



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/05.24.13.08-TDI

ESTUDO DE LÍDERES ASCENDENTES INICIADOS NOS PARA-RAIOS EM RESPOSTA ÀS DESCARGAS DESCENDENTES NEGATIVAS

Paola Beatriz Lauria

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba, e Carina Schumann, aprovada em 17 de maio de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/44NRAE5>>

INPE
São José dos Campos
2021

PUBLICADO POR:

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

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

Presidente:

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

Membros:

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/05.24.13.08-TDI

ESTUDO DE LÍDERES ASCENDENTES INICIADOS NOS PARA-RAIOS EM RESPOSTA ÀS DESCARGAS DESCENDENTES NEGATIVAS

Paola Beatriz Lauria

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba, e Carina Schumann, aprovada em 17 de maio de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/44NRAE5>>

INPE
São José dos Campos
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Lauria, Paola Beatriz.

L374e Estudo de líderes ascendentes iniciados nos para-raios em resposta às descargas descendentes negativas / Paola Beatriz Lauria. – São José dos Campos : INPE, 2021.

xxiv + 134 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/05.24.13.08-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

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

1. Líder ascendente conectivo. 2. Câmera rápida. 3. Corrente elétrica. 4. Proteção. I.Título.

CDU 621.316.98



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

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



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE PAOLA BEATRIZ LAURIA BANCA Nº 095/2021, REG 138339/18

No dia 17 de maio de 2021, às 09h, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Geofísica Espacial / Ciências Atmosféricas. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca Examinadora e revisão final pelo(s) orientador(es).

Novo Título: "ESTUDO DE LÍDERES ASCENDENTES INICIADOS NOS PARARAIOS EM RESPOSTA ÀS DESCARGAS DESCENDENTES NEGATIVAS"

Eu, Alexandre Alvares Pimenta, como Presidente da Banca Examinadora, assino esta ATA em nome de todos os membros, com o consentimento dos mesmos.

Dr. Alexandre Alvares Pimenta - Presidente - INPE
Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba - Orientador - INPE
Dra. Carina Schumann - Orientador - University of the Witwatersrand
Dr. Eurico de Paula - Membro Interno - INPE
Dr. Marco Antônio da Silva Ferro - Membro Externo - IAE



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Alvares Pimenta, Pesquisador**, em 20/05/2021, às 17:45 (horário oficial de Brasília), com fundamento no art. 6º do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **7272114** e o código CRC **F7F248C0**.

“Tudo concorre para o bem daqueles que amam a Deus”.

Romanos 8,28

À minha querida mãe, que tanto admiro, dedico o resultado do esforço realizado ao longo deste percurso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que por sua graça permitiu todas as conquistas realizadas até hoje em minha vida.

A minha mãe Maria Elza, pela compreensão nos momentos em que eu precisava me concentrar e que mesmo em silêncio, fazia questão de estar ao meu lado. Você é a base da minha conquista.

Aos meus irmãos Artur, Diogo e Matheus, pelos conselhos, palavras de carinho e pelas palhaçadas. Obrigada pelo incentivo para que eu seguisse na pesquisa.

Agradeço ao Diogo Custodio, companheiro de todas as horas, que não mede esforços para me ajudar. Obrigada pelas intermináveis horas de reflexão sobre os processos físicos dos raios, pelos conselhos e todo suporte emocional.

Ao Dr. Ruy Morgado de Castro, eterno orientador. Obrigada pela amizade sincera, pelos ensinamentos e conselhos. Você é um exemplo para mim.

Aos professores do curso de Geofísica Espacial, por todo conhecimento compartilhado; em especial aos professores Alam Kherani, Delano Gobbi e Eurico de Paula por acreditarem na minha competência como futura cientista.

Aos amigos e companheiros de trabalho do INPE, em especial ao Benny “pescador” dos raios que possibilitaram a escrita desta dissertação. Ao querido colega de trabalho José Cláudio, pelos seus ensinamentos, seu tempo investido para sanar minhas dúvidas, pela paciência, atenção e por toda ajuda. Ao Dr. Marco Ferro professor e amigo, pela paciência e dedicação aos seus alunos.

Agradeço em especial e acima de tudo aos meus orientadores Dr. Marcelo Saba e Dra. Carina Schumann, é uma honra poder ser orientada por profissionais com tamanha competência, dedicação e conhecimento. Vibramos juntos a cada conquista; esses momentos foram valiosos para mim.

À CAPES pelo fundamental apoio financeiro.

