entre DRSs - Schumann (2016) Brasil	20	54,3	40,7	39,3
RA - Tempo entre DRSs - Schumann (2016) USA	41	16,3	13,2	11,6
RDN - Tempo entre DRs (ms) - Ballarotti (2012)	3147	92	64	59

Fonte: Adaptado de Ballarotti (2012), Diendorfer (2009) e Schumann (2016).

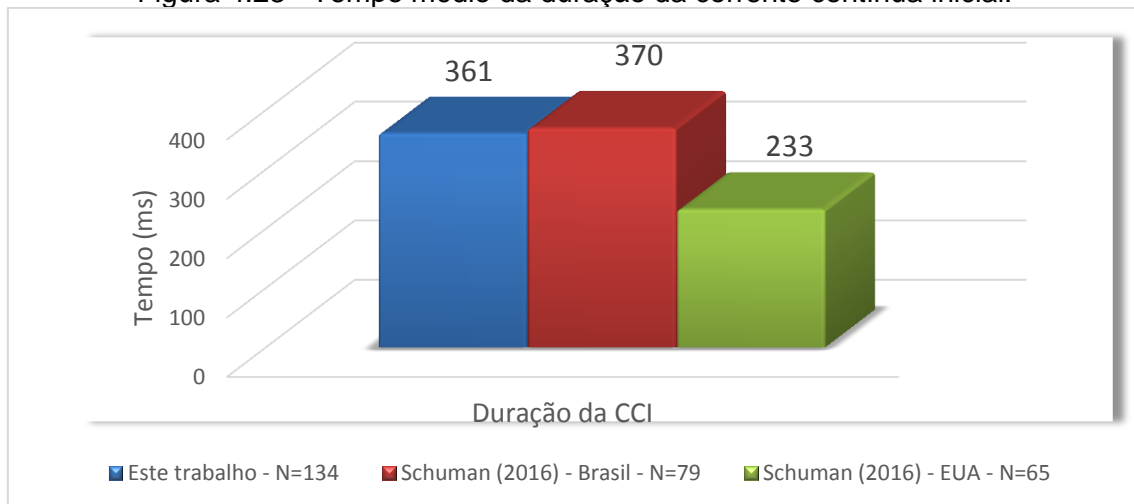
A hipótese sugerida por este estudo para explicar essa situação assemelha-se à abordada no tópico anterior. Acredita-se que durante a CCI, os RAs se propagam por um tempo maior na região da base da nuvem, devido à ausência de um eletrodo para descarga, ao contrário dos RDs. Isso faz com que os RAs se tornem muito ramificados durante o seu desenvolvimento, favorecendo a origem de um número maior de líder de recuo (LR) (provenientes de diversos ramos). Assim sendo, a ocorrência de um LR não provém de um só canal ou alguns poucos canais. O LR e a DRS podem então acontecer sobre a torre com uma frequência maior. Já no RD um LR só pode acontecer após o decaimento do canal do raio, o que espaçaria temporalmente os LRs. Argumentos que reforçam essa explicação foram apresentados por Schumann (2016) e Diendorfer (2009) que apresentam referência à extensa ramificação que os raios ascendentes apresentam em comparação com os descendentes, além de registrar também um intervalo menor entre as DRS de raios ascendentes. Como evidenciado na Tabela 4, o tempo médio entre as DRS obtidos por Diendorfer (2009) e Schumann (2016) nos USA são, respectivamente, 17,3 ms e 13,2 ms, sendo ainda menor do que os valores encontrados neste trabalho.

4.9 Comparação entre a pesquisa atual, a pesquisa de Schumann (2016) e Diendorfer (2009) sobre raios ascendentes

Os 173 raios utilizados para a realização da pesquisa atual, foram coletados do Pico do Jaraguá – SP. Schumann (2016) faz algumas análises semelhantes à realizada neste estudo ao verificar 79 raios ascendentes no Brasil, no pico do Jaraguá - SP, e comparar seus resultados com outros 65 raios ascendentes coletados em Rapid City, em Dakota do Sul nos Estados Unidos (EUA). Os 79 raios do Brasil utilizados por Schumann (2016) estão compreendidos dentro dos 173 raios da pesquisa atual. Além disso, Diendorfer (2009) realizou um estudo sobre RAs na Áustria compondo 457 amostras, trabalho que também será comparado à pesquisa atual.

