sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/07.28.05.39-TDI

ESTUDO DOS LÍDERES POSITIVOS EM DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Amanda Romão de Paiva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba e Carina Schumann, aprovada em 27 de agosto de 2020.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/42U33TB>

INPE
São José dos Campos
2020

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GBDIR)
Serviço de Informação e Documentação (SESID)
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 INTELECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/07.28.05.39-TDI

ESTUDO DOS LÍDERES POSITIVOS EM DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Amanda Romão de Paiva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba e Carina Schumann, aprovada em 27 de agosto de 2020.

URL do documento original:
<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/42U33TB>

INPE
São José dos Campos
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Paiva, Amanda Romão de.

P166e Estudo dos líderes positivos em descargas atmosféricas / Amanda Romão de Paiva. – São José dos Campos : INPE, 2020.

xx + 89 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/07.28.05.39-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.

Orientadores : Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba e Carina Schumann.

1. Descargas atmosféricas. 2. Líder ascendente conectivo. 3. Líder ascendente não conectivo. 4. Pincel corona. 5. Agulhas. I.Título.

CDU 551.594.22

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

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

Aluno (a): *Amanda Romão de Paiva*

Título: "ESTUDO DOS LÍDERES POSITIVOS EM DESCARGAS ATMOSFÉRICAS"

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

Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas

Dr. Cristiano Max Wrasse

Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

(X) Participação por Vídeo - Conferência

(X) Aprovado ***( ) Reprovado***

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

(X) Participação por Vídeo - Conferência

(X) Aprovado ***( ) Reprovado***

Dra. Carina Schumann

Orientador(a) / WITS / África do Sul - ZA

(X) Participação por Vídeo - Conferência

(X) Aprovado ***( ) Reprovado***

Dr. Kleber Pinheiro Naccarato

Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

(X) Participação por Vídeo - Conferência

( ) Aprovado ***( ) Reprovado***

Dr. Plínio Carlos Alvalá

Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

(X) Participação por Vídeo - Conferência

(X) Aprovado ***( ) Reprovado***

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(X) unanimidade

São José dos Campos, 27 de agosto de 2020

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

Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas

Dr. Marco Antônio da Silva Ferro

Convidado(a) / IAE/DCTA / São José dos Campos - SP

(X) Participação por Video - Conferência

(X) Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Antonio Carlos Varela Saraiva

Convidado(a) / UNESP / São José dos Campos - SP

(X) Participação por Video - Conferência

(X) Aprovado ( ) Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

(X) unanimidade

São José dos Campos, 27 de agosto de 2020

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por todas suas bênçãos e o fortalecimento de todos os dias perante as dificuldades encontradas ao longo do caminho.

Aos meus pais, Manoel Luiz e Vera, por serem minha base e fonte de motivação. Agradeço o amor, preocupação, puxões de orelha, por estar presentes sempre nos momentos que mais preciso e me incentivarem a não desistir durante essa jornada.

Aos meus orientadores, Marcelo e Carina, primeiramente pela paciência, parceria e todo ensinamento. A paixão de vocês pela pesquisa em relâmpagos é fascinante e inspiradora. Gratidão pela parceria contínua durante esses 8 anos de projeto em São Paulo.

Aos colegas e colaboradores da equipe do projeto por todo aprendizado, garra, parceria e compartilhamento de saberes. Sem vocês esse trabalho não teria sido concluído. Só nós sabemos quantas noites foram necessárias para que as fibras ópticas fossem passadas corretamente, os equipamentos funcionassem e os instrumentos sincronizados. Também, nada disso seria possível se não fosse a colaboração e confiança dos moradores, zelador, conselheiros e síndico do Condomínio Vila Florida. A vocês gostaria de agradecer profundamente.

Aos amigos que a vida me presenteou ao longo dos meus 30 anos de existência tenho a mais profunda gratidão por fazerem parte do meu caminhar. Não citarei nomes, mas cada um sabe a importância que têm em meu coração. Agradeço a cada um que dedicou um tempinho para ouvir meu desespero, frustração, me emprestou ombro para chorar, me incentivou a continuar e não permitiu que eu desistisse. Vocês não sabem o que significa o poder da frase: “ Estou aqui para o que precisar! Conte comigo! ”. Minha eterna gratidão.

Aos meus amados alunos (e agora colegas de profissão) da Universidade de Taubaté agradeço por compreenderem meus esquecimentos frequentes, por todo ensinamento e troca de conhecimentos adquiridos aos longos dos últimos 3 anos. Vocês foram o ponto chave de incentivo e motivação para que eu concluísse o trabalho, principalmente nos dias mais difíceis. Aprendi e aprendo muito com vocês.

Aos colegas de trabalho e profissão, professores, coordenadora e equipe gestora da escola Viver e Aprender, agradeço imensamente o apoio, incentivo, confiança e por estarem com coração e ouvidos abertos quando precisei.

À pós-graduação do INPE, CAPES e ao CNPq pelo apoio e pela bolsa, permitindo que a conclusão deste trabalho fosse possível.

RESUMO

Essa tese apresenta como se comportam os líderes positivos que estão presentes em todos os relâmpagos. Com particular relevância, suas propriedades e características determinam o funcionamento dos para-raios e são a chave para explicar a ramificação presente nos relâmpagos negativos ascendentes e a intrigante presença de múltiplas descargas nos raios negativos descendentes. Os para-raios protegem edifícios há mais de 260 anos, no entanto até recentemente não havia registros do seu modo de atuação. Os registros apresentados neste estudo mostram o funcionamento do para-raios em edifícios, e mostram também que outros líderes ascendentes não conectivos, isto é, que não logram obter conexão, podem surgir oriundos de outros para-raios ou estruturas próximas. Essas observações só foram possíveis com a utilização de câmeras de alta velocidade, principal instrumento utilizado nesse trabalho. Esses líderes, denominados de Líderes Ascendentes Conectivos (LACs) e Líderes Ascendentes Não-Conectivos (LANCs) de polaridade positiva apresentam com frequência a presença de pincel corona em suas extremidades, sendo estas caracterizadas por uma avalanche de elétrons que aceleram em direção à ponta do líder positivo. Realizando uma análise minuciosa de diferentes tipos de líderes positivos (ascendentes, descendentes e conectivos) foi possível estudar o comportamento do pincel corona. A partir desta análise, descobriu-se que as ramificações dos líderes positivos estão fortemente ligadas a bifurcações do pincel corona. Quando a bifurcação do pincel corona é malsucedida, observou-se a presença de agulhas no canal dos líderes positivos. Essas agulhas nunca haviam sido observadas por câmeras de alta velocidade e a sua existência pode ser a resposta para uma das mais fundamentais perguntas acerca dos raios: porque possuem múltiplas descargas de retorno.

Palavras-chave: descargas atmosféricas. líder ascendente conectivo. líder ascendente não conectivo. pincel corona. agulhas.

STUDY OF POSITIVE LEADERS IN ATMOSPHERIC DISCHARGES

ABSTRACT

This thesis seeks to show how positive leaders behave, who are present in all lightning strikes. With particular relevance, its properties and characteristics determine the functioning of the arresters and are the key to explain the branching present in the negative upward lightning strikes and the intriguing presence of multiple discharges in the negative downward lightning. Lightning rods have protected buildings for more than 260 years, however, until recently, there was no record of their operation. The records presented in this study show the operation of the lightning rod in buildings, and also show that other unconnected upward connecting leaders (UUL), that is, who are unable to obtain a connection, may arise from other lightning rods or nearby structures. These observations were only possible with the use of high-speed cameras, the main instrument used in this work. Positive polarity leaders (UCLs and UUCLs) often have the presence of a corona brush at their ends, which are characterized by an avalanche of electrons that accelerate towards the tip of the positive leader. Performing a thorough analysis of different types of positive leaders (upward, downward and connecting) it was possible to study the behavior of the corona brush. From this analysis, it was discovered that the ramifications of positive leaders are strongly linked to bifurcations of the corona brush. When the bifurcation of the corona brush is unsuccessful, the presence of needles in the channel of positive leaders was observed. These needles had never been observed by high-speed cameras and their existence may be the answer to one of the most fundamental questions about lightning: why they have multiple return discharges.

Keywords: atmosferic discharges. upward connecting leaders. unconnected upward connecting leaders. corona brush. needle.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1.1 Primeiro registro de relâmpago no Brasil utilizando câmera de alta velocidade. 2

2.1 Exemplifica alguns tipos desses relâmpagos. 5
2.2 Tipos de Relâmpagos. 6
2.3 Relâmpago intra-nuvem registrado em São Paulo, Brasil. 6
2.4 Tipos de Relâmpagos que atingem o solo, com as respectivas cargas transferidas. 7
2.5 Etapas de um relâmpago descendente negativo. 8
2.6 Registro de LACs e LANCs em torres maiores que 430 metros de altura observados na China. 10
2.7 Distância de atração pelas definições de Golde e modelo EGM. 11
2.8 Exemplo de pincel corona (brilho menos intenso) na ponta do líder descendente, representando por um pontilhado. 14
2.9 Laboratório utilizado para observações de pincel corona. 15
2.10 Relâmpago ascendente negativo. 16
2.11 Etapas de um relâmpago ascendente negativo. 17
2.12 Variação da corrente ao longo do tempo para relâmpago ascendente. . . . 18
2.13 Registro de agulhas no canal do líder ascendente no interior de uma nuvem de tempestade utilizando técnica de detecção em VHF. 19

3.1 Locais de observação. 21
3.2 Novo campo de visão dos pontos de observação. 22
3.3 Torres de Rapid City, dentro do campo de visão das câmeras de alta velocidade. 22
3.4 Ilustração do funcionamento da câmera de alta velocidade e o sistema de gravação circular. 24
3.5 Ilustração das câmeras de alta resolução. 24
3.6 Campo de visão das câmeras V711 e V12. 25
3.7 Sensor de corrente no para-raios. 28
3.8 Ilustração da localização do sensor do campo elétrico (USP) em relação aos pontos de observação de relâmpagos. 29
3.9 Esquema de gravação dos sensores de campo elétrico dos relâmpagos. . . 30
3.10 Exemplo da forma de onda do sensor de campo elétrico. 30
3.11 Adaptação do prédio para a instalação da instrumentação. 32

3.12 Registros de testes dos equipamentos realizados na USP. 33
3.13 Registros do primeiro teste realizado. 34
3.14 Registro do segundo teste do sistema de sensor de corrente elétrica. . . . 35
3.15 Esquema utilizado para a passagem dos cabos de fibra óptica até os computadores de aquisição de dados. 36
3.16 Sensores de campo elétrico, corrente elétrica e raios-x no topo dos prédios instrumentados P1 e P2. 37
3.17 Registro de 7 descargas de retorno de um relâmpago descendente negativo. 38
3.18 Relação entre o pico de corrente com o campo elétrico normalizado (para 100 quilômetros) de relâmpagos registrados. 40
3.19 Exemplo de extração de dados dos vídeos. 41

4.1 Relação da distância com o tempo de 3 casos de relâmpagos descendentes que conectaram edifícios. 44
4.2 Imagens de vídeo de alta velocidade do salto final no momento da conexão. 46
4.3 Líderes ascendentes conectivos partindo em direção a um líder descendente que se desenvolve em direção ao solo. 48
4.4 Registro de líderes conectivos a partir de antena de TV e para-raios. . . . 49
4.5 Desenvolvimento de dois líderes conectivos. 50
4.6 Relação entre a altura da estrutura e comprimento do líder ascendente conectivo. 51
4.7 Relação entre distância de atração (R_s) e pico de corrente (I_p) para o modelo de Golde (1973). 53
4.8 Relação entre a distância de atração (R_s) e o pico de corrente (I_p) para a definição do modelo EGM. 54
4.9 Exemplo do pincel corona nos líderes ascendentes (a), descendentes (b) e conectivo (c). 55
4.10 Comportamento da velocidade em 3 líderes ascendentes. 57
4.11 Comportamento do crescimento do pincel corona em líderes ascendentes. 59
4.12 Comportamento do comprimento do pincel corona em decorrer do tempo. 60
4.13 Exemplo de bifurcação do pincel corona. 61
4.14 Sequência de imagens ilustrando a bifurcação do pincel corona gerando uma bifurcação do líder ascendente. 61
4.15 Sequência de imagens mostrando a formação de um novo canal, resultante ramificação do pincel corona. 62
4.16 Fenômeno definido como agulhas observadas na propagação do líder ascendente. 63
4.17 Sequência de imagens ilustrando a bifurcação do pincel corona gerando uma agulha no líder ascendente. 63

4.18 Formação e evolução de uma agulha. 64
4.19 Agulhas ao longo do líder ascendente positivo. 65
4.20 Ocorrência de agulhas durante a propagação do líder ascendente. 66
4.21 Média dos períodos dos pulsos das agulhas. 66
4.22 Sequência de imagens mostrando o desenvolvimento de um líder negativo a partir de uma agulha. 70
4.23 Propagação de líder positivo contendo ramificação negativa. 71

LISTA DE TABELAS

Pág.

2.1 Constantes a e b da distância de atração encontradas por alguns autores. 12

3.1 Características das câmeras de alta velocidade. 25
3.2 Comparação do pico de corrente medido com picos de corrente estimados pelas redes BrasilDAT e Rindat. 38

4.1 Características dos líderes e distância de atração. 45
4.2 Características analisados do pincel corona para os líderes descendentes, ascendentes e conectivos. 55
4.3 Características gerais dos casos analisados. 68
4.4 Características encontradas sobre as agulhas 68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ELAT	–	Grupo de Eletricidade Atmosférica
NS	–	Nuvem-solo
SN	–	Solo-nuvem
IN	–	Intranuvem
LA	–	Líder Ascendente
LAC	–	Líder Ascendente Conectivo
LANC	–	Líder Ascendente Não Conectivo
SPDAs	–	Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas
fps	–	Frames por segundo
GPS	–	Global Positioning System
PCC	–	Phantom Camera Control
RINDAT	–	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
BrasilDAT	–	Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas
USP	–	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

Pág.

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Objetivos 4
1.2 Motivação/Relevância 4

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 5
2.1 Relâmpagos 5
2.1.1 Relâmpagos descendentes negativos 7
2.1.2 Relâmpagos descendentes positivos 12
2.1.3 Relâmpagos ascendentes negativos 16

3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA 21
3.1 Locais de Observação 21
3.1.1 São Paulo 21
3.1.2 Rapid City 22
3.2 Equipamentos 23
3.2.1 Câmeras de alta velocidade 23
3.2.2 Redes de Detecção de Descargas Atmosféricas 26
3.2.3 Sensores de Corrente Elétrica 27
3.2.4 Sensores de Campo Elétrico 28
3.3 Metodologia 31
3.3.1 Preparação e instalação dos equipamentos 31
3.3.2 Validação das redes de detecção de relâmpagos BrasilDAT e RINDAT . 37
3.3.3 Estimativa dos picos de corrente elétrica 39
3.3.4 Extração de dados dos vídeos registrados por câmeras de alta velocidade 40

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 43
4.1 Estudo dos líderes conectivos e não-conectivos 43
4.1.1 Caracterização dos líderes conectivos e não conectivos 43
4.1.2 Distância de atração 51
4.1.2.1 Uso da definição de Golde 52
4.1.2.2 Uso da definição pelo Modelo Eletrogeomagnético 53
4.2 Observação do fenômeno pincel corona 54
4.3 Observação de agulhas em líderes ascendentes positivos 62

5 CONCLUSÕES **73**

6 TRABALHOS FUTUROS **77**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **79**

1 INTRODUÇÃO

Os fenômenos atmosféricos, principalmente associados a relâmpagos e trovões, fascinam a todos que observam o céu durante as tempestades. Há registros desses fenômenos naturais desde a antiguidade, sendo estes associados a razões mitológicas e religiosas (VIEMEISTER, 1961). O primeiro registro científico que se conhece é do filósofo Aristóteles, no qual passou a ser associado relâmpago como o brilho que iluminava o céu e o trovão ao som produzidos por eles.