RESUMO

As etapas de iniciação, desenvolvimento e propagação do raio são assuntos amplamente discutidos no meio científico. O processo de conexão de um raio com estruturas no solo é algo extremamente importante de se entender e não completamente conhecido. São poucos os estudos que se utilizam de câmeras, campo elétrico e corrente na observação do processo de conexão dos para-raios com os líderes de descargas descendentes negativas. A descarga de retorno (DR) é o resultado de uma conexão bem-sucedida entre o líder descendente e o líder ascendente conectivo (LAC). Caso o líder descendente não se conecte, o líder ascendente colapsa e, a carga presente em seu canal retorna ao local de origem num intervalo de poucos microssegundos. A ausência de informações relacionadas a esse processo físico deve-se, principalmente, à dificuldade de obtenção de registros. Enquanto a propagação do líder escalonado em direção ao solo dura em média 35 ms, um líder ascendente conectivo surge em menos de um milissegundo antes da DR. Este trabalho estudou dados de 3 eventos de Líderes Ascendentes não Conectivos (LANCs) e 1 evento de LAC. Os resultados encontrados abordam informações de amplitude e intervalo entre pulsos de corrente elétrica, colapso da corrente, carga transferida, sinal de campo elétrico, extensão e velocidade dos líderes ascendentes e densidade linear de cargas. O tratamento desses dados auxiliou no entendimento da interação entre estruturas no solo e líderes descendentes, abrindo caminhos para uma melhor compreensão no método de proteção de estruturas e conseqüentemente no resguardo de possíveis vítimas.

Palavras-chave: Líder ascendente conectivo. Câmera rápida. Corrente elétrica. Proteção.

STUDY OF UPWARD LEADERS INITIATED BY LIGHTNING RODS RESPONSE TO DOWNWARD NEGATIVE LEADERS

ABSTRACT

The stages of initiation, development and propagation of lightning are subjects widely discussed in the scientific community. The connecting process between downward leaders to structures in the ground is extremely important to understand but not completely known. There are few studies using cameras, electric field and current in the observation of the connection process between lightning rods and downward negative leaders. The return stroke is the result of a successful connection between downward leader and upward connecting leader (UCL). If the stepped leader does not connect, the upward connecting leader collapses, and the charge present in its channel returns to the place of origin within a microsecond interval. The absence of information related to this physical process is mainly due to the difficulty of obtaining records. While the propagation of the stepped leader lasts an average of 35 ms, an upward connecting leader lasts less than 1 ms. This work studied data from 3 Unconnected Upward Leader (UUL) events and 1 UCL event. The results found address information of amplitude and interval between pulses of electric current, current collapse, transferred charge, electric field signal, extension and speed of upward leaders and linear charge density. The treatment of these data helped to understand the interaction between structures on the ground and descendant leaders, opening paths for a better understanding of the method of protecting structures and, consequently, the protection of possible victims.

Keywords: Upward connecting leader. High speed camera. Electric current. Protection.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Nuvem da espécie Cumulonimbus.....	7
Figura 2.2 – Classificação dos raios e porcentagem de ocorrência.	8
Figura 2.3 – Processo de iniciação do líder bipolar bidirecional.....	9
Figura 2.4 – <i>Space leaders</i> vistos por meio de câmera rápida.	11
Figura 2.5 – Evolução do líder escalonado visto através de câmera rápida.	12
Figura 2.6 – Evolução do líder positivo visto por meio de câmera rápida.	14
Figura 2.7 – Intensificação do campo elétrico por estruturas no solo.	15
Figura 2.8 – Ilustração de LAC e LANC.....	16
Figura 2.9 – Registros de conexões de raios descendentes com presença de LANCs. ...	17
Figura 2.10 – Registro de tentativas de conexões em edifícios convencionais.	19
Figura 2.11 – Pulsos de LANC no condutor vertical.	20
Figura 2.12 – Pulsos de LAC e variação de campo elétrico para o evento B de Visacro.	21
Figura 2.13 – Evento C, gráfico de pulsos de corrente e quadros da câmera rápida.....	22
Figura 2.14 – Processo de iniciação do líder ascendente a partir da intensificação do campo produzida pelo líder escalonado.....	24
Figura 2.15 – Pulsos de LANC obtidos por Nag et al.	26
Figura 2.16 – Gráfico de amplitude dos pulsos de corrente relacionados ao período da fase de desenvolvimentos do eventos analisados por Nag et al.	26
Figura 2.17 – Pulso de corrente registrado para uma descarga de retorno seguido de uma componente M.	28
Figura 2.18 – Processo de desenvolvimento dos líderes de retorno.....	30
Figura 2.19 – Líderes de retorno retrazando o canal da descarga de retorno.	31
Figura 2.20 – Descargas múltiplas de um raio descendente negativo.	32
Figura 2.21 – Gráfico de estabilidade do canal.	33
Figura 2.22 – Raio intranuvem.	34
Figura 2.23 – Raio descendente negativo.	35
Figura 2.24 – Raio descendente positivo.....	35
Figura 2.25 – Raio ascendente.....	36