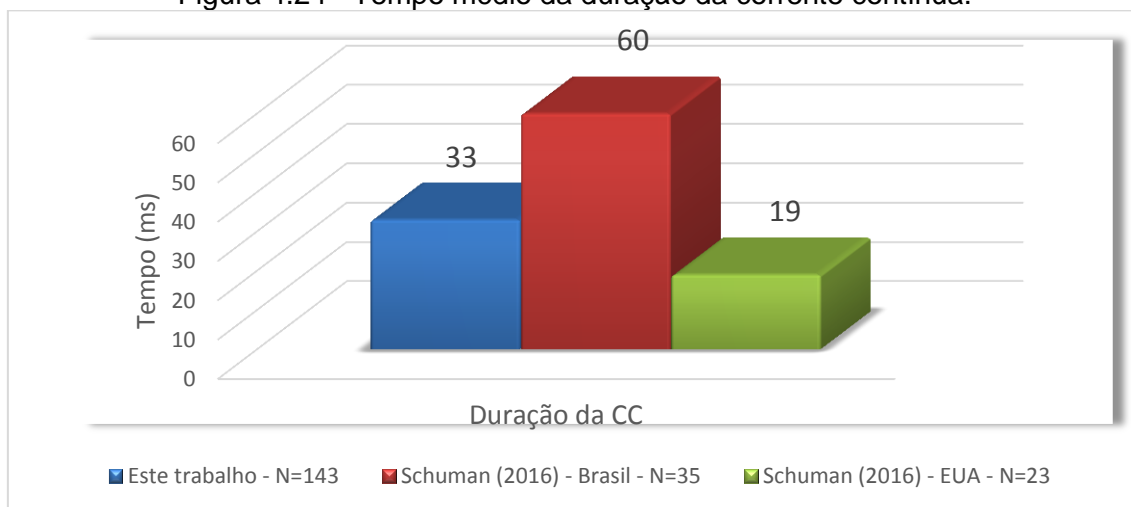
A seguir, nas Figura 4.23, Figura 4.24 e Figura 4.25 estão comparações com relação às durações das fases dos RA entre resultados da pesquisa atual e os dados de Schumann (2016).

Figura 4.23 - Tempo médio da duração da corrente contínua inicial.



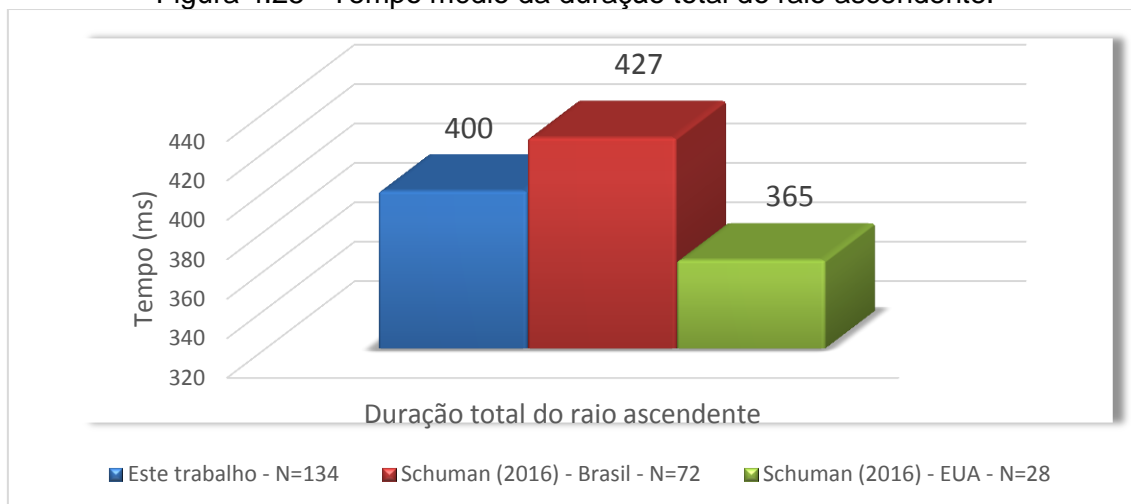
Fonte: Adaptado de Schumann (2016).

Figura 4.24 - Tempo médio da duração da corrente contínua.



Fonte: Adaptado de Schumann (2016).

Figura 4.25 - Tempo médio da duração total do raio ascendente.



Fonte: Adaptado de Schumann (2016).