O conceito de relâmpago como descarga elétrica só passou a ser conhecido com os experimentos de Franklin (1706-1790), em meados do século XVIII. Em seu famoso experimento da pipa, Franklin demonstrou que os relâmpagos eram consequências do acúmulo de cargas elétricas existentes em nuvens de tempestades (IRIBARNE; CHO, 1980). Franklin também mostrou que os relâmpagos se originam no interior das nuvens e "geralmente estão em um estado negativo de eletricidade, mas às vezes em um estado positivo" (FRANKLIN, 1774). Franklin ainda afirmou que os pararaios possuem dois objetivos: impedir a ocorrência de raios em locais desprotegidos e oferecer um caminho seguro para que os raios possam se aterrar. Mais informações sobre as contribuições de Benjamin Franklin sobre o estudo de relâmpagos se encontra em Dibner (1977) e Krider (1996).

Após essa contribuição de Franklin, diversas pesquisas empíricas, teóricas e experimentais surgem para caracterizar esse fenômeno (PRINZ, 1977).

Somente a partir de 1920, com o avanço da tecnologia, iniciam-se estudos nessa área de forma significativa (BOYS, 1926; BOYS, 1929; MALAN, 1950; SCHONLAND et al., 1956; UMAN, 1969). Esses estudos se basearam por meio de um oscilógrafo de raios catódicos registrados através de mudanças elétricas durante a tempestade (APPLETON; CHAPMAN, 1937).

No Brasil, o primeiro registro de relâmpago utilizando câmera de alta velocidade foi somente em 2000, quando realizou-se o registro em vídeo a 2 mil imagens por segundo (ELAT), como mostra a Figura 1.1. A partir desses registros foi possível observar e caracterizar os relâmpagos no Brasil, e também comparar com outras medidas já conhecidas, como campo elétrico (PINTO; PINTO, 2003; SCHUMANN et al., 2013; PAIVA et al., 2014; VISACRO et al., 2017).

Figura 1.1 - Primeiro registro de relâmpago no Brasil utilizando câmera de alta velocidade.

Fonte: ELAT.

A partir dessa data, surgem diversas pesquisas no país a respeito desse fenômeno, a fim de desvendar diversos detalhes físicos desse processo. Essas pesquisas ajudaram a entender semelhanças e diferenças entre líderes positivos e negativos (PINTO, 2005; SABA et al., 2006; SABA et al., 2009; SARAIVA et al., 2010; SCHUMANN et al., 2011; BALLAROTTI et al., 2012), características de alguns processos físicos do relâmpago (FERRO et al., 2009; CAMPOS et al., 2014; SABA et al., 2016; SABA et al., 2016; SABA et al., 2017b), iniciação do relâmpago ascendente (SCHUMANN, 2016; SCHUMANN et al., 2019), emissão de raios-x (SABA et al., 2019), entre outros. Todos esses estudos usaram como principal instrumento de observação câmeras de alta velocidade, podendo registrar, em alguns casos, até 100 mil imagens por segundo.

Diante do avanço tecnológico ao longo desses anos, foi possível observar e diferenciar com o auxílio de câmeras de alta velocidade os tipos de relâmpagos existentes. Eles podem ser classificados quanto a sua origem, sendo relâmpagos ascendentes aqueles que partem de estruturas no solo em direção à base das nuvens, relâmpagos descendentes, aqueles que partem das nuvens e tocam o solo e os relâmpagos intra-nuvem, que começam e terminam sem tocar o solo. Além dessas diferenciações, é importante classifica-los quanto a carga transferida para o solo (positiva ou negativa).

Os relâmpagos são iniciados através da formação de líderes bidirecionais, onde um lado contém cargas positivas e na extremidade oposta apresentam cargas negativas. À medida que o líder bidirecional se desenvolve, temos a formação de líderes negativos e líderes positivos. Uma das principais diferenças entre esses dois tipos de líderes diz respeito a sua forma de propagação, onde líderes negativos apresentam várias ramificações, diferentemente de líderes positivos. Além disso, líderes positivos estão

associados com a presença de líderes de recuo, que são pequenos líderes bidirecionais responsáveis pela multiplicidade dos relâmpagos.

Diante disso, entender o processo de desenvolvimento desses líderes é de suma importância para a pesquisa de raios. Esse trabalho caracterizou fisicamente os líderes positivos. Entre os líderes positivos, destacaremos líderes ascendentes, descendentes e conectivos (que ocorrem em resposta à aproximação de um líder descendente negativo), observados a partir de câmeras de alta velocidade. Conhecer as características desses líderes contribui para explicar: a) a forma com que esses líderes se propagam; b) porquê se ramificam pouco quando comparado com os líderes negativos; c) o processo de conexão para melhoria do Sistema de Proteção de Descargas Atmosféricas (SPDAs); d) o motivo de relâmpagos negativos apresentarem várias descargas de retorno.

Para isso, a tese apresentará, no Capítulo 2 uma revisão bibliográfica dos tipos de relâmpagos com as respectivas características conhecidas. Nesse capítulo são descritos como os relâmpagos se iniciam e os fenômenos que podem ocorrer durante a propagação dos diferentes tipos de líderes. Nessa seção é descrito de forma minuciosa como é a formação e desenvolvimento dos três tipos de líderes positivos analisados: ascendentes, descendentes e conectivos.

Dando continuidade no trabalho, o Capítulo 3 apresenta a instrumentação e os locais de instalação dos equipamentos, na região de Pirituba, na cidade de São Paulo, SP. Nesse capítulo são apresentados os detalhes da preparação e instalação de todos equipamentos utilizados, sendo eles: câmeras de alta velocidade, sensores de corrente elétrica e, sensores de campo elétrico. Além da cidade de São Paulo, são descritos os pontos de observação onde foram registrados vídeos de relâmpagos ascendentes na cidade de Rapid City, nos EUA, os quais também foram utilizados nesse trabalho. Apresentação dos dados do trabalho, que inclui as medidas de líderes conectivos, pincel corona e agulhas, sendo essas últimas inéditas.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e as discussões de cada tópico. Começará discutindo os resultados sobre líderes conectivos em termos de suas características ópticas e os conceitos de distância de atração. Posteriormente serão apresentadas outras características ópticas, como pincel corona e agulhas, e as respectivas contribuições desse trabalho.

O Capítulo 5 abordará as conclusões e contribuições desse trabalho.

1.1 Objetivos

Mais especificamente, os objetivos desse trabalho consistem em:

- Estudar o processo físico dos líderes positivos conectivos em processo de conexão com os para-raios;
- Estudar o desenvolvimento do fenômeno pincel corona em líderes positivos buscando caracterizá-los fisicamente;
- Estudar o fenômeno das agulhas presentes em líderes ascendentes e suas características.

1.2 Motivação/Relevância

O relâmpago é uma descarga atmosférica bipolar (de carga líquida nula) que se inicia no interior de nuvens de tempestades. Quando a parte negativa (chamado líder negativo) se desenvolve em direção ao solo, a parte positiva (líder positivo) se desenvolve no interior das nuvens de tempestade.

A observação do desenvolvimento desses líderes por câmeras de alta velocidade nos permite analisar características que impactam diretamente em algumas questões acerca da física dos relâmpagos. a) como se dá a atuação dos para-raios na presença de um líder descendente?; b) qual a área de proteção de um para-raios?; c) qual motivo de alguns líderes positivos se ramificarem?; d) por que relâmpagos negativos possuem diversas descargas de retorno?

Recentemente alguns trabalhos como Visacro et al. (2016), Zhao et al. (2016), Hare et al. (2019), apresentaram alguns resultados, mas não responderam essas questões. Essa tese busca estudar esses e outros questionamentos importantes na física dos relâmpagos. Para isso, utilizaremos câmeras de alta velocidade, que nos permitem identificar essas características ópticas invisíveis a olho nu.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Relâmpagos

Os relâmpagos são descargas elétricas que ocorrem durante tempestades resultante de um excesso de cargas elétricas no interior de nuvens. Essas descargas ocorrem quando, em um determinado ponto (dentro da nuvem ou a partir da superfície), o campo elétrico produzido por essas cargas elétricas excede a capacidade isolante do ar e líderes bidirecionais (de polaridades opostas) se desenvolvem.

Embora associado com maior frequência a nuvens de tempestades, os relâmpagos também podem ocorrer em erupções vulcânicas, por lançamentos de foguetes que estendem fios condutores na atmosfera (SABA, 2001), explosões nucleares, tempestades de areia, entre outros (RAKOV; UMAN, 2003). A Figura 2.1 exemplifica alguns tipos desses relâmpagos.

Figura 2.1 - Exemplifica alguns tipos desses relâmpagos.

(a) Relâmpago acionado por foguete, (b) Relâmpago em erupção vulcânica e (c) Relâmpago em explosão nuclear.
Fonte: (a) Saba (2001); (b) Salanave (1980); (c) Salanave (1980).

De forma geral, as dimensões dos relâmpagos variam entre 2 a 5 centímetros (cm) de diâmetro, possuem muitos quilômetros (km) de comprimento e temperaturas que podem chegar até 30.000C com duração de aproximadamente 1 segundo (PARKER, 1997).

Para classificar os relâmpagos, devemos conhecer o local em que ele se origina e, ou termina. Sendo assim, podem ser de dois tipos: os que não tocam o solo, denominados intra-nuvem; e os que tocam o solo, denominado nuvem-solo (descendente) ou solo-nuvem (ascendente) (OGAWA, 1995; RAKOV, 2003). A Figura 2.2 esquematiza essa classificação.

Figura 2.2 - Tipos de Relâmpagos.

Fonte: Próprio autor.

Em termos estatísticos, os relâmpagos intra-nuvem ocorrem cerca de 80 a 90% dos casos em uma tempestade. Isso se deve ao fato das cargas opostas se encontrarem próximas umas das outras (no interior da nuvem de tempestade) e da capacidade isolante do ar diminuir com a altitude, decorrente da diminuição da densidade do ar (PINTO; PINTO, 2000). A Figura 2.3 apresenta esse tipo de relâmpago.

Figura 2.3 - Relâmpago intra-nuvem registrado em São Paulo, Brasil.

Fonte: Paiva (2015).

Os relâmpagos que tocam o solo ocorrem cerca de 10 a 20% durante uma tempestade (UMAN, 1987). Os que tocam o solo, podem ser separados de acordo com sua direção de propagação, sendo descendentes (quando partem da nuvem em direção ao

solo) ou ascendentes (quando partem de estruturas no solo em direção as nuvens).

Além de sua classificação quanto a direção de propagação, podemos determiná-los pela polaridade da carga líquida transferida para o solo, sendo denominado por relâmpago positivo ou relâmpago negativo. A Figura 2.4 ilustra os tipos de relâmpagos com as respectivas cargas líquidas transferidas de forma simplificada.

Figura 2.4 - Tipos de Relâmpagos que atingem o solo, com as respectivas cargas transferidas.

(a) NS positivo; (b) NS negativo; (c) SN positivo; (d) SN negativo.

Fonte: Adaptada de Naccarato (2001).

2.1.1 Relâmpagos descendentes negativos

Entre os relâmpagos que descem para o solo, os que possuem carga negativa ocorrem em maior frequência. Isso é devido a posição dos centros de cargas existentes no interior de uma nuvem de tempestade. Há uma menor concentração de cargas positivas e uma maior concentração de cargas negativas na parte inferior dessa nuvem. Entre esses centros de cargas, em um certo momento durante a tempestade, surge um líder bidirecional bipolar cuja extremidade negativa parte em direção ao solo, que posteriormente, ao tocar o solo, se denominará relâmpago descendente negativo (RAKOV, 2016).

As etapas de um relâmpago descendente negativo são mostradas na Figura 2.5, após a formação do líder bidirecional no interior da nuvem de tempestade.

Figura 2.5 - Etapas de um relâmpago descendente negativo.

Fonte: Adaptada de Schumann (2016).

Primeiramente, como vemos na Figura (2.5a), dentro da nuvem há o desenvolvimento de um líder bidirecional, onde o líder negativo segue em direção ao solo e o líder positivo se desenvolve no interior da nuvem. À medida qque o líder positivo avança, o líder negativo propaga-se em direção ao solo formando o *líder escalonado*, como se

observa na Figura (2.5b). Nas pontas desses líderes negativos, há uma concentração de cargas negativas que, quebrando a rigidez dielétrica com o ar, irá se propagando formando assim diversas ramificações até tocar o solo ou alguma estrutura.

Quando o líder estiver próximo ao solo, devido ao campo elétrico intenso formado por ele, líderes ascendentes iniciarão dos pontos mais altos, chamados de *líderes conectivos* (Figura 2.5c) de carga oposta ao líder escalonado (será detalhado mais adiante). O encontro desses líderes permitirá um fluxo intenso de cargas elétricas, o qual denomina-se *descarga de retorno* (Figuras 2.5d, e, f). Nesse instante é o momento com maior valor de carga transferida e alta luminosidade do canal formado.

Uma vez formado o canal, ele poderá ou não ser acompanhado de corrente contínua, que é uma corrente de baixa intensidade e uma duração longa em comparação com a descarga de retorno. Ela pode ser classificada em muito curta (3 a 10 ms) (BALLAROTTI, 2005), curta (10 a 40 ms) (KITAGAWA et al., 1962) e longa (maior que 40 ms) (SHINDO; UMAN, 1989). Durante a corrente contínua o canal mantém uma certa luminosidade persistente. Pode ainda ocorrer uma súbita intensificação da luminosidade do canal, conhecida por *componente M*. Cessando a corrente contínua, o canal fica ionizado positivamente (Figura 2.5g) e consequentemente surgem outros líderes, chamados *líderes de recuo* (Figura 2.5h). Esses líderes de recuo são *líderes bidirecionais* (MAZUR et al., 2013) e quando a parte negativa desses líderes aproveitam o canal ionizado positivamente, tem-se o início da segunda descarga de retorno, denominada *descarga de retorno subsequente* (Figuras 2.5i e 2.5j). Cessada a corrente contínua dessa descarga, o canal se ioniza positivamente, novos líderes de recuo podem se iniciar repetindo o processo novamente, podendo ocorrer diversas descargas de retorno subsequentes.

Os relâmpagos negativos possuem, em média, entre 3 a 4 descargas de retorno. Denominamos *multiplicidade* de um relâmpago, o número de descargas de retorno que ele apresenta. A corrente das descargas varia de algumas unidades até dezenas de quiloampères (kA) e as cargas transferidas para o solo são da ordem de 20 Coulombs (C), podendo em alguns casos, atingirem centenas de coulombs (UMAN, 1987).

Descritas as etapas de um relâmpago descendente negativo, na Figura 2.5c temos um processo físico que é bastante discutido e será um dos focos desse trabalho, denominado Líderes Ascendentes Conectivos (LACs) quando ele conecta ao líder descendente, e Líderes Ascendentes Não Conectivos (LANCs) quando esse líder não se conecta ao líder descendente.

As observações de LACs e LANCs que se têm registro são de torres e arranha-céus, como é o caso do trabalho de Lu et al. (2013), em torres maiores que 430 metros de altura localizado na China. A Figura 2.6 mostra os prédios onde foram registrados esses líderes, bem como o registro de dois líderes.

Figura 2.6 - Registro de LACs e LANCs em torres maiores que 430 metros de altura observados na China.

Upward Connecting Leader (UCL); Upward Unconnecting Leader 1 (UUL1)
Fonte: Lu et al. (2013)

Na Figura 2.6 vemos um prédio e uma torre alta de onde desenvolveram dois líderes ascendentes conectivos consideravelmente grandes. Com esse registro, Lu et al. (2013)) conseguiram determinar algumas características físicas como velocidade, aceleração e comprimento. Complementando esse trabalho, Gao et al. (2014) analisaram o comportamento desses líderes em 3 dimensões (3D) e econcluíram que os líderes apresentavam valores cerca de 30% maiores quando comparados com medidas 2D.

Os estudos de líderes conectivos partindo de estruturas aterradas é um dos problemas mais importantes e atuais na pesquisa de física de relâmpagos (DWYER; UMAN, 2014) e é a base quando falamos sobre Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDAs).

Os SPDAs têm a função de interceptar os relâmpagos os quais, sem eles, atingiriam diretamente a estrutura, incluindo equipamentos e/ou dispositivos eletroeletrônicos instalados. Esses sistemas são compostos por para-raios e cabos de descida e de aterramento que se encarregam de fornecer um caminho alternativo à corrente elétrica do relâmpago para a terra, com o mínimo de danos possível à estrutura.

Quando falamos em SPDAs, temos que levar em consideração duas características principais: distância de atração (o momento que o para-raios irá perceber a presença do relâmpago) e o pico de corrente elétrica do relâmpago. Primeiramente, iremos discutir a respeito de distância de atração (do inglês, *striking distance*). Essa distância diz respeito a resposta do para-raios na presença da aproximação de um relâmpago. Ou seja, o para-raios atua ativamente com o objetivo de oferecer um caminho mais fácil para os relâmpagos descendentes.

Há duas definições sobre esse conceito de distância de atração. A primeira, formulada por Golde (1973), consiste na separação entre a ponta do líder descendente e a ponta de uma estrutura aterrada quando um líder conectivo ascendente é iniciado a partir da ponta da estrutura (visto na Figura 2.7a). A segunda definição é a distância da ponta do líder descendente até o ponto da estrutura aterrada a partir da qual o líder ascendente foi iniciado, quando ocorre a conexão entre os líderes (visto na Figura 2.7b). Esse momento é chamado salto final (do inglês, *final jump*) e foi definido como Modelo Eletrogeomagnético (EGM) (COORAY et al., 2014). O modelo EGM está relacionado com o aumento do gradiente de potencial entre os líderes. Quando é atingido um valor suficientemente alto, cria-se a condição para o salto final (COORAY; BECERRA, 2012).

Figura 2.7 - Distância de atração pelas definições de Golde e modelo EGM.

(a) Definição utilizada por Golde; (b) Definição utilizada pelo modelo EGM.
Fonte: Próprio autor.

Embora existam as duas definições para se determinar a distância de atração, a definição de Golde (Figura 2.7a) é uma simplificação do estágio final do desenvolvi-

mento de um líder descendente enquanto que a segunda definição (Figura 2.7b) é a mais utilizada nos modelos existentes.

Os líderes conectivos têm sido analisados em estudos recentes a partir de estruturas altas (YOKOYAMA et al., 1990; LU et al., 2013; LU et al., 2015; VISACRO et al., 2016) ou mediante relâmpagos induzidos por foguetes (WANG et al., 1999).

Em relação a distância de atração, seus cálculos levam em consideração apenas o pico de corrente do relâmpago. Isso devido à dificuldade em se quantificar e equacionar outros fatores, como: o volume de cargas contido no canal líder descendente, altura das estruturas, bolsões de cargas distribuídos pela atmosfera, ventos, etc. A fórmula que melhor define a relação entre a distância de atração e o pico de corrente do relâmpago é expressa por:

$$R_s = a.I^b \tag{2.1}$$

Onde R_s é a distância de atração, I representa o pico de corrente elétrica, dado em kA, e $\boldsymbol{a}$ e $\boldsymbol{b}$ constantes arbitrárias.

Alguns autores determinaram essas constantes, representados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Constantes a e b da distância de atração encontradas por alguns autores.

Autor	$\boldsymbol{a}$	$\boldsymbol{b}$
Love (1973)	10,0	0,66
Armstrong and Whitehead	6,0	0,80
Brown and Whitehead	6,4	0,75
IEEE standard 1243 (1997)	8,0	0,65
IEC standard 62305 (2009)	10,0	0,65

2.1.2 Relâmpagos descendentes positivos

Os relâmpagos descendentes positivos são aqueles que transferem cargas positivas para o solo. Ocorrem com uma frequência de 10 a 20% durante uma tempestade (RAKOV, 2016). O primeiro estudo documentado da caracterização estatística desse fenômeno foi feito por Berger (1975), observando 26 relâmpagos positivos no Monte

San Salvatore, Suiça (BERGER, 1975).

Apesar das etapas serem semelhantes aos relâmpagos negativos, algumas características são distintas. Apenas 20% deles possuem mais de uma descarga de retorno. Suas descargas subsequentes, na maioria das vezes, formam outro canal atingindo outro ponto de contato no solo (SABA et al., 2010). No que se refere à corrente contínua, os relâmpagos positivos possuem correntes contínuas longas em 70% dos casos (SABA et al., 2010). Também costumam apresentar picos de correntes de maior intensidade (ORVILLE et al., 2001; RAKOV; UMAN, 2003; SCHULZ et al., 2005; NACCARATO, 2005; SABA et al., 2010).

Em relação à velocidade dos líderes descendentes positivos, Berger e Vogelsanger (1969) mostraram, pela primeira vez, que a velocidade média de um líder positivo é cerca de 4.10^5 m/s, sendo constante em sua propagação. No Brasil, Saba et al. (2007) analisaram cerca de 46 líderes positivos utilizando câmeras de alta velocidade com 8 mil imagens por segundo. Os autores encontraram uma velocidade constante de aproximadamente $3,8.10^5$ m/s. Por outro lado, Campos et al. (2014) analisaram o comportamento de 29 líderes descendentes mediante câmeras de alta velocidade e, concluíram que a velocidade desses líderes aumenta conforme se aproxima do solo.

Quando estudamos o processo de formação do relâmpago, um fenômeno interessante observado por câmeras de alta velocidade que ocorre em frente a ponta do líder positivo é denominado pincel corona (ou do inglês, *corona brush*). Conforme o líder se desenvolve, há um brilho menos intenso em sua ponta, em forma de cone. A Figura 2.8 mostra esse fenômeno, em um caso de líder descendente que caminha em direção ao solo. A partir de estudos realizados em laboratório, Bazelyan et al. (1978) sugeriram que seu comprimento variava entre 100 e 200m e que, para o surgimento desse fenômeno, seria necessário um potencial elétrico na ponta do líder entre 50 e 100 MV.

Figura 2.8 - Exemplo de pincel corona (brilho menos intenso) na ponta do líder descendente, representando por um pontilhado.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 2.8 podemos observar um brilho de menor intensidade, em formato de cone, em frente ao líder descendente. Esse fenômeno começou a ser observado por Idone (1992) utilizando câmera ultravioleta em um relâmpago induzido por foguete, relatando um comprimento de 5 a 10 metros. Posteriormente, Warner et al. (2012) relataram a presença de pincel corona em observações por câmeras de alta velocidade em líderes ascendentes, com comprimento de 83 a 121 metros.

O único trabalho publicado acerca de pincel corona em líderes positivos foi realizado por Zhao et al. (2016), os quais, em laboratório, conseguiram obter registros ópticos desse fenômeno. A Figura 2.9 mostra o laboratório utilizado para a observação do pincel corona.

Figura 2.9 - Laboratório utilizado para observações de pincel corona.

Fonte: Zhao et al. (2016).

Na Figura 2.9 é possível observar que quando a corrente elétrica atinge um certo valor, o pincel corona parece bifurcar. Nesse momento, a corrente elétrica e o comprimento do pincel corona na ponta do líder diminui.

2.1.3 Relâmpagos ascendentes negativos

Os relâmpagos ascendentes ocorrem com menor frequência que os relâmpagos descendentes. Sua ocorrência pode, no entanto, ser muito intensa em locais específicos, como estruturas muito altas, podendo até superar a ocorrência de relâmpagos descendentes (HEIDLER et al., 2012). A Figura 2.10 mostra um exemplo de relâmpago ascendente, que iniciou de uma torre de telecomunicação, registrado no município de São Paulo.

Figura 2.10 - Relâmpago ascendente negativo.

Fonte: Paiva et al. (2014).

Os relâmpagos ascendentes começaram a ser estudados na década de 1930 (MCEACHRON, 1939). Nos últimos anos, devido a rápida expansão do número de torres de geração de energia eólica e da enorme quantidade de antenas de telecomunicações, houve um crescente interesse em estudar esses relâmpagos. Alguns desses estudos foram realizados no Japão (TAKAGI et al., 2006; WANG et al., 2008), na Alemanha e na Áustria (MIKI et al., 2005; FLACHE et al., 2008), nos Estados Unidos (MAZUR; RUHNKE, 2011) e mais recentemente, no Brasil (SABA et al., 2012; PAIVA, 2015; SCHUMANN, 2016).

A iniciação dos relâmpagos ascendentes se dá quando uma tempestade ocorre perto de uma estrutura alta. Uma intensificação do campo elétrico no topo da estrutura possibilita a ruptura dielétrica do ar e um líder ascendente se inicia propagando-se em direção à base da nuvem (SABA et al., 2012).

Há também trabalhos que relatam que os ascendentes são iniciados por outro relâmpago descendente, positivo em sua maioria, que ocorre nas proximidades dessas estruturas (WANG et al., 2010; MAZUR; RUHNKE, 2011; WARNER et al., 2012). No Brasil, em 2012, os relâmpagos ascendentes começaram ser estudados com auxílio de sensores de campo elétrico (SCHUMANN et al., 2014) e câmeras de alta resolução temporal (SABA et al., 2016; SCHUMANN et al., 2019).

Em relação à polaridade desses relâmpagos, eles podem ser negativos ou positivos, sendo este último mais raro. A Figura 2.11 mostra detalhadamente as etapas do relâmpago ascendente negativo.

Figura 2.11 - Etapas de um relâmpago ascendente negativo.

Fonte: Próprio autor.

Durante a propagação do líder ascendente em direção à nuvem de tempestade, há o aparecimento de uma corrente contínua inicial (CCI) ao longo do canal até a base da nuvem. Isso ocorre até centenas de milissegundos depois de iniciada a des-

carga. Durante a CCI podemos observar súbitas intensificações de corrente que são denominadas pulsos de CCI ou componentes M (Figura 2.11e). Cessando a CCI, o decaimento do canal do líder ascendente provoca o surgimento de líderes de recuo (Figura 2.11g). Esses líderes podem aproveitar o canal ionizado para iniciar a descarga de retorno subsequente (Figura 2.11h).

A Figura 2.12 ilustra qual seria a variação de corrente ao longo do tempo para um relâmpago ascendente iniciado pela corrente contínua inicial (com componentes M) e seguido por duas descargas de retorno subsequentes.

Figura 2.12 - Variação da corrente ao longo do tempo para relâmpago ascendente.

Fonte: Paiva (2015).

Em relação ao desenvolvimento do líder ascendente, recentemente um trabalho publicado na Revista Nature por Hare et al. (2019) apresenta, pela primeira vez, o registro de agulhas (do inglês, *needles*) vistos no interior da nuvem de tempestade, como mostra a Figura 2.13.

Figura 2.13 - Registro de agulhas no canal do líder ascendente no interior de uma nuvem de tempestade utilizando técnica de detecção em VHF.

Fonte: Hare et al. (2019).

Pela Figura 2.13,conseguimos visualizar 11 agulhas (N1 até N11) no canal de um líder ascendente em desenvolvimento. Os autores explicam que essas agulhas estão associadas com o decaimento do canal do líder ascendente, que, por consequência, provocam o surgimento de líderes de recuo. A presença de líderes de recuo, por sua vez, está associada às múltiplas descargas de retorno em um relâmpago. Ou seja, Hare et al. (2019) concluem que a existência de agulhas em um líder positivo está associada à ocorrência de múltiplas descargas de retorno de um relâmpago negativo.

3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

3.1 Locais de Observação

3.1.1 São Paulo

A instrumentação utilizada nesse trabalho estava instalada na região de Pirituba, localizada na cidade de São Paulo. SP. Esse local permitia observar o Pico do Jaraguá, ponto mais alto da cidade de São Paulo, onde existem 3 torres de telecomunicações. Além disso, o campo de visão da câmera contemplava dois prédios isolados nessa região, que propiciou a observação de líderes conectivos partindo dos para-raios dessas estruturas. A Figura 3.1 mostra todos os pontos de observação.

Figura 3.1 - Locais de observação.

(a) Conjunto de 6 prédios residenciais; (b) Prédios instrumentados denominados P1 e P2; (c) Torres do Pico do Jaraguá, denominadas T1 e T2; (d) Caixa d'água de uma escola; (e) Telhado de uma casa residencial; (f) Torre de celular 4; (g) Torre de telecomunicação T4; (h) Torre de telecomunicação T6.

Fonte: Próprio autor.

Além dos prédios (ponto B na Figura 3.1b) e do Pico do Jaraguá (Ponto C), foram monitorados edifícios comuns (de 60 metros de altura), visto no ponto A, torres de telecomunicação (entre 30 e 130 metros de altura) (Pontos F, G, H) e residências (3 a 10 metros de altura) (Pontos E, D).

Recentemente houve construções de outros prédios ao redor do Ponto B, o que acabou alterando o campo de visão das câmeras, como mostra a Figura 3.2.

Figura 3.2 - Novo campo de visão dos pontos de observação.

Fonte: Próprio autor.

3.1.2 Rapid City

Outro local de observação desse trabalho foi na cidade de Rapid City, localizada no Estado de Dakota do Sul, EUA. As observações de relâmpagos nessa região foram realizadas pelo pesquisador Tom A. Warner em colaboração com o INPE no período de 2010 a 2014 (WARNER, 2010) e cedidas para este estudo. Foram utilizados câmeras de alta velocidade distantes de 4,63 km a 7,15 km dos pontos de observação. A Figura 3.3 mostra o campo de visão das câmeras, bem como as torres nas quais ocorreram os relâmpagos ascendentes analisados nesse trabalho.

Figura 3.3 - Torres de Rapid City, dentro do campo de visão das câmeras de alta velocidade.

Fonte: Warner et al. (2012).

As torres possuem alturas variadas, entre 55 e 190 metros, localizadas em uma montanha de aproximadamente 114 metros (em relação ao solo) e 1146 metros em relação ao nível do mar.

Para determinar a polaridade dos relâmpagos observados, utilizou-se os dados do sensor de campo elétrico. Esses sensores foram os mesmos utilizados no Brasil (descritos na Seção 3.2.4) e estavam localizados entre 5 e 6 km de distância das torres.

3.2 Equipamentos

Para caracterizar fisicamente os líderes positivos, foram instalados próximo aos pontos de observação alguns equipamentos, como: câmeras de alta velocidade, sensores de corrente elétrica e sensores de campo elétrico. Além desses instrumentos, foram utilizados dados das redes de detecção de descargas atmosféricas (BrasilDAT e RINDAT). Essa seção detalhará o funcionamento desses equipamentos.

3.2.1 Câmeras de alta velocidade

As câmeras utilizadas nesse estudo operam a uma taxa de 1.000 a 100.000 imagens por segundo, permitindo registrar diversas características dos relâmpagos.