Comparando o presente estudo com o trabalho de Schumann (2016) no Brasil, uma vez que há uma ampliação amostral do trabalho anterior, é esperado que os resultados sejam semelhantes. De fato, observam-se semelhanças nas durações da CCI (361 ms e 370 ms) e na duração total do raio ascendente (400 ms e 427 ms). No entanto, em relação à duração da CC, o presente estudo apresenta uma duração de 33 ms, enquanto o trabalho de Schumann (2016) registrou 60 ms. Essa discrepância pode ser atribuída à baixa taxa

amostral presente no estudo de Schumann (2016) no Brasil, uma vez que o presente trabalho conta com 143 amostras de CC, enquanto o trabalho de Schumann (2016) utilizou apenas 35 amostras.

Comparando os dados analisados por Schumann nos EUA com os resultados deste estudo, observa-se que os valores de duração para todos os eventos - CCI, CC e duração total do RA - são menores nos dados de Schumann nos EUA em comparação com o presente trabalho. Essa discrepância pode ser atribuída às peculiaridades geográficas entre as duas regiões.

No Pico do Jaraguá, Brasil, há apenas duas torres responsáveis pela iniciação dos RA sendo que a grande maioria dos raios ocorrem apenas em uma torre (86%), enquanto na região de Rapid City, EUA, onde os dados são coletados, existem 10 torres que podem iniciar os RA e com frequência múltiplas torres iniciam RAs. A presença de mais torres nos EUA implica que um RA em propagação em direção aos centros de carga das nuvens de tempestade pode se aproximar mais facilmente de outros RAs que foram iniciados em torres próximas. Isso pode levar a um encerramento mais precoce do RA nos EUA em comparação com os RAs no Brasil, que têm uma área de propagação livre maior.

Outro tipo de comparação pode ser por meio das multiplicidades dos RAs apresentadas na Tabela 4.4, que exhibe dados do presente estudo e de estudos anteriores. Ao analisar as multiplicidades do número total de RAs, apenas o estudo de Schumann (2016) fornece resultados comparáveis. Ao comparar esses resultados com o presente estudo, observa-se que os valores são próximos, em torno de 1. Esse valor de multiplicidade igual a 1 tende a ser uma referência para a comparação da multiplicidade dos RAs com os RDs na literatura.

Para as multiplicidades dos RAs que possuem DRS, as amostras de Schumann (2016) são limitadas, com 19 no Brasil e 17 nos EUA, o que compromete a confiabilidade das informações. O presente estudo contribui para expandir os resultados de Schumann (2016) no Brasil, aumentando a amostra para 40, o que aumenta a confiança nos resultados. Ao comparar a

multiplicidade dos RAs que possuem DRS no presente estudo (3,7) com o estudo de Diendorfer (2009) (4,4), os valores são próximos a 4. Esse valor tende a ser uma referência para a comparação da multiplicidade dos RAs que possuem DRS com os RDs que possuem DRS na literatura.

Tabela 4.4 - Multiplicidade dos raios ascendentes.

	Número de amostras	Média Aritmética
Multiplicidade RA - Este trabalho	134	1,1
Multiplicidade RA - Schumann (2016) Brasil	79	0,5
Multiplicidade RA - Schumann (2016) EUA	65	0,9
Multiplicidade RA (raios que possuem DRS) - Este trabalho	40	3,7
Multiplicidade RA (raios que possuem DRS) - Diendorfer (2009)	139	4,4
Multiplicidade RA (raios que possuem DRS) - Schumann (2016) Brasil	19	2,0
Multiplicidade RA (raios que possuem DRS) - Schumann (2016) EUA	17	3,4

Fonte: Adaptado de Diendorfer (2009) e Schumann (2016).

A diferenciação entre os RAs que possuem apenas a CCI daqueles que possuem pelo menos uma DRS revelou resultados consistentes em todos os estudos mencionados nesta pesquisa. Mesmo com amostras distintas (Tabela 4.5), sendo 65 (SCHUMANN, 2016, EUA), 79 (SCHUMANN, 2016, Brasil), 134 (presente estudo) e 457 (DIENDORFER, 2009), todos eles chegaram à mesma conclusão de que 70% dos RAs possuem apenas a CCI. Essa convergência de resultados é de grande valia para a literatura e fornece uma forte base para inferir, com alto grau de confiabilidade, essa afirmação.

Tabela 4.5 - Raios ascendentes que possuem somente corrente contínua inicial.

	Número de amostras	Número absoluto	Porcentagem
RA que possuem somente CCI - Este Trabalho	134	94	70,1%
RA que possuem somente CCI - Schumann (2016) Brasil	79	60	76,0%
RA que possuem somente CCI - Schumann (2016) EUA	65	48	74,0%
RA que possuem somente CCI - Diendorfer (2009)	457	320	70,0%

Fonte: Adaptado de Diendorfer (2009) e Schumann (2016).