O principal recurso dessas câmeras é o sistema de memória circular, o qual registra as imagens continuamente em sua memória interna em forma de *looping*. Quando os dados atingem o limite de armazenamento da memória, a primeira imagem registrada é apagada, liberando espaço para outra imagem mais recente, e assim, sucessivamente. Acionado o botão de registro, a câmera grava um determinado intervalo de tempo antes do instante de acionamento (chamado pré-acionamento) e o restante do intervalo de tempo após o acionamento (denominado pós-acionamento). Esses intervalos de tempo são configurados previamente nas câmeras, tendo sido usado 2,5 segundos para exemplo, como mostra a Figura 3.4.

Figura 3.4 - Ilustração do funcionamento da câmera de alta velocidade e o sistema de gravação circular.

Fonte: Schumann (2016).

Para esse estudo, foram utilizadas câmeras de alta velocidade do fabricante Phantom, nas versões v310 (9.000 imagens por segundo), v12 (100.000 imagens por segundo) e v711 (20.000 imagens por segundo). A foto dessas câmeras é mostrada na Figura 3.5 e as suas configurações são resumidas na Tabela 3.1.

Figura 3.5 - Ilustração das câmeras de alta resolução.

(A) Câmera Phantom v310; (B) Câmera Phantom v711; (C) Câmera Phantom v12.1

Fonte: Phantom (2018).

Tabela 3.1 - Características das câmeras de alta velocidade.

Câmeras	**Velocidade (FPS)**	**Lente (mm)**	**Abertura (º)**	**Foco**
v711	20k	6,5	126	Infinito
v12	100k	6,0	126	Infinito
v310	9k	20,0	94	Infinito

Em São Paulo (Brasil), foram utilizadas as câmeras V711 e V12 e, em Rapid City (EUA) a câmera V310. Foram necessárias essas duas câmeras em São Paulo pois ambas realizavam observações distintas. Enquanto a V711 visualizava a propagação dos líderes, a V12 registrava o desenvolvimento dos líderes ascendentes conectivos e o momento da conexão desses líderes nos para-raios. A Figura 3.6 mostra um exemplo de campo de visão de cada câmera.

Figura 3.6 - Campo de visão das câmeras V711 e V12.

(a) Campo de visão da câmera V711; (b) Campo de visão da câmera V12

Fonte: Próprio autor.

Para a visualização dos vídeos gravados no Brasil e EUA bem como a análise minuciosa dos líderes positivos registrados, foi utilizado o software PCC, disponibilizado pelo fabricante das câmeras Phantom.

3.2.2 Redes de Detecção de Descargas Atmosféricas

Os relâmpagos emitem radiações eletromagnéticas que podem ser detectadas por sensores, desde que estejam configurados em frequências específicas. As descargas de retorno dos relâmpagos nuvem-solo emitem radiação eletromagnética de baixa frequência, denominada LF (Low Frequency) variando entre 10 a 300 kHz (UMAN, 1987). Os relâmpagos intra-nuvem, por serem processos de ruptura, emitem radiação eletromagnética de alta frequência, denominada VHF (Very High Frequency), que variam entre 100 a 800 MHz (KRIDER, 1996).

As redes de sensores de solo possibilitam detectar um relâmpago e fornecer diversas características, como: localização, horário de ocorrência com precisão de milissegundos, estimativa da intensidade de corrente de pico, tipo de relâmpago (nuvem-solo ou intra-nuvem), polaridade (negativo ou positivo) e multiplicidade. Maiores detalhes podem ser vistos em Nag et al. (2014).

No Brasil, as redes de detecção existentes são: BrasilDAT e RINDAT. A rede BrasilDAT (Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas) começou a ser instalada no Brasil em 2011 pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em parceria com a EarthNetworks dos EUA (NACCARATO et al., 2012). O principal objetivo dessa rede é o monitoramento em tempo real dos relâmpagos nuvem-solo e intra-nuvem simultaneamente, o que é chamado relâmpagos totais (do inglês, *total lightning*).

A rede RINDAT (Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas)é uma rede formada por sensores de diversas instituições cobrindo a região Sudeste e parte da região Sul do país. Essa rede detecta predominantemente os relâmpagos nuvem-solo (NACCARATO et al., 2012; RINDAT, 2015).

Além das informações básicas dos relâmpagos, as redes utilizam as formas de onda eletromagnética emitida pelos pulsos das descargas de retorno para estimar o valor do pico de corrente que circulou pelo canal principal do relâmpago a partir de modelos matemáticos. Esses modelos consideram que o valor de pico do campo elétrico irradiado pela descarga é diretamente proporcional ao pico de corrente que flui pelo canal, segundo a expressão (WACKER; ORVILLE, 1999):

$$I_{pk} \approx \frac{2\pi D}{\mu_0 \nu} E_{pk} \tag{3.1}$$

sendo I_{pk} a intensidade do pico da corrente, D a distância horizontal da fonte de radiação, μ_0 a permeabilidade magnética no vácuo; ν a velocidade de propagação do pico de corrente de retorno (constante); E_{pk} a intensidade do pico da radiação do campo elétrico vertical no solo. Por essa relação observa-se que o pico de corrente de um relâmpago é proporcional ao valor de seu campo elétrico.

3.2.3 Sensores de Corrente Elétrica

Para medir a corrente elétrica dos relâmpagos de forma direta, foram instalados sensores nos para-raios de dois prédios localizados na cidade de São Paulo, como mostrado na Figura 3.1b. Esses sensores são do modelo Pearson 301X e conseguem determinar correntes elétricas com intensidades que variam de dezenas de àmperes a 50 kA.

Com esses sensores é possível determinar as correntes elétricas dos líderes ascendentes conectivos e não conectivos (LACs e LANCs), além do pico de corrente elétrica do relâmpago, que possui seu valor máximo no momento da conexão.

Esse sensor possui uma bobina feita de fio de cobre enrolado centenas de vezes, e o para-raios deve passar dentro do sensor, como apresentado na Figura 3.7. Cabos, atenuadores e conectores não devem ficar expostos à chuva, dessa forma foram acondicionadas em caixas a prova d'água.

Figura 3.7 - Sensor de corrente no para-raios.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 3.7, a haste do para-raios passa pelo interior do sensor de corrente elétrica e, quando há algum sinal de corrente elétrica descendo por ele, o campo magnético induz uma diferença de potencial proporcional à corrente circulante que é transmitida por fibra óptica para os sistemas de aquisição.

3.2.4 Sensores de Campo Elétrico

Para auxiliar nas análises dos líderes positivos, utilizou-se dados de sensores de campo elétrico, instalados à cerca de 10 quilômetros dos pontos de observação, como ilustrado na Figura 3.8.

Figura 3.8 - Ilustração da localização do sensor do campo elétrico (USP) em relação aos pontos de observação de relâmpagos.

Fonte: Adaptado do Google Maps (2020).

Os sensores de campo elétrico são antenas capacitivas de prato plano que conseguem registrar a radiação eletromagnética emitida pelos relâmpagos, medindo a derivada do campo elétrico no decorrer do tempo. Esse sinal passa por um integrador que fornece o campo elétrico. Com isso, é possível detectar as componentes de alta frequência do relâmpago (geradas pelas descargas de retorno, por exemplo) com alta taxa de amostragem, permitindo analisar detalhadamente as formas de ondas observadas.

O esquema da Figura 3.9 mostra como funciona o sistema de gravação dos sensores de campo elétrico. O sinal capturado pelas antenas planas passa por um integrador que opera na frequência de 300 Hz a 2 MHz. O sinal é digitalizado a uma taxa de 5 milhões de amostras (do inglês *mega samples*) por segundo e transmitido via fibra óptica para o computador que armazena os dados em arquivos em disco.

Figura 3.9 - Esquema de gravação dos sensores de campo elétrico dos relâmpagos.

Fonte: Schumann (2012).

A forma de onda resultante da aquisição de um relâmpago é mostrada na Figura 3.10.

Figura 3.10 - Exemplo da forma de onda do sensor de campo elétrico.

Fonte: Próprio autor.

3.3 Metodologia

Para o registro dos relâmpagos, este estudo experimental contou com câmeras de alta velocidade e outros equipamentos de medida, como: sensores de campo elétrico, sensores de corrente elétrica e redes de detecção, descritos na Seção 3.2.

Todos esses equipamentos foram necessários para caracterizar fisicamente os processos deformação e propagação dos líderes positivos, mais especificamente os líderes conectivos e não conectivos, pincel corona e agulhas. Para isso, nessa seção serão detalhados como foram extraídas as medidas desses equipamentos e a validação realizada.

3.3.1 Preparação e instalação dos equipamentos

Os líderes ascendentes conectivos começaram a ser registrados por câmeras de alta velocidade em 2013, quando foi observada conexão nos para-raios de dois edifícios instrumentados, na cidade de São Paulo. A partir desse registro, houve interesse de instrumentar os para-raios com sensores de corrente elétrica, sensores de campo elétrico e sensores de raios-x com a finalidade de medir a intensidade desses líderes e estudar seu comportamento.

Para a preparação dessa instrumentação, primeiramente foi necessária autorização dos moradores do condomínio. No topo do prédio havia diversas antenas de TV (não utilizadas) que precisavam ser removidas para evitar que LACs e LANCs ocorressem a partir delas. Além disso seria necessário retirar a haste principal do para-raios para introduzir o sensor de corrente elétrica, essa instalação deveria ser realizada por um técnico especializado. Os registros dessas instalações estão na Figura 3.11. Foram necessárias algumas reuniões com os moradores a fim de esclarecer que nem a estrutura do edifício e nem as proteções seriam alteradas. Além do topo do edifício, era necessário um espaço no térreo, onde ficariam os computadores de aquisição de dados. Esse local foi cedido pelo condomínio e, para certificar que não teria corrente induzida nos equipamentos, instalou-se protetores de surto nos cabos das antenas GPS e utilizou-se cabos de fibra óptica entre os medidores desde o para-raios até o computador de aquisição de dados. Esses cabos de fibra óptica tinham como objetivo evitar interferência no sinal, bem como proteger os edifícios de correntes elétricas induzidas produzidas pelos relâmpagos.

Figura 3.11 - Adaptação do prédio para a instalação da instrumentação.

(a) Antenas de TV no topo do edifício; (b) Desmontagem das antenas; (c) Descida das antenas; (d) Retirada da haste do para-raios para instalação do sensor de corrente elétrica. Fonte: Próprio autor.

Antes de sua instalação, todo o sistema foi testado em um laboratório da Universidade de São Paulo - USP. Os testes tinham como objetivo verificar o desempenho e limitações do sistema de medição de corrente elétrica desenvolvido pela equipe. A Figura 3.12 mostra alguns registros da preparação dos testes.

Figura 3.12 - Registros de testes dos equipamentos realizados na USP.

(a) Preparação dos equipamentos a serem testados; (b) Checagem dos instrumentos antes dos testes.

Fonte: Relatório interno do grupo.

No primeiro teste foi aplicada uma corrente elétrica fora do sensor de corrente Pearson (detalhado na Seção 3.2.3), distante 30 cm. O rack com os equipamentos estavam situados entre 6 e 8 metros de distância. Também foram conectados cabo GPS e de energia (220V), como mostra o esquema e fotos da Figura 3.13. O objetivo era verificar a existência de ruídos do sistema, principalmente no que diz respeito ao alto campo magnético próximo aos componentes eletrônicos, localizados no interior da caixa que continha os conversores e transmissores de sinal óptico.

Figura 3.13 - Registros do primeiro teste realizado.

(a) Esquema do sistema; (b) Gerador de corrente distante 0,3m do sensor de corrente; (c) Caixa aberta mostrando cabo do sensor de corrente desconectado.
Fonte: Relatório interno do grupo.

Em seguida, foram realizados mais dois testes. No primeiro, o cabo que conecta o sensor de corrente Pearson foi removido e a caixa permaneceu aberta. No final desse teste, a corrente encontrada no sistema interno à caixa metálica foi zero, conforme esperado.

No segundo teste, foram conectados os cabos e aplicado um pulso de corrente através do sensor Pearson, como mostra o esquema e as fotos da Figura 3.14. Estes testes foram importantes para calibrar o sistema e permitir a validação das informações de corrente de pico fornecidas pela rede de detecção BrasilDAT, conforme será discutido na seção 3.3.2.

Figura 3.14 - Registro do segundo teste do sistema de sensor de corrente elétrica.

(a) Esquema do sistema; (b) Registro do gerador de corrente através do sensor Pearson; (c) Isoladores.
Fonte: Relatório interno do grupo.

Para a instalação da instrumentação, foi necessário estudar a planta dos edifícios para realizar a passagem dos cabos de fibra óptica até o espaço onde ficariam os computadores. Como o rack que continha os computadores de aquisição de dados se encontrava no prédio à direita (denominado P2 na Figura 3.15), decidiu-se instalar os sensores de campo elétrico e raios-x no topo desse prédio. Dessa forma, para que os instrumentos instalados no topo do prédio à esquerda (denominado P1 na Figura 3.15) chegassem até o rack, foram necessários 3 cabos de fibra óptica de 120 metros, que seguiram a trajetória mostrada a Figura 3.15: descida pelo duto corta-fogo do prédio P1 até o primeiro andar, seguida pela descida até o sub-solo (garagem), e por meio de canaletas atravessaram a atravessam até o sub-solo do prédio P2. Por meio de canaletas, seguiram até o primeiro andar para, posteriormente, descerem até a sala onde estava instalado o rack com os computadores. Para os instrumentos instalados no prédio P2 foram utilizados 5 cabos de fibra óptica

com descida direta pelo duto corta-fogo até a sala com o rack (Figura 3.15).

Figura 3.15 - Esquema utilizado para a passagem dos cabos de fibra óptica até os computadores de aquisição de dados.

Fonte: Relatório interno do grupo.

Com a passagem dos cabos de fibra óptica, foi possível a instalação dos equipamentos nos topos dos dois prédios. A Figura 3.16a mostra os sensores de raios-x e sensores de campo elétrico. Os sensores de corrente elétrica foram instalados na haste dos para-raios dos prédios, como mostra a Figura 3.16b.

Figura 3.16 - Sensores de campo elétrico, corrente elétrica e raios-x no topo dos prédios instrumentados P1 e P2.

Fonte: Próprio autor.

3.3.2 Validação das redes de detecção de relâmpagos BrasilDAT e RINDAT

Para validar os dados de corrente elétrica fornecido por essas redes, utilizamos as medidas de corrente elétrica registradas de forma direta de um caso de conexão com os para-raios instrumentados. A Figura 3.17 mostra as imagens das descargas de retorno subsequentes desse relâmpago descendente negativo e a Tabela 3.2 mostra as medidas de corrente elétrica fornecidas por esse sensor comparado com os dados da BrasilDAT e RINDAT.

Figura 3.17 - Registro de 7 descargas de retorno de um relâmpago descendente negativo.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 3.2 - Comparação do pico de corrente medido com picos de corrente estimados pelas redes BrasilDAT e Rindat.

			Medida indireta (KA)	
Descarga de retorno	**Tempo**	**Corrente medida**	**BrasilDAT**	**RINDAT**
1	28.785	-58/80	ND	ND
2	28.844	-8,6	-7	ND
3	28.863	-	-6	ND
4	28.891	-13,3	-13	ND
5	28.910	-6,8	-4*	ND
6	28.977	-14,2	-16	-14
7	29.105	-16,4	-17	-15

* BrasilDAT classificou incorretamente como uma descarga intra-nuvem
ND = não detectado

A Tabela 3.2 nos mostra que os valores dos picos de corrente elétrica fornecidos pelas redes BrasilDAT e RINDAT são muito próximos dos reais. Essa validação nunca havia sido realizada desde que as redes de detecção foram implementadas no Brasil. Além de utilizar os dados dessas redes nesse trabalho, essas medidas poderão contribuir para a validação dos dados utilizados em outras pesquisas.

3.3.3 Estimativa dos picos de corrente elétrica

Os dados do campo elétrico utilizados nesse trabalho foram importantes para encontrar os valores de picos da corrente dos relâmpagos que não foram registrados pelas redes de detecção BrasilDAT e RINDAT. Esses valores foram determinados utilizando os valores de pico das formas de onda da radiação emitida por esses relâmpagos, uma vez que são os valores de pico da radiação e da corrente elétrica que circula no canal são diretamente proporcionais, como discutido na 3.2 (NACCARATO et al., 2012).

Dessa forma, foram selecionados 17 casos de vídeos de relâmpagos que ocorreram na mesma região de interesse. Como os relâmpagos ocorrem em locais diferentes, o sinal apresenta atenuações distintas em relação aos sensores. Assim, foi necessário normalizar as formas de onda do campo elétrico (E) para 100 km em relação ao sensor de campo elétrico.

O resultado dessa correlação encontra-se na Figura 3.18. A partir dessas medidas, obteve-se uma correlação de 92%, através da seguinte equação:

$$I_p = 2,54.E_{100} + 0,17 \tag{3.2}$$

Onde I_p é o pico de corrente do relâmpago e E_{100} é a medida normalizada para 100 km do campo elétrico obtido. Com isso, foi possível determinar o valor de corrente de pico de qualquer relâmpago cuja forma de onda do campo elétrico era conhecida.

Figura 3.18 - Relação entre o pico de corrente com o campo elétrico normalizado (para 100 quilômetros) de relâmpagos registrados.

Fonte: Próprio autor.

A partir da equação 3.2 foi possível determinar os valores de pico de corrente elétrica para os relâmpagos que não foram detectados pelas redes BrasilDAT e RINDAT. Conhecendo os valores de picos de corrente para os casos de líderes conectivos, calculou-se as distâncias de atração segundo os modelos definidos por Golde e EGM.

3.3.4 Extração de dados dos vídeos registrados por câmeras de alta velocidade

Para obter os parâmetros físicos dos líderes, como comprimento, velocidade e aceleração, primeiramente foi necessário analisar cada caso de forma minuciosa, observando cada imagem do desenvolvimento dos líderes. Para cada quadro, eram retirados a localização dos pixels e os dados eram compilados em uma planilha. Em um segundo momento, foi utilizada a técnica de fotogrametria para determinar qual o valor de cada pixel correspondente em metros. Como os dados utilizados nesse trabalho foram em duas dimensões, era necessário conhecer alguns parâmetros, como: distância do relâmpago até a câmera e a lente utilizada. Conhecendo o comprimento da estrutura (ou parte dela), era possível determinar a relação de pixel por metros (pixel/m) de maneira mais simplificada. Nos casos analisados, a altura real de cada

andar do prédio, em metros, era conhecida e serviam como base para comparar com a quantidade de pixels que aquele determinado andar ocupava na imagem, como exemplifica a Figura 3.19.

Figura 3.19 - Exemplo de extração de dados dos vídeos.

Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.19 ilustra a extração dos dados das imagens quando se conhece o comprimento da estrutura. No exemplo utilizado, cada andar do prédio possui 2,7 metros. Colocando como referência 3 andares, estes ocupam 12 pixels na imagem. Sendo assim, cada pixel equivale a 0,66 metros. Em todos os casos, como o comprimento real da estrutura era conhecido e considerando que os líderes se propagavam em duas dimensões, foi possível essa aproximação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o desenvolvimento desse trabalho, foram utilizados 9 anos de dados do acervo de dados do grupo, que possui mais de 2000 vídeos de relâmpagos, entre os anos de 2011 a 2020 no Brasil e 2008 a 2012 nos Estados Unidos. De todos os dados analisados, foram selecionados cerca de 200 casos, entre relâmpagos ascendentes e descendentes, devido à proximidade da câmera até o fenômeno. Cada vídeo foi analisado minuciosamente em busca de: líderes ascendentes conectivos partindo de estruturas aterradas; pincel corona e agulhas. No total, para a elaboração desse trabalho, foram selecionados 25 casos de vídeos com líderes ascendentes conectivos, 8 casos em que apareciam pincéis corona e 3 casos em que foi possível a visualização das agulhas.

Sendo assim, esse capítulo será subdividido em três partes: líderes conectivos e não-conectivos, pincel corona e agulhas.

4.1 Estudo dos líderes conectivos e não-conectivos

Este estudo, pela primeira vez, observou e analisou os líderes conectivos em edifícios comuns. Para a apresentação dos resultados, essa seção será subdividida em: características dos líderes conectivos e estudo da distância da atração.

4.1.1 Caracterização dos líderes conectivos e não conectivos

Para estudar o comportamento de conexões de relâmpagos descendentes em edifícios comuns, analisou-se 3 casos para os quais foi possível observar Líderes Ascendentes Conectivos (LACs) e Líderes Ascendentes Não Conectivos (LANCs). Primeiramente determinou-se as distâncias percorridas por esses líderes, apresentados na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Relação da distância com o tempo de 3 casos de relâmpagos descendentes que conectaram edifícios.

Fonte: Adaptado de Saba et al. (2017a).

Na Figura 4.1, para todos os casos adotou-se o tempo 0 (zero) como o instante da descarga de retorno. Pode-se observar que o início dos líderes conectivos e não conectivos ocorre centenas de microssegundos antes da descarga de retorno e que se iniciam quando o líder descendente está a dezenas de metros do para-raios. Essas medidas são apresentadas na Tabela 4.1.

Ainda na Figura 4.1 observa-se que os líderes descendentes possuem velocidade de propagação constante, as quais variam entre 13,4 e $27,5.10^4$ m/s. Em relação aos líderes conectivos e não conectivos, sua propagação também ocorre a uma velocidade constante variando entre 4,3 a $6,2.10^4$ m/s. No caso B, observa-se que a última posição observada, indicada por uma seta, não foi utilizada para calcular a velocidade, pois ela varia abruptamente em função do fenômeno denominado salto final (do inglês, *final jump*). Como visto no Capítulo 2, esse fenômeno ocorre microssegundos antes da conexão entre o líder descendente e o líder conectivo.

Ainda sobre os três casos de conexão analisados, a Tabela 4.1 apresenta algumas medidas importantes: relações entre velocidade dos líderes, distância de atração entre o momento do início do líder conectivo e a ponta do líder descendente (em 2D) e a distância entre a ponta do líder descendente até o para-raios imediatamente antes da conexão.

Tabela 4.1 - Características dos líderes e distância de atração.

	Caso A	**Caso B**	**Caso C**
Data e Horário	09 fev 2014 / 21h28min37s	01 mar 2014 / 22h37min38s	25 fev 2015 / 20h05min00s
Velocidade do líder descendente (V_d)(m/s)	$13,4.10^4$	$27,5.10^4$	$14,6.10^4$
Velocidade do LAC (V_{LAC})(m/s)	$4,3.10^4$	$5,7.10^4$	$6,2.10^4$
Razão das velocidades (V_d/V_{LAC})	3,1	4,8	2,3
Velocidade do LANC (V_{LANC})(m/s)	$4,0.10^4$	$5,9.10^4$ / $3,9.10^4$	$7,1.10^4$
Distância entre o líder negativo descendente e o para-raio quando o líder ascendente conectivo se inicia (m)	82	120	62
Distância entre o líder negativo descendente e o para-raio no momento do salto final (m)	44	46	40-50

As imagens dos casos analisados (A, B e C) registrados pela câmera de alta velocidade são mostrados na Figura 4.2. A partir dessas imagens é possível observar a evolução dos líderes até o momento da conexão.

Figura 4.2 - Imagens de vídeo de alta velocidade do salto final no momento da conexão.

Caso A (Figuras 4.2a, 4.2b, 4.2e), Caso B (Figuras 4.2d, 4.2e, 4.2f) e Caso C (Figuras 4.2g, 4.2h, 4.2i e 4.2j). Fotografia da imagem do relâmpago Caso C (Figura 4.2k). Fonte: Saba et al. (2017a).

Pelas imagens obtidas e análise de cada caso, encontramos evidências sugerindo que o líder conectivo acelera em direção ao líder descendente, como mostram a sequência de imagens da Figura 4.2a e 4.2b. Pelas imagens vimos que que antes da conexão, o líder descendente permanece parado e o líder ascendente que se desenvolve bruscamente em direção do líder descendente.

Quando os líderes se conectam, uma onda de luminosidade bidirecional é iniciada a partir do ponto de conexão (HILL et al., 2016; JERAULD et al., 2007; WANG et al., 1999; WANG et al., 2013; WANG et al., 2014). No caso A e B, pode-se observar que uma saturação parcial da imagem começa muito perto da posição da ponta do líder

descendente (Figuras 4.2a e 4.2b e Figuras 4.2d e 4.2e) e não próximos ao líder conectivo. Isso pode ser uma indicação de que, nos casos A e B, é o líder ascendente que preenche o salto final. Com isso, conclui-se que, enquanto o líder descendente mantém sua velocidade constante, o líder conectivo acelera drasticamente para uma velocidade média de 31.10^4 m/s, isso significa dizer que é equivalente a 7 vezes maior do que a velocidade média do quadro anterior. Esse aumento significativo da velocidade média do líder conectivo sugere a ocorrência do salto final.

No caso C, embora não seja possível ver claramente o salto final, a sequência de imagens nas Figuras 4.2g-h e a fotografia do relâmpago (Figura 4.2k) sugerem que o líder descendente permanece inalterado.

Essa conexão entre os líderes descendentes e conectivos está fortemente ligada com a sua velocidade. Alguns autores determinaram a razão das velocidades desses líderes. Eriksson (1987a, 1987b) e Rizk (1990, 1994) assumem a razão entre as velocidades igual a 1 (devido à falta de dados). Dellera e Garbagnati (1990a, 1990b) determinaram que essa relação é igual a 4, mas que no processo de conexão essa relação mudaria para 1. Ait-Amar e Berger (2005) estimam uma faixa de relação entre 0,5 a 4 durante o período de desenvolvimento dos líderes. Para os casos analisados nesse trabalho, a razão entre essas velocidades foram entre 2,3 e 4,8 como apresentado na Tabela 4.1.

Em estruturas muito altas, descrito por Lu et al. (2013) o comprimento do líder conectivo chega a centenas de metros, como apresentado no Capítulo 2.

Isso significa que as taxas de velocidades encontradas nessas situações não parecem ser válidas para estruturas comuns (menores que 60 metros). Nessas situações, os líderes conectivos podem acelerar até velocidades que excedem as velocidades dos líderes descendentes. Ao contrário do que é assumido em alguns modelos de propagação de líderes ou observados em estruturas altas, conclui-se que: a velocidade dos líderes descendentes e conectivos é aproximadamente constante e que a velocidade do líder descendente é menor que a velocidade do líder conectivo, chegando a razão entre 2,3 a 4,8 (antes do salto final). Não foi possível observar a propagação dos líderes durante o salto final, mas algumas evidências sugerem que é o líder ascendente conectivo que aumenta em direção ao líder descendente.

Além dos registros de líderes conectivos em para-raios, também foram vistos em outros locais, como: antenas de TV (no topo dos prédios instrumentados), elevadores utilizados nos prédios em construção, hastes nos cantos superiores dos prédios e

antenas de celulares. A Figura 4.3 ilustra diversos líderes ascendentes conectivos partindo de locais não protegidos, em direção a um líder descendente que se desenvolve em direção ao solo.

Figura 4.3 - Líderes ascendentes conectivos partindo em direção a um líder descendente que se desenvolve em direção ao solo.

(1) Haste no canto superior de um prédio em construção; (2) e (3) Elevadores utilizados nos prédios em construção; (4) Lateral do prédio.

Fonte: Próprio autor.

A propagação desses líderes ascendentes segue de forma semelhante aos líderes que partem dos para-raios. A Figura 4.4 mostra um líder conectivo surgindo através de uma antena de TV, além dos para-raios aterrados. Esse registro inédito mostra a importância em se retirar esses equipamentos de topos de edifícios, evitando prejuízos financeiros e até catástrofes.

Figura 4.4 - Registro de líderes conectivos a partir de antena de TV e para-raios.

(a) antena TV; (b) para-raios P1; (c) para-raios P2.

Fonte: Próprio autor.

Dando continuidade a caracterização dos líderes conectivos, Becerra e Cooray (2006) relatam que quando um líder conectivo se inicia a partir de uma haste aterrada, este inibe o desenvolvimento de outro líder próximo a ele. Sendo assim, o líder conectivo se desenvolve capturando o líder descendente. Diante dessa afirmação, buscou-se identificar a propagação de dois líderes conectivos que distam 30 metros entre si. A Figura 4.5 mostra uma sequência de imagens em que aparece a propagação de dois líderes conectivos que se desenvolveram a partir de para-raios de 2 prédios.

Figura 4.5 - Desenvolvimento de dois líderes conectivos.

Fonte: Próprio autor.

A sequência de imagens da Figura 4.5 mostra a propagação de dois líderes conectivos. A partir do primeiro prédio temos o surgimento do líder conectivo (Figura 4.5a). O líder fica invisível e reaparece após 107 μs (Figura 4.5b). Posteriormente, na Figura 4.5c surge o segundo líder conectivo 36 μs depois. Os líderes cessam e surgem novamente na Figura 4.5d após 36 μs. Nas próximas imagens (Figuras 4.5e-m) os líderes se apagam e reaparecem a cada 18 μs. A Figura 4.5n registra o momento em que o líder descendente, que gerou os líderes conectivos, toca o solo ou outro local próximo. Pelas imagens observa-se que os líderes conectivos se desenvolvem de forma alternada, e mesmo distante apenas 30 metros um do outro, parece que o desenvolvimento de um inibe o desenvolvimento de outro, fazendo com que o líder conectivo desapareça por um curto intervalo de tempo. Em relação ao seu desenvolvimento de forma alternada, sugere-se que o desenvolvimento de um líder conectivo impede o aumento do campo elétrico do outro líder. No entanto, dados adicionais e análises mais detalhadas são necessários para verificar essa hipótese.

Para descobrir a relação do comprimento dos líderes ascendentes conectivos em relação a estruturas de onde se iniciam, buscou-se relacionar essas variáveis, conforme apresentado na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Relação entre a altura da estrutura e comprimento do líder ascendente conectivo.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.6 observamos uma correlação de 95% entre o comprimento do líder ascendente conectivo com a altura da estrutura. Com isso, podemos notar que o comprimento dos líderes ascendentes conectivos são proporcionais à altura da estrutura de onde se iniciam.

Essa relação mostra a importância de se conhecer as características físicas de formação e conexão dos relâmpagos com estruturas no solo. Quanto mais altas as estruturas, maior é a probabilidade delas próprias iniciarem líderes ascendentes conectivos. Sendo assim, é crucial entender os parâmetros dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDAs), que levam em consideração a distância de atração e o pico de corrente do relâmpago.

4.1.2 Distância de atração

Golde (1973) introduziu o conceito de distância de atração como sendo a distância entre as pontas do líder descendente e a ponta da estrutura quando iniciar o líder conectivo. Mais tarde, outra definição de distância de atração começou a ser utilizada, entre a ponta do líder descendente e a estrutura aterrada no momento do salto final (RAKOV; LUTZ, 1990).

Independente da definição utilizada, ambas dizem respeito à proteção contra relâmpagos e buscam determinar a distância necessária para se tornar o mais forte candidato a conectar o líder descendente.