4.10 Resumo capítulo de Resultados e Discussões

Em suma, pode-se compilar as informações analisadas nesse capítulo e que serão abordadas na conclusão:

- Os CCIps possuem uma ocorrência maior após 40% do início da CCI;
- Durante a propagação do líder ascendente positivo observou-se o acontecimento de sua bifurcação e seus primeiros LR, os CCIps acontecem após esses dois eventos;
- A duração da CCI é aproximadamente 90% da duração total do raio ascendente;
- O raio ascendente possui mais CC longas do que os raios descendentes;
- Através do sistema ENTLN foi possível identificar que as DRSs dos raios ascendentes possuem picos de corrente que respeitam a Zona de Exclusão prevista por Saba, Pinto Junior e Ballarotti (2006b) e médias de amplitudes próximas às dos RDNs;

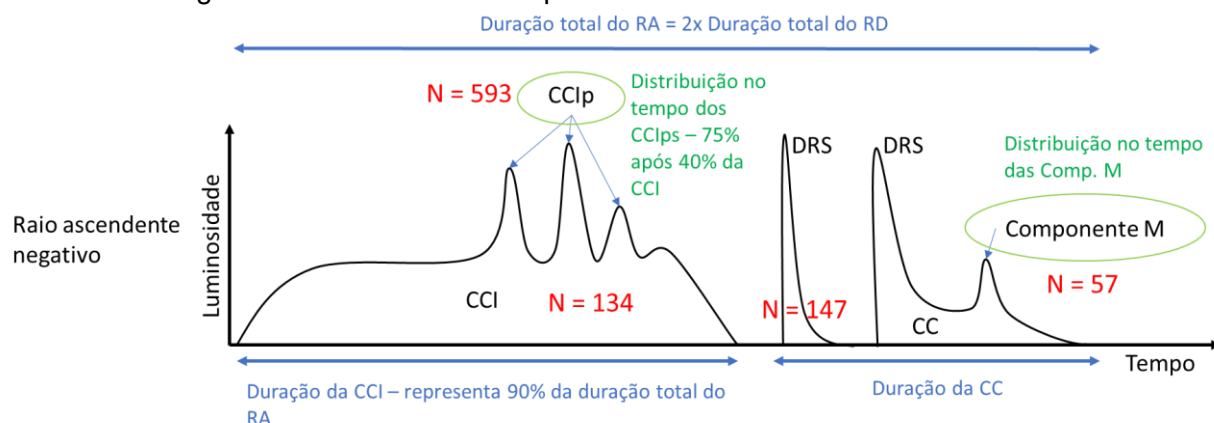
- O número de LRs que provocam luminosidade até o topo da torre (CCI_p e comp. M) dividido pelo número de ocorrências de CCI ou CC são similares para os RAs e RDNs;
- Os RAs possuem uma duração aproximadamente o dobro da duração dos RDs;
- Os intervalos de tempo entre as DRSs nos RAs são menores do que nos RDNs;
- A pesquisa atual possui resultados similares ao das pesquisas sobre RAs anteriores.

5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa proporcionou uma análise aprofundada e abrangente sobre raios ascendentes negativos, que não só causam danos em torres de telecomunicação, mas são as principais causas de danos a turbinas eólicas, cujo emprego cresce no mundo todo por conta da alta demanda por energia renovável. Através da coleta e análise de um conjunto significativo de dados foi possível obter uma melhor compreensão dos raios ascendentes, suas características elétricas e a possível relação com outros tipos de raios.

Por meio das análises realizadas conclui-se que a duração total dos raios ascendentes negativos (MA=400 ms) é aproximadamente o dobro, tanto da duração total dos raios descendentes negativos (MA=229 ms) quanto da duração total dos raios descendentes positivos (MA=204 ms), 90% da duração total se deve às CCI dos RAs. Enquanto nos RDs o líder ao chegar ao solo estabelece uma transferência enorme de carga (descarga de retorno) que pode determinar o fim do raio após possíveis DRSs e CCs, nos RAs o líder ao chegar próximo à nuvem continua se propagando horizontalmente por bastante tempo sem que haja uma brusca alteração de regime na corrente. Essa parece ser a razão da longa CCI existente nos RAs e conseqüentemente da sua longa duração. A Figura 5.1 ilustra esse comportamento do RA.

Figura 5.1 - Resumo do comportamento do raio ascendente.











Fonte: Produção do autor.