Existem vários modelos e expressões disponíveis na literatura que expressam a distância de atração em função do pico de corrente da descarga de retorno e da geometria da estrutura (COORAY; BECERRA, 2012; COORAY et al., 2014). As distâncias de atração apresentadas neste trabalho são os primeiros valores observados para edifícios comuns, ou seja, para estruturas relativamente baixas. Como os valores das distâncias de atração variam de acordo com a definição usada, ambos os valores foram apresentados na Tabela 4.1 analisando 3 casos de conexão nos para-raios. Utilizando outros pontos de observação foi possível determinar a distância de atração pelas duas definições, levando em consideração a relação $R_s = a.I^b$.

4.1.2.1 Uso da definição de Golde

Para determinar a distância de atração sugerida por Golde (1973), utilizamos 10 casos de líderes conectivos registrados por câmeras de alta velocidade e que apresentaram picos de corrente conhecidos, ou estimados conforme descrito na seção 3.3.3.

A Figura 4.7 mostra a correlação entre o $\log(R_s)$ com o $\log(I_p)$. Foi necessário aplicar esse logaritmo devido a função da distância de atração ser exponencial. Assim, pela Figura 4.7, conseguimos determinar o parâmetro **a** igual a 15,9 e o parâmetro **b** igual a 0,56.

Figura 4.7 - Relação entre distância de atração (R_s) e pico de corrente (I_p) para o modelo de Golde (1973).

Fonte: Próprio autor.

Observando uma torre de 60 metros de altura no alto de uma montanha com elevada declividade, Visacro et al. (2017) analisaram 3 casos de líderes descendentes negativos que atingiram a torre e tiveram líderes ascendentes conectivos. Utilizando sensores de corrente elétrica na torre, os autores notaram que seria necessária uma corrente inicial de 4 A para iniciar o líder conectivo. Utilizando dados combinados de vídeo de câmera de alta velocidade e sensores de corrente elétrica os autores determinaram os parâmetros **a** e **b** da relação entre distância de atração e pico de corrente, como sendo 34 e 0,45, respectivamente. Como havia poucos dados, recomendaram utilizar os parâmetros estimados por Love (1973), como também foi sugerido nesse trabalho.

4.1.2.2 Uso da definição pelo Modelo Eletrogeomagnético

Foram utilizados 12 casos de conexão direta com os para-raios dos edifícios instrumentados (P1 e P2) e torres de telecomunicação. Para esses casos as medidas de distância de atração foram realizadas considerando uma imagem antes da conexão. Para as medidas do pico de corrente, foram utilizados os dados da rede BrasilDAT. A Figura 4.8 mostra o resultado desses dados para encontrar os fatores **a** e **b**.

Figura 4.8 - Relação entre a distância de atração (R_s) e o pico de corrente (I_p) para a definição do modelo EGM.

Fonte: Próprio autor.

De acordo com os dados utilizados, foi obtido uma correlação de 61%. Com essa relação, foi possível obter valor do parâmetro **a** igual a 6 e o parâmetro **b** igual a 0,66.

Em ambas as definições foram calculados parâmetros que oscilam entre os parâmetros encontrados por Love (1973), que são as mais utilizadas nos sistemas de proteção.

4.2 Observação do fenômeno pincel corona

Neste estudo observou-se a presença de pincel corona em 6 líderes ascendentes, 1 líder descendente e 3 líderes ascendentes conectivos (LACs). A Figura 4.9 exemplifica o pincel corona para os líderes ascendentes, descendentes e conectivos.

Figura 4.9 - Exemplo do pincel corona nos líderes ascendentes (a), descendentes (b) e conectivo (c).

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 4.2 apresenta as características gerais do pincel corona, como: o instante em que se iniciou a partir do surgimento do líder; altura que se iniciou em relação a origem do líder, seu comprimento e a velocidade do líder.

Tabela 4.2 - Características analisados do pincel corona para os líderes descendentes, ascendentes e conectivos.

Tipo de líder	**Tempo de início (ms)**	**Altura de início (m)**	**Comprimento [min-máx] (m)**	**Velocidade do líder (m/s)**
Ascendente	31,9*	711	11 - 26	$0,31.10^5$
	10,3	858	16 - 60	$0,8.10^5$
	3,8	70	5 - 19	$3,1.10^5$
	8,8	1347	22 - 58	$1,31.10^5$
	2,5	1078	76 - 112	$2,54.10^5$
	3,6	1212	37 - 131	$2,44.10^5$
Descendente	-	>162**	26 - 51	$3,1.10^5$
Conectivo	0,02	6,5	0,8 - 26	-
	0,2	9,6	3	$0,45.10^5$
	0,4	14,3	1,8 - 2,2	$8,6.10^5$

* Esse caso aparece difuso, o que pode ter acarretado nas análises.
** Não é possível visualizar no vídeo o início do relâmpago.

Em relação aos líderes ascendentes, podemos observar que o instante do início do pincel corona variou entre 2,5 ms a 31,9 ms, sendo esse último valor é muito discrepante em relação as outras medidas. Nesse caso específico o vídeo estava muito claro, o que pode ter afetado a estimativa do valor. Uma vez que estamos analisando as

medidas em duas dimensões, qualquer tortuosidade do canal pode afetar as medidas de forma significativa.

Ao analisar o comportamento da velocidade do líder observou-se uma semelhança, como mostra a Figura 4.10. Em cada gráfico destacamos que, a uma certa altura, quando inicia o pincel corona (representado por uma seta), a velocidade do líder ascendente diminui e parece oscilar menos em todo desenvolvimento do líder ascendente positivo.

Figura 4.10 - Comportamento da velocidade em 3 líderes ascendentes.

(a) Caso 28 de maio de 2008; (b) Caso 29 de dezembro de 2012; (c) Caso 1 de novembro de 2012
Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.10 mmostra o comportamento da velocidade de 3 líderes ascendentes. Em todos esses casos, a seta representa o início do pincel corona. Nota-se um comportamento semelhante nos gráficos. Quando o pincel corona se inicia, as velocidades dos líderes ascendentes parecem oscilar menos. Nota-se na Tabela 4.2 que o pincel corona surge quando o líder já avançou em média cerca de um quilômetro e está mais próximo à nuvem. Como a distância entre a ponta do líder e a nuvem está menor, o campo elétrico entre eles está maior. Sugere-se que o aumento do campo elétrico nessa área propicie um desenvolvimento do líder ascendente mais constante.

Um outro tópico interessante para se relatar foi a variação do comprimento do pincel corona. As Figuras 4.11a - f mostram o crescimento do comprimento do pincel corona ao decorrer do tempo para 6 casos de líderes ascendentes.

Figura 4.11 - Comportamento do crescimento do pincel corona em líderes ascendentes.

Fonte: Próprio autor.

A mesma análise foi realizada para os casos de líderes descendentes e ascendente conectivo que apresentou pincel corona, como mostra a Figura 4.12.

Figura 4.12 - Comportamento do comprimento do pincel corona em decorrer do tempo.

(a) líder descendente; (b) líder conectivo

Fonte: Próprio autor.

Em todos os tipos de líderes, observa-se um aumento do pincel corona com o decorrer do tempo (próximo ao solo ou próximo a nuvem). Uma possível explicação para esse aumento pode ser o aumento do campo elétrico na região do líder à medida que ele se desenvolve. Esse crescimento nunca havia sido relatado e estudado anteriormente.

Analisando com mais detalhes o desenvolvimento do pincel corona observou-se que, apesar de seu modo de propagação ser constante, em determinadas ocasiões ele

bifurca, como mostra a Figura 4.13.

Figura 4.13 - Exemplo de bifurcação do pincel corona.

Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.13 ilustra a bifurcação do pincel corona no processo de formação de um líder ascendente. Com essa bifurcação, alguns processos físicos podem acontecer: ramificação do líder positivo (Figura 4.14) ou formação de agulhas (ver seção 4.3). Também pode ocorrer a bifurcação do pincel corona e o líder prosseguir normalmente sem a presença de agulhas ou ramificação.

Figura 4.14 - Sequência de imagens ilustrando a bifurcação do pincel corona gerando uma bifurcação do líder ascendente.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.14 mostra que a bifurcação do pincel corona pode levar à ramificação do líder ascendente. Detalhando a formação desse canal, nota que após a ramificação do líder ascendente, ambos continuam a se propagar com a presença de pincel corona em suas extremidades.

Outro caso interessante ilustra que, antes da formação de um novo canal, parece haver uma desconexão do líder. A Figura 4.15 mostra essa situação.

Figura 4.15 - Sequência de imagens mostrando a formação de um novo canal, resultante ramificação do pincel corona.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.15c, nota-se uma desconexão do canal na bifurcação, antes da formação de uma nova ramificação. Nesse momento parece que o campo elétrico é tão intenso que consegue gerar uma nova ramificação do líder positivo. Quando esse campo elétrico é menos intenso, a bifurcação é malsucedida podendo gerar uma agulha, como é descrito a seguir.

4.3 Observação de agulhas em líderes ascendentes positivos

A Figura 4.16 mostra o fenômeno de agulhas (do inglês, *needles*) observadas com o auxílio de câmeras de alta velocidade. Nesta imagem, várias imagens foram superpostas para ilustrar como as agulhas se distribuem ao longo do canal criado por um líder positivo. A Figura 4.17 ilustra os detalhes da formação dessas agulhas.

A observação de agulhas em líderes ascendentes positivos nunca havia sido registrada. Recentemente Hare et al. (2019) e Pu e Cummer (2019) observaram a presença desse fenômeno em líderes positivos no interior de nuvem de tempestade.

Figura 4.16 - Fenômeno definido como agulhas observadas na propagação do líder ascendente.

Fonte: Warner et al. (2012).

Figura 4.17 - Sequência de imagens ilustrando a bifurcação do pincel corona gerando uma agulha no líder ascendente.

(a) Bifurcação do pincel corona; (b) agulha sendo gerada depois de um certo intervalo de tempo
Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.18, mostra a formação e evolução de uma agulha vista por câmera de alta velocidade. Nela observa-se que a bifurcação do pincel corona gerou uma agulha, que é consequência de uma bifurcação malsucedida na tentativa de ramificação de um novo canal no líder ascendente. Essas agulhas se formam com um certo ângulo em relação ao líder ascendente se estendendo para fora do canal do líder e são tão brilhantes quanto o líder positivo e muito mais brilhantes que o pincel corona.

Figura 4.18 - Formação e evolução de uma agulha.

Fonte: Saba et al. (2020).

Essas agulhas aparecem primeiramente após alguns milissegundos da bifurcação do pincel corona e pulsam a medida que o líder se propaga. A Figura 4.19 ilustra um exemplo onde aparecem diversas agulhas no mesmo líder ascendente.

Figura 4.19 - Agulhas ao longo do líder ascendente positivo.

(a) Nove agulhas em uma imagem integrada; (b) Líder ascendente antes da formação da agulha 3.
Fonte: Saba et al. (2020).

Nesse trabalho foram analisados mais de 170 vídeos de líderes ascendentes em busca dessas agulhas. Em apenas 3 casos foi possível visualizar esse fenômeno. Pode ser que as agulhas estejam sempre presentes, mas nem sempre visíveis.

Foram analisado vídeos de líderes ascendentes no Brasil e nos Estados Unidos, com as mesmas condições (câmeras de alta velocidade semelhantes e mesma distância da câmera em relação ao líder). Como as agulhas são muito brilhantes, acreditamos que elas realmente sejam raras.

Em relação ao comprimento, esses pulsos apresentam sempre o mesmo valor. Em apenas uma ocasião, um ramo de líder negativo se desenvolveu a partir dessas agulhas, depois de vários pulsos anteriores, conforme será detalhado mais adiante.

Na Figura 4.20 cada linha corresponde a uma das agulhas numeradas da Figura 4.19, exceto pela décima agulha, que não aparece na imagem. Observe que elas aparecem de maneira sequencial à medida que o líder positivo se propaga para cima a uma velocidade média de $4,2.10^4$ m/s. Em relação a ocorrência dos pulsos, algumas agulhas pulsaram 9 vezes, enquanto outras chegaram a 16 vezes. O interessante de se observar também é que o intervalo de tempo médio entre a divisão do pincel corona até o primeiro pulso da agulha é maior que o período médio dos pulsos subsequentes, como mostra a Figura 4.21.

Figura 4.20 - Ocorrência de agulhas durante a propagação do líder ascendente.

A letra "Y" no início de cada linha corresponde o momento em que o pincel corona bifurcou. Cada triângulo representa os pulsos da agulha. As linhas contínuas mostram o sequenciamento temporal aparente que pode estar ocorrendo.

Fonte: Saba et al. (2020).

Figura 4.21 - Média dos períodos dos pulsos das agulhas.

Fonte: Próprio autor.

Uma possível explicação para as agulhas não surgirem imediatamente após uma ramificação malsucedida do líder é que são necessárias certas condições para que ela

ocorra. Uma possível condição seria a diferença de potencial mínima entre extremidade da ponta do líder e a localização de uma agulha que é alcançada somente após uma propagação adicional do líder. A distância observada entre a extremidade da ponta do líder ascendente até o local da primeira agulha pode ser da ordem de centenas de metros. À medida que o líder ascendente vai se desenvolvendo, sua ponta fica cada vez mais distante das primeiras agulhas e, assim, as agulhas mais distantes tendem a demorar mais para pulsar. Essa hipótese pode ser observada na Figura **??**. Essa observação também foi descrita por Pu e Cummer (2019), onde os autores não apontam qual o motivo desse comportamento, mas acreditam que esteja ligado ao alongamento do líder e ao número crescente de agulhas. Caso seja necessária uma diferença de potencial mínima entre a extremidade da ponta do líder e cada agulha para que um pulso ocorra, esse processo poderá levar um tempo cada vez maior para ser alcançado com o aumento da distância entre eles.

Alguns autores, como Hare et al. (2019), Williams e Montanya (2019) afirmam que seria valioso estabelecer a conexão entre a formação de agulhas e o desenvolvimento de líderes de recuo no líder positivo. Como neste trabalho os fenômenos são observados com câmera de alta velocidade, os líderes de recuo podem ser visualizados com facilidade. No entanto, esses líderes de recuo nunca ocorreram associados ao surgimento das agulhas. Nos casos analisados, os líderes de recuo aparece apenas 121 ms após o último pulso da agulha.

Para estudar as características ópticas dessas agulhas, analisamos os 3 casos onde aparecem esse fenômeno. A Tabela 4.3 apresenta algumas características das câmeras (localização e configurações) e das agulhas observadas. Em todos os casos as agulhas foram geradas na formação de líder ascendentes a partir de torres altas. O caso 3 teve líderes ascendentes simultâneos, sendo divididos em casos distintos, denominados 3a e 3b.

Tabela 4.3 - Características gerais dos casos analisados.

Características gerais	**Caso 1**	**Caso 2**	**Caso 3a**	**Caso 3b**
Data de ocorrência do líder ascendente	24 Maio 2010 07:31:50	29 Maio 2008 22:38:51	30 Agosto 2011 04:19:24	
Distância até a câmera (km)	4,6	4,8	0,88	0,66
Resolução da imagem (metros/pixel)	4,63	3,76	1,80	2,51
Taxa de quados da câmera de alta velocidade (imagens por Segundo)	9,00	7,207	10,000	
Número de agulhas	11	10	4	4
Intervalo de tempo desde o início do líder até a primeira agulha	11,7	31,1	7,0	17,7
Distância da ponta do líder positive à primeira agulha (m)	205	435	80	64
Altura da primeira agulha (m)	1056	900	260	582
Altura da última agulha (m)	1752	1196	564	726
Distância 2D entre a primeira e última agulha (m)	802	673	307	133
Velocidade média 2D do líder durante a ocorrência das agulhas ($x10^4 m.s^{-1}$)	4,2	8,7	3,0	1,9
Presença de líderes de recuo durante a ocorrência de agulhas	121 ms depois da última agulha	Ausente	Ausente	Ausente

A Tabela 4.4 contém alguns parâmetros estatísticos das agulhas para cada um dos casos de líderes ascendentes analisados.

Tabela 4.4 - Características encontradas sobre as agulhas

	Bifurcação do pincel corona até o primeiro pulso da agulha (ms)				**Período de ocorrência (ms)**				**Comprimento da agulha em 2D (m)**				**Distância entre as agulhas (m)**			
Caso	**N**	**Min**	**Max**	**AM**	**N**	**Min**	**Max**	**AM**	**N**	**Min**	**Max**	**AM**	**N**	**Min**	**Max**	**AM**
1	11	2.5	7.4	4.1	126	0.6	6.0	2.1	11	4.6	23.2	13.8	10	18	182	80
2	10	3.0	25.0	11.2	63	0.7	33.7	3.7	8	3.8	73.0	17.7	9	20	128	75
3a	4	0.9	3.5	2.0	13	0.3	2.9	1.1	4	2.5	10.2	5.9	3	20	189	58
3b	4	2.8	5.3	3.9	30	0.8	9.8	2.9	4	2.5	28.1	16.9	3	16	110	52
Total	**29**	**0.9**	**25.0**	**6.1**	**232**	**0.3**	**33.7**	**2.6**	**27**	**2.3**	**73.0**	**14.3**	**25**	**16**	**189**	**78**

Diferentemente do que foi relatado pelos autores Hare et al. (2019), o tamanho médio e o intervalo de tempo oscilante das agulhas são consideravelmente menores. Isso pode ser devido ao campo elétrico ambiente diferente em que as agulhas ocorreram. No trabalho Hare et al. (2019) e Pu e Cummer (2019), todos ocorreram durante a propagação de líderes ascendentes a uma altura de 5 a 7 km. Nesse trabalho as agulhas foram observadas entre 0,3 e 1,9 km de altura.

Portanto, pelo fato das agulhas, a princípio, não estarem associadas nem à iniciação e nem à presença de líderes de recuo sugere que elas não são um elemento chave que contribui para a presença de uma descarga subsequente em líderes descendentes negativos. No entanto, conforme relatado por Pu e Cummer (2019), uma agulha deu início a um líder negativo e, em função disso, é possível que as agulhas levem à ramificação de líderes de polaridade oposta.

Essa ramificação negativa durante a propagação do líder ascendente, ocorreu em 29 de maio de 2008, nas observações de Rapid City, Estados Unidos. Esse líder negativo surgiu após a agulha pulsar 11 vezes. Passados 29,5 ms após a tentativa de ramificação e 20,5 ms após o primeiro pulso. Esse líder negativo exibiu mudanças direcionais e passos típicos de líderes negativos, quando observados por câmeras de alta velocidade (WARNER et al., 2016).Esse líder negativo ramificou-se uma vez antes de decair 4 ms após seu início. A sequência de imagens da Figura 4.22 mostra o desenvolvimento desse líder.

Figura 4.22 - Sequência de imagens mostrando o desenvolvimento de um líder negativo a partir de uma agulha.

Fonte: Próprio autor.

Esta é a única observação óptica obtida de um líder negativo se iniciando a partir de uma agulha, mas serve para confirmar a hipótese deste trabalho, conforme o trabalho de Pu e Cummer (2019). Claramente são necessárias mais observações e pesquisas sobre os detalhes do fenômeno.

Outro caso interessante sobre as agulhas diz respeito a propagação de um líder positivo que deu início a uma ramificação negativa durante seu processo de formação, conforme observado na sequência de imagens da Figura 4.23.

Figura 4.23 - Propagação de líder positivo contendo ramificação negativa.

Fonte: Próprio autor.

A primeira imagem da Figura 4.23 mostra uma ramificação negativa surgindo a partir do líder positivo. É possível observar na segunda imagem um líder positivo se desenvolvendo em direção a ramificação negativa que está em desenvolvimento (terceira imagem). A conexão entre esses dois líderes de polaridades opostas ocorre na quarta imagem da Figura 4.23, gerando uma intensificação do canal do líder positivo.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho estudou as características físicas dos líderes positivos observados através de câmeras de alta velocidade. Os resultados deste estudo tem implicações diretas no conhecimento sobre os captores de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDAs) e na física dos relâmpagos, particularmente, nos processos de ramificação presente nos líderes e na multiplicidade dos relâmpagos negativos. A pesquisa foi baseada na análise de 3 tipos de líderes positivos: conectivos, que surgem como consequência da aproximação de um líder descendente negativo, ascendentes e descendentes. Neste trabalho, realizou-se a primeira observação de líderes conectivos em edifícios comuns (abaixo de 60 metros de altura) utilizando câmeras de alta velocidade. Ao todo foram registrados 6 líderes conectivos a partir dos edifícios instrumentados e 8 líderes não conectivos, aqueles que falharam na conexão com o líder descendente negativo nos edifícios instrumentados. Além desses registros, foram observados 21 líderes conectivos em outros edifícios comuns e torres de celulares, com alturas entre 36 a 60 metros.

Mediante a análise da velocidade, da aceleração e do comprimento desses líderes, conclui-se que:

1. Em média, os líderes conectivos e não conectivos positivos possuem uma velocidade de propagação constante, exceto microssegundos antes da conexão com o líder descendente negativo;

2. Há fortes evidências de que o líder conectivo acelera drasticamente em direção do líder descendente no processo de conexão;

3. Em relação ao seu comprimento, constatou-se que os líderes conectivos possuem uma boa relação com a altura da estrutura de onde se iniciam. Ou seja, o comprimento do líder conectivo equivale à altura da estrutura de onde se iniciou.

A observação e análise desses líderes conectivos estão fortemente ligados ao estudo dos SPDAs. A eficiência de um SPDA depende diretamente da distância de atração, ou seja, da distância a partir da qual os captores percebem a presença do líder descendente e iniciam o líder conectivo. A distância de atração, por sua vez, está relacionada com o valor de pico de corrente elétrica da descarga de retorno resultante da conexão, conforme a expressão $R_s = a.I^b$, sendo **a** e **b** constantes. Diversos autores propuseram valores para essas constantes, mas se basearam em dados empíricos

e simulações de laboratório. No presente estudo, com o uso de câmeras de alta velocidade, foi possível determinar diversas distâncias de atração e relacioná-las com os respectivos valores de picos de corrente da descarga de retorno com base nos dados dos sistemas de detecção de relâmpagos e dos sensores de campo elétrico. A partir dos resultados encontrados para os casos reais, conclui-se que, embora exista uma pequena variação, os valores das constantes **a** e **b** se assemelham aos valores normalmente utilizados nos projetos de SPDAs.

A observação dos líderes positivos utilizando câmeras de alta velocidade permitiu registrar, em alguns casos, a presença de pincel corona na frente da extremidade desses líderes. Conseguiu-se verificar pela primeira vez as características do pincel corona no processo de desenvolvimento dos três tipos de líderes positivos: ascendentes, descendentes e conectivos. As principais contribuições derivadas dessas análises foram:

1. O comprimento do pincel corona aumenta conforme os líderes avançam e se aproximam do local de impacto (no caso dos líderes descendentes), ou se aproximam do líder descendente negativo (no caso dos líderes conectivos) ou da nuvem (no caso dos líderes ascendentes).

2. Foi observado que em todos os casos o pincel corona se propaga de forma constante, sem pulsos.

3. Notou-se que quando há presença do pincel corona, a velocidade dos líderes ascendentes parece oscilar com menor frequência.

4. Observou-se que em determinados momentos o pincel corona se bifurca podendo gerar uma ramificação no canal do líder ou, no caso de uma ramificação não acontecer, gerar "agulhas" (do inglês, *needles*).

Com relação ao estudo das agulhas, conclui-se que:

1. Elas podem ser vistas por câmeras de alta velocidade em líderes ascendentes positivos e se formam a partir de ramificações malsucedidas do pincel corona;

2. São tão brilhantes quanto o líder ascendente positivo e muito mais brilhantes que o pincel corona presente na ponta do líder positivo;

3. Não aparecem imediatamente após uma tentativa mal sucedida de ramificação, mas somente após um certo tempo de propagação do líder;

4. As agulhas vizinhas não pulsam simultaneamente. Algumas vezes elas piscam de maneira sequencial ao longo do líder positivo;

5. Nenhuma evidência óptica de desconexão foi encontrada no líder positivo;

6. Os líderes de recuo não ocorrem durante o aparecimento das agulhas, mas passado algum tempo da ocorrência de agulhas;

7. Ao contrário do que foi publicado recentemente por Hare et al. (2019), as agulhas provavelmente não estão associadas à presença de múltiplas descargas em relâmpagos negativos.

6 TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados deste trabalho, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros:

1. Medir as correntes dos LACs e LANCs em conjunto com as observações de imagens de câmeras de alta velocidade;
2. Realizar um estudo em 3D da propagação dos líderes;
3. Utilizar câmeras com maior resolução temporal que possibilite investigar com mais detalhes o fenômeno do salto final da conexão;
4. Medir as correntes elétricas do líder positivo ascendente durante o aparecimento das agulhas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIT-AMAR, S.; BERGER, G. Lightning interception on elevated building. In: CITESEER. **Proc. of 5th WSEAS Int. Conf. on Power Systems & EMC**. [S.l.], 2005. p. 17–23. 47

APPLETON, E. V.; CHAPMAN, F. On the nature of atmospherics—iv. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A-Mathematical and Physical Sciences**, The Royal Society London, v. 158, n. 893, p. 1–22, 1937. 1

BALLAROTTI, M. G. Redesenvolvimento do líder positivo no relâmpago. 2005. 9

BALLAROTTI, M. G.; MEDEIROS, C.; SABA, M. M.; SCHULZ, W.; JR, O. P. Frequency distributions of some parameters of negative downward lightning flashes based on accurate-stroke-count studies. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 117, n. D6, 2012. 2

BAZELYAN, É.; GORIN, B.; LEVITOV, V. **Physical and Engineering Fundamentals of Protection against Lightning**. [S.l.]: Gidrometeoizdat, Leningrad, 1978. 13

BECERRA, M.; COORAY, V. Time dependent evaluation of the lightning upward connecting leader inception. **Journal of Physics D: Applied Physics**, IOP Publishing, v. 39, n. 21, p. 4695, 2006. 49

BERGER, K. Parameters of lightning flashes. **Electra**, v. 41, p. 23–37, 1975. 12, 13

BERGER, K.; VOGELSANGER, E. New results of lightning observations. **Planetary Electrodynamics**, Gordon and Breach New York, v. 1, n. S 489, 1969. 13

BOYS, C. Progressive lightning. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 124, n. 3115, p. 54–55, 1929. 1

BOYS, C. V. **Progressive lightning**. [S.l.]: Nature Publishing Group, 1926. 1

CAMPOS, L. Z.; SABA, M. M.; WARNER, T. A.; JR, O. P.; KRIDER, E. P.; ORVILLE, R. E. High-speed video observations of natural cloud-to-ground lightning leaders–a statistical analysis. **Atmospheric research**, Elsevier, v. 135, p. 285–305, 2014. 2, 13

COORAY, V.; BECERRA, M. Attractive radii of vertical and horizontal conductors evaluated using a self consistent leader inception and propagation model—slim. **Atmospheric research**, Elsevier, v. 117, p. 64–70, 2012. 11, 52

COORAY, V.; KUMAR, U.; RACHIDI, F.; NUCCI, C. A. On the possible variation of the lightning striking distance as assumed in the iec lightning protection standard as a function of structure height. **Electric power systems research**, Elsevier, v. 113, p. 79–87, 2014. 11, 52

DELLERA, L.; GARBAGNATI, E. Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. i. description of the model and evaluation of exposure of free-standing structures. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 5, n. 4, p. 2009–2022, 1990. 47

_____. Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. ii. exposure and shielding failure evaluation of overhead lines with assessment of application graphs. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 5, n. 4, p. 2023–2029, 1990. 47

DIBNER, B. Benjamin franklin. In: **Lightning: Physics of Lightning, Volume 1 & 2**. [S.l.: s.n.], 1977. p. 23. 1

DWYER, J. R.; UMAN, M. A. The physics of lightning. **Physics Reports**, Elsevier, v. 534, n. 4, p. 147–241, 2014. 10

ERIKSSON, A. An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 2, n. 3, p. 871–886, 1987. 47

_____. The incidence of lightning strikes to power lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 2, n. 3, p. 859–870, 1987. 47

FERRO, M.; SABA, M.; JR, O. P. Continuing current in multiple channel cloud-to-ground lightning. **Atmospheric research**, Elsevier, v. 91, n. 2-4, p. 399–403, 2009. 2

FLACHE, D.; RAKOV, V. A.; HEIDLER, F.; ZISCHANK, W.; THOTTAPPILLIL, R. Initial-stage pulses in upward lightning: Leader/return stroke versus m-component mode of charge transfer to ground. **Geophysical Research Letters**, Wiley Online Library, v. 35, n. 13, 2008. 16

FRANKLIN, B. Experiments and observations on electricity made at philadelphia. **London E Cave**, 1774. 1

GAO, Y.; LU, W.; MA, Y.; CHEN, L.; ZHANG, Y.; YAN, X.; ZHANG, Y. Three-dimensional propagation characteristics of the upward connecting leaders in six negative tall-object flashes in guangzhou. **Atmospheric research**, Elsevier, v. 149, p. 193–203, 2014. 10

GOLDE, R. H. Lightning protection. **Edward Arnold(Publishers) Ltd., 25 Hill St., London W 1 X 8 LL. 1973. 220 p(Book).**, 1973. 11, 51, 52

GOOGLE MAPS. **Imagem da localização do sensor do campo elétrico (USP) em relação aos pontos de observação de relâmpagos.** 2020. São Paulo. 1 imagem de satélite. Acesso em: 20 jun. 2020. 29

HARE, B.; SCHOLTEN, O.; DWYER, J.; TRINH, T.; BUITINK, S.; VEEN, S. T.; BONARDI, A.; CORSTANJE, A.; FALCKE, H.; HÖRANDEL, J. et al. Needle-like structures discovered on positively charged lightning branches. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 568, n. 7752, p. 360–363, 2019. 4, 18, 19, 63, 67, 69, 75

HEIDLER, F. H.; MANHARDT, M.; STIMPER, K. The slow-varying electric field of negative upward lightning initiated by the peissenberg tower, germany. **IEEE transactions on electromagnetic compatibility**, IEEE, v. 55, n. 2, p. 353–361, 2012. 16

HILL, J.; UMAN, M.; JORDAN, D.; NGIN, T.; GAMEROTA, W.; PILKEY, J.; CAICEDO, J. The attachment process of rocket-triggered lightning dart-stepped leaders. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 121, n. 2, p. 853–871, 2016. 46

IDONE, V. The luminous development of florida triggered lightning. **Res. Lett. Atmos. Electr.**, v. 12, p. 23–28, 1992. 14

IRIBARNE, J. V.; CHO, H.-R. Atmospheric physics. **Nature**, Springer, v. 284, n. 5751, p. 88–88, 1980. 1

JERAULD, J.; UMAN, M.; RAKOV, V.; RAMBO, K.; SCHNETZER, G. Insights into the ground attachment process of natural lightning gained from an unusual triggered-lightning stroke. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 112, n. D13, 2007. 46

KITAGAWA, N.; BROOK, M.; WORKMAN, E. Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges. **Journal of Geophysical Research**, Wiley Online Library, v. 67, n. 2, p. 637–647, 1962. 9

KRIDER, E. P. **Lightning rods in the 18th century**. [S.l.: s.n.], 1996. 1, 26

LOVE, E. R. Improvement on lightning stroke modelling and applications to design of ehv and uhv transmission lines. **M. Sc. Theses, University of Colorado**, 1973. 53, 54