O início da bifurcação durante a CCI e a subsequente formação de líderes de recuo desempenham um papel fundamental na determinação da duração dos raios ascendentes. Os líderes de recuo acontecem quase sempre após a ocorrência da primeira bifurcação. Este fato sugere que a bifurcação implica em uma diminuição de corrente nos ramos, proporcionando a formação dos líderes de recuo. A consequente formação dos CClps (média de 4,4 por CCI) proporciona um reforço na ionização do canal do RA mantendo-o ativo.

Concluiu-se que a distribuição das comp. M ao longo das CCs nos raios ascendentes e descendentes apresentaram uma semelhança em relação ao tempo total de CC. Os resultados também sugerem que os LRs durante a CCI, formando CClp, nos RAs, possuem uma relação de semelhança com as comp. M nas CCs dos RDNs, enquanto as CCs dos RAs se diferem dos RDNs. A Tabela 5.1 mostra as principais diferenças e semelhanças das CC dos RAs e RDs.

Tabela 5.1 - Principais diferenças e semelhanças das correntes contínuas dos raios ascendentes e descendentes.

Semelhanças	Raio Ascendente	Raios Descendente
Pico de corrente das CCL respeitam a Zona de Exclusão		
Distribuição das Comp. M durante a CC		
Diferenças	Raio Ascendente	Raios Descendente
Δt – duração CC	 Longas e Curtas	 Muito curta
Nº de DRS	 Multiplicidade = 1,1	 Multiplicidade = 3,9
Nº Comp. M	 Mult. CCL = 1,6	 Multi. CCL = 5,5
Δt – intervalo entre descargas	 $\Delta t = 35$ ms	 $\Delta t = 64$ ms

Fonte: Produção do autor.

A análise das CCs do RAs mostra a ocorrência de CCs com durações maiores (curta e longa) nos RAs em comparação com os RDNs. Uma possível explicação se deve à existência de uma corrente de longa duração (CCI) pré-existente no mesmo canal utilizado pelas CC e a um intervalo pequeno entre a CCI e a primeira DRS, e entre as DRS. Este fato levaria ao estabelecimento consistente do canal de descarga por onde acontece posteriormente as DRS e as CC. Além disso, diferentemente dos RDN, apenas um canal de conexão com o solo é utilizado nos RAs, ao contrário dos vários canais possíveis existentes nos RDN (em média 2 canais e pontos de contato com o solo).

É notável observar que, tanto nos RDNs como nos RAs, há um respeito à zona de exclusão, ou seja, DR com CCs de longa duração não exibem picos de corrente superiores a aproximadamente 20 kA. Para CCs muito curtas e curtas, as I_{ps} das DRSs variam em sua maioria entre 0 e 40 kA, tanto para RDNs quanto para RAs. Esse padrão confirma a semelhança entre os comportamentos das DRSs nos RAs e nos RDNs.

Por outro lado, observou-se que o intervalo médio entre as DRSs nos RDNs foi de 64 ms, enquanto nos RAs foi significativamente menor, apenas 33 ms. Acredita-se que durante a CCI, a bifurcação dos líderes ascendentes ao longo de sua ascensão e de sua extensa trajetória próxima à base da nuvem, faz com que os RAs se tornem muito ramificadas durante o seu desenvolvimento, favorecendo a origem de um número maior de LR (provenientes de diversos ramos com correntes insuficientes para manter o canal ativo). O LR e a DRS podem então acontecer sobre a torre com uma frequência maior.

Além de abordar aspectos novos dos RAs, o presente estudo confirma a maioria das inferências citadas nos trabalhos anteriores sobre RA, o que adiciona validade e reforça conclusões anteriores.

A pesquisa sobre raios ascendentes negativos, tema muito relevante na proteção aos geradores eólicos cada vez mais presentes na sociedade, ainda permanece em um estágio inicial de investigação, abrindo oportunidades para futuros estudos e análises mais detalhadas. Espera-se que os resultados desta tese de mestrado inspirem e estimulem outras pesquisas nessa área,

consolidando ainda mais os avanços no entendimento dos raios ascendentes e sua importância para a compreensão global dos fenômenos atmosféricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

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. 391p. 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. **Afinal, o que, raios, é isso? :o que é e como ocorre**. São José dos Campos, SP : Ed. do Autor, 2022.

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.

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.

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

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA (INPE.ELAT). **Os raios e a origem da vida**. São José dos Campos: INPE: ELAT, 2023e. Disponível em: www.inpe.br/webelat/homepage/menu/el.atm/os.raios.e.a.origem.da.vida.php. Acesso em: 18 ago. 2023.

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

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

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.

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.

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