LU, W.; CHEN, L.; MA, Y.; RAKOV, V.; GAO, Y.; ZHANG, Y.; YIN, Q.; ZHANG, Y. Lightning attachment process involving connection of the downward negative leader to the lateral surface of the upward connecting leader. **Geophysical Research Letters**, Wiley Online Library, v. 40, n. 20, p. 5531–5535, 2013. 10, 12, 47

LU, W.; GAO, Y.; CHEN, L.; QI, Q.; MA, Y.; ZHANG, Y.; CHEN, S.; YAN, X.; CHEN, C.; ZHANG, Y. Three-dimensional propagation characteristics of the leaders in the attachment process of a downward negative lightning flash. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Elsevier, v. 136, p. 23–30, 2015. 12

MALAN, D. Appareal de grand rendement pour la chronophotographie des éclairs. **Rev. Opt**, v. 29, p. 513–523, 1950. 1

MAZUR, V.; RUHNKE, L. H. Physical processes during development of upward leaders from tall structures. **Journal of Electrostatics**, Elsevier, v. 69, n. 2, p. 97–110, 2011. 16, 17

MAZUR, V.; RUHNKE, L. H.; WARNER, T. A.; ORVILLE, R. E. Recoil leader formation and development. **Journal of Electrostatics**, Elsevier, v. 71, n. 4, p. 763–768, 2013. 9

MCEACHRON, K. Lightning to the empire state building. **Journal of the Franklin Institute**, Elsevier, v. 227, n. 2, p. 149–217, 1939. 16

MIKI, M.; RAKOV, V.; SHINDO, T.; DIENDORFER, G.; MAIR, M.; HEIDLER, F.; ZISCHANK, W.; UMAN, M.; THOTTAPPILLIL, R.; WANG, D. Initial stage in lightning initiated from tall objects and in rocket-triggered lightning. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 110, n. D2, 2005. 16

NACCARATO, K.; SARAIVA, A.; SABA, M.; SCHUMANN, C.; JR, O. P. First performance analysis of brasildat total lightning network in southeastern brazil. In: **International Conference On Grounding And Earthing (GROUND'2012), Bonito, Brazil**. [S.l.: s.n.], 2012. 26, 39

NACCARATO, K. P. Estudo de relâmpagos no brasil com base na análise de desempenho do sistema de localização de tempestades. **São José dos Campos**, 2001. 7

_____. Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do brasil. **São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)**, 2005. 13

NAG, A.; MURPHY, M. J.; CUMMINS, K. L.; PIFER, A. E.; CRAMER, J. A. Recent evolution of the us national lightning detection network. In: **23rd International Lightning Detection Conference & 5th International Lightning Meteorology Conference**. [S.l.: s.n.], 2014. 26

OGAWA, T. Lightning currents. **Handbook of atmospheric electrodynamics**, CRC Press Boca Raton, Fla., v. 1, p. 93–136, 1995. 5

ORVILLE, R. E.; HUFFINES, G.; NIELSEN-GAMMON, J.; ZHANG, R.; ELY, B.; STEIGER, S.; PHILLIPS, S.; ALLEN, S.; READ, W. Enhancement of cloud-to-ground lightning over houston, texas. **Geophysical Research Letters**, Wiley Online Library, v. 28, n. 13, p. 2597–2600, 2001. 13

PAIVA, A. R. Estudo das descargas de retorno e componentes m e sua detecção por sistemas de localização de relâmpagos. **INPE, São José dos Campos**, 2015. 6, 16, 18

PAIVA, A. R. de; SABA, M. M.; NACCARATO, K. P.; SCHUMANN, C.; JAQUES, R.; FERRO, M. A. da S.; WARNER, T. A. Detection of upward lightning by lightning location systems. In: IEEE. **2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)**. [S.l.], 2014. p. 1824–1826. 1, 16

PARKER, S. P. **Encyclopedia of science and technology**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1997. 5

PHANTOM. **Ultrahigh-Speed**. 2018. [Online; Acesso em: 12 fev. 2018]. Disponível em: <https://www.phantomhighspeed.com/products/cameras/ultrahighspeed>. 24

PINTO, I.; PINTO, O. Cloud-to-ground lightning distribution in brazil. **Journal of Atmospheric and solar-terrestrial physics**, Elsevier, v. 65, n. 6, p. 733–737, 2003. 1

PINTO, O. **A arte da guerra contra os raios**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2005. 2

PINTO, P. J.; PINTO, I. R. C. de A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. [S.l.]: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. 6

PRINZ, H. Lightning in history. In: **Lightning: Physics of Lightning, Volume 1 & 2**. [S.l.: s.n.], 1977. p. 1. 1

PU, Y.; CUMMER, S. A. Needles and lightning leader dynamics imaged with 100–200 mhz broadband vhf interferometry. **Geophysical Research Letters**, Wiley Online Library, v. 46, n. 22, p. 13556–13563, 2019. 63, 67, 69, 70

RAKOV, V. A review of positive and bipolar lightning discharges. **Bulletin of the American Meteorological Society**, American Meteorological Society, v. 84, n. 6, p. 767–776, 2003. 5

RAKOV, V.; LUTZ, A. A new technique for estimating equivalent attractive radius for downward lightning flashes. In: **Proc. 20th Intl. Conf. on Lightning Protection**. [S.l.: s.n.], 1990. p. 1–2. 51

RAKOV, V. A. **Fundamentals of lightning**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2016. 7, 12

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: physics and effects**. [S.l.]: Cambridge university press, 2003. 5, 13

RINDAT. **Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas**. 2015. [Online; Acesso em: 19 jun. 2016]. Disponível em: <http://simepar.br/rindat/internas/institucional.shtml>. 26

RIZK, F. A. **Modeling of transmission line: exposure to direct lightning strokes. IEEE Transactions on Power Delivery**. [S.l.]: Canada, 1990. 172-193 p. 47

_____. **Modeling of Lightning Incidence to Tall Structure Part I: IEEE Trans. on Power Delivery**. [S.l.]: Canada, 1994. 1983-1989 p. 47

SABA, M.; BALLAROTTI, M.; JR, O. P. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 111, n. D3, 2006. 2

SABA, M.; NACCARATO, K. P.; AMANDA, R.; COORAY, V.; HETTIARACHCHI, P.; PIANTINI, A.; FERRO, M.; CUSTÓDIO, D. M.;

DIENDORFER, G.; SILVA, J. The study of lightning strikes to common buildings in brazil. In: **The 33rd International Conference on Lightning Protection, 25–30 September, Estoril, Portugal**. [S.l.: s.n.], 2016. 2

SABA, M.; PAIVA, A.; SCHUMANN, C.; FERRO, M.; NACCARATO, K.; SILVA, J.; SIQUEIRA, F.; CUSTÓDIO, D. Lightning attachment process to common buildings. **Geophysical Research Letters**, Wiley Online Library, v. 44, n. 9, p. 4368–4375, 2017. 44, 46

SABA, M.; SCHUMANN, C.; WARNER, T.; FERRO, M.; ORVILLE, R. Positive cloud-to-ground flashes and the initiation of upward lightning. In: **4th International Symposium on winter ligthning**. [S.l.: s.n.], 2017. 2

SABA, M. M. A física das tempestades e dos raios. **Física na Escola**, v. 2, n. 1, p. 19–22, 2001. 5

SABA, M. M.; ALVES, J.; SCHUMANN, C.; CAMPOS, D.; WARNER, T. A. Upward lightning in brazil. In: **22nd International Lightning Detection Conference, Apr**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 2–5. 16

SABA, M. M.; BALLAROTTI, M. G.; CAMPOS, L. Z.; PINTO, O. et al. High-speed video observations of positive lightning. Citeseer, 2007. 13

SABA, M. M.; CAMPOS, L. Z.; KRIDER, E. P.; JR, O. P. High-speed video observations of positive ground flashes produced by intracloud lightning. **Geophysical research letters**, Wiley Online Library, v. 36, n. 12, 2009. 2

SABA, M. M.; FERRO, M. A.; CUADROS, E. T.; CUSTODIO, D. M.; NAG, A.; SCHUMANN, C.; COORAY, G. V.; PAIVA, A.; LAURIA, P. B.; MEDEIROS, D. et al. High-speed video observation of a lightning flash producing x-rays. **AGUFM**, v. 2019, p. AE33A–3117, 2019. 2

SABA, M. M.; PAIVA, A. R. de; CONCOLLATO, L. C.; WARNER, T. A.; SCHUMANN, C. Optical observation of needles in upward lightning flashes. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group, v. 10, n. 1, p. 1–6, 2020. 64, 65, 66

SABA, M. M.; SCHULZ, W.; CAMPOS, L. Z. M components or cloud-to-ground subsequent strokes? In: **21st International Lightning Detection Conference**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 19–20. 13

SABA, M. M.; SCHUMANN, C.; WARNER, T. A.; FERRO, M. A. S.; PAIVA, A. R. de; JR, J. H.; ORVILLE, R. E. Upward lightning flashes characteristics from

high-speed videos. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 121, n. 14, p. 8493–8505, 2016. 2, 17

SALANAVE, L. E. **Lightning and Its Spectrum: An atlas of photographs**. [S.l.]: University of Arizona Press, 1980. 5

SARAIVA, A.; SABA, M.; JR, O. P.; CUMMINS, K.; KRIDER, E.; CAMPOS, L. A comparative study of negative cloud-to-ground lightning characteristics in são paulo (brazil) and arizona (united states) based on high-speed video observations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 115, n. D11, 2010. 2

SCHONLAND, B. et al. **The lightning discharge. Handbuch der physic, vol. 22**. [S.l.]: Springer-Verlag, Berlin, 1956. 1

SCHULZ, W.; CUMMINS, K.; DIENDORFER, G.; DORNINGER, M. Cloud-to-ground lightning in austria: A 10-year study using data from a lightning location system. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 110, n. D9, 2005. 13

SCHUMANN, C. **Caracterização dos raios positivos através de câmeras de alta velocidade e sensores de campo elétrico**. 98 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP, 2012. 30

SCHUMANN, C. **Estudo dos raios ascendentes a partir de observações de câmeras de alta resolução temporal e de medidas de campo elétrico**. 152 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP, 2016. 2, 8, 16, 24

SCHUMANN, C.; MARCELO, M.; PAIVA, A. D.; FERRO, M.; WARNER, T. High-speed observation of upward lightning flashes in brazil. In: **International Lightning Detection Conference (ILDC)**. [S.l.: s.n.], 2014. 17

SCHUMANN, C.; SABA, M.; CAMPOS, L.; SILVA, R.; SCHULZ, W. Leader characteristics in positive cloud-to-ground lightning flashes. In: **Int. Symp. Winter Light.** [S.l.: s.n.], 2011. p. 59–62. 2

SCHUMANN, C.; SABA, M. M.; WARNER, T. A.; FERRO, M. A.; HELSDON, J. H.; THOMAS, R.; ORVILLE, R. E. on the triggering mechanisms of upward

lightning. **Scientific reports**, Nature Publishing Group, v. 9, n. 1, p. 1–9, 2019. 2, 17

SCHUMANN, C.; SABA, M. M. F.; SILVA, R. B. G. D.; SCHULZ, W. Electric fields changes produced by positives cloud-to-ground lightning flashes. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Elsevier, v. 92, p. 37–42, 2013. 1

SHINDO, T.; UMAN, M. Continuing current in negative cloud-to-ground lightning. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 94, n. D4, p. 5189–5198, 1989. 9

TAKAGI, N.; WANG, D.; WATANABE, T. A study of upward positive leaders based on simultaneous observation of e-fields and high-speed images. **IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials**, The Institute of Electrical Engineers of Japan, v. 126, n. 4, p. 256–259, 2006. 16

UMAN, M. Lightning, 264 pp. **McGraw-Hill, New York. Uman, MA, and DK McLain (1969), Magnetic field of lightning return stroke, J. Geophys. Res**, v. 74, n. 28, p. 6899–6910, 1969. 1

_____. The lightning discharge. int. **Geophysics Ser**, v. 39, p. 137, 1987. 6, 9, 26

VIEMEISTER, P. E. **The lightning book**. [S.l.]: The MIT Press, 1961. 1

VISACRO, S.; GUIMARAES, M.; VALE, M. H. M. Features of upward positive leaders initiated from towers in natural cloud-to-ground lightning based on simultaneous high-speed videos, measured currents, and electric fields. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 122, n. 23, p. 12–786, 2017. 1, 53

VISACRO, S.; GUIMARAES, M.; VALE, M. M. Striking distance determined from videos of high-speed camera and simultaneous records of current of lightning strikes to a grounded structure. In: **33rd Int. Conf. on Lightning Protection: ICLP 2016**. [S.l.: s.n.], 2016. 4, 12

WACKER, R. S.; ORVILLE, R. E. Changes in measured lightning flash count and return stroke peak current after the 1994 us national lightning detection network upgrade: 1. observations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 104, n. D2, p. 2151–2157, 1999. 26

WANG, D.; GAMEROTA, W.; UMAN, M.; TAKAGI, N.; HILL, J.; PILKEY, J.; NGIN, T.; JORDAN, D.; MALLICK, S.; RAKOV, V. Lightning attachment

processes of an “anomalous” triggered lightning discharge. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 119, n. 3, p. 1524–1533, 2014. 46

WANG, D.; RAKOV, V.; UMAN, M.; TAKAGI, N.; WATANABE, T.; CRAWFORD, D.; RAMBO, K.; SCHNETZER, G.; FISHER, R.; KAWASAKI, Z.-I. Attachment process in rocket-triggered lightning strokes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 104, n. D2, p. 2143–2150, 1999. 12, 46

WANG, D.; TAKAGI, N.; GAMEROTA, W.; UMAN, M.; HILL, J.; JORDAN, D. Initiation processes of return strokes in rocket-triggered lightning. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 118, n. 17, p. 9880–9888, 2013. 46

WANG, D.; TAKAGI, N.; TAKAKI, Y. A comparison between self-triggered and other-triggered upward lightning discharges. In: IEEE. **2010 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP)**. [S.l.], 2010. p. 1–4. 17

WANG, D.; TAKAGI, N.; WATANABE, T.; SAKURANO, H.; HASHIMOTO, M. Observed characteristics of upward leaders that are initiated from a windmill and its lightning protection tower. **Geophysical research letters**, Wiley Online Library, v. 35, n. 2, 2008. 16

WARNER, T. A. Upward leader development from tall towers in response to downward stepped leaders. In: IEEE. **2010 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP)**. [S.l.], 2010. p. 1–4. 22

WARNER, T. A.; CUMMINS, K. L.; ORVILLE, R. E. Upward lightning observations from towers in rapid city, south dakota and comparison with national lightning detection network data, 2004–2010. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 117, n. D19, 2012. 14, 17, 22, 63

WARNER, T. A.; SABA, M. M.; SCHUMANN, C.; JR, J. H. H.; ORVILLE, R. E. Observations of bidirectional lightning leader initiation and development near positive leader channels. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 121, n. 15, p. 9251–9260, 2016. 69

WILLIAMS, E.; MONTANYA, J. Atmospheric science a closer look at lightning. **Nature**, Macmillan Publishers Ltd., London, England, v. 568, n. 7752, p. 319–320, 2019. 67

YOKOYAMA, S.; MIYAKE, K.; SUZUKI, T.; KANAO, S. Winter lightning on japan sea coast-development of measuring system on progressing feature of lightning discharge. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 5, n. 3, p. 1418–1425, 1990. 12

ZHAO, X.; HE, J.; HE, H. Effect of branching on spikes of positive leader current. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, IEEE, v. 23, n. 4, p. 1–6, 2016. 4, 14, 15

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.