Figura 2.26 – Modelos de SPDA externos.	38
Figura 2.27 – Exemplo de ruptura no concreto por expansão da água acumulada nas fissuras.	38
Figura 2.28 – Ilustração dos três momentos nos quais a corrente do raio pode causar danos.	39
Figura 2.29 – Circuito de distribuição de energia danificado por raio.	42
Figura 2.30 – Derretimento de uma haste metálica pela corrente contínua.	42
Figura 2.31 – Mecanismos causadores de ferimentos em pessoas.	45
Figura 3.1 – Vista das câmeras rápidas instaladas.	46
Figura 3.2 – Conexões de raios descendentes nos edifícios convencionais, localizados em São Paulo.	47
Figura 3.3 – Representação da elevação do terreno onde os edifícios monitorados se encontram.	49
Figura 3.4 – Planta dos edifícios monitorados durante as campanhas.	50
Figura 3.5 – Localização dos prédios P1 P2 e suas distâncias em relação as câmeras. .	51
Figura 3.6 – Visada dos locais de observação 2 e 3.	51
Figura 3.7 – Câmeras de alta velocidade.	53
Figura 3.8 – Câmeras de alta velocidade direcionadas para o P1 P2.	53
Figura 3.9 – Antena de campo elétrico utilizada.	54
Figura 3.10 – Sistema de aquisição de campo elétrico.	55
Figura 3.11 – Sinal de campo elétrico produzido pela DR de um raio descendente.	56
Figura 3.12 – Sistema interno do transformador de corrente Pearson.	57
Figura 3.13 – Transformador de corrente da fabricante Pearson modelo 301X.	57
Figura 3.14 – Protetor de surto.	58
Figura 3.15 – Atenuadores e conversores de fibra óptica utilizados.	59
Figura 3.16 – Suporte utilizado para armazenar os equipamentos responsáveis pela transmissão de dados de corrente.	60
Figura 3.17 – Testes do suporte realizados na USP.	61
Figura 3.18 – Rack onde os computadores de armazenamento permaneceram alojados.	61
Figura 3.19 – Esquematização da transmissão e gravação dos dados com a utilização dos links de fibra óptica.	63

Figura 3.20 – Método por tempo de chegada TOA.....	65
Figura 4.1 – Registro da DR do caso A pela câmera em L2.	67
Figura 4.2 – Registro dos LANCs desenvolvidos no P1 e P2 pela câmera rápida localizada em L1.....	68
Figura 4.3 – Sinal de campo elétrico adquirido no caso A.....	68
Figura 4.4 – Associação entre os pulsos de corrente no P2, campo elétrico e quadros da câmera rápida para o caso A.....	69
Figura 4.5 – Quadros da câmera rápida associados aos pulsos de corrente do P2.....	71
Figura 4.6 – Relação entre pulsos de corrente e quantidade de carga transferida pelo canal do LANC no caso A.	72
Figura 4.7 – Gráfico da extensão e velocidade do canal do LANC no P2.....	72
Figura 4.8 – Imagem do momento em que o raio atinge o para-raios do P2, durante o caso B.	73
Figura 4.9 – Caso B líderes ascendentes.	74
Figura 4.10 – Sinal de campo elétrico adquirido no caso B.....	75
Figura 4.11 – Associação entre os pulsos de corrente, campo elétrico e quadros da câmera rápida para o caso B.....	75
Figura 4.12 – Quadros da câmera rápida V12 associados aos pulsos de corrente adquiridos pelo TC no P1 e P2.....	76
Figura 4.13 – Pulsos de corrente e quantidade de carga transferida pelo canal do LANC no P1 e LAC no P2.....	77
Figura 4.14 – Gráfico da extensão e velocidade do canal do LANC no P1 e LAC no P2.	78
Figura 4.15 – Registros da descarga de retorno do L3.	79
Figura 4.16 – Sinal de campo elétrico adquirido no caso C.....	80
Figura 4.17 – Associação entre os pulsos de corrente do P2, campo elétrico e quadros das câmeras rápidas para o caso C.....	80
Figura 4.18 – Quadros da câmera rápida associados aos pulsos de corrente adquiridos pelo TC no caso C.	81
Figura 4.19 – Carga elétrica transferida para o canal do LANC no Caso C.	81
Figura 4.20 – Gráfico da extensão e velocidade do canal do LANC no P2.....	82
Figura 5.1 – Gráfico do intervalo entre pulsos.....	84

Figura 5.2 – Gráfico da amplitude do sinal de corrente.	88
Figura 5.3 – Variação de carga no tempo associada aos pulsos de corrente.	92
Figura 5.4 – Gráfico com o ajuste exponencial usado para a variação da carga com o tempo.	92
Figura 5.5 – Gráfico com o ajuste exponencial usado para a variação da carga com a extensão do líder.	93
Figura 5.6 – Convenção física da direção do campo elétrico.	94
Figura 5.7 – Extensão dos líderes ascendentes em relação ao tempo.	97
Figura 5.8 – Densidade linear de cargas.	98

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Características do líder escalonado.....	12
Tabela 2.2 – Principais características de uma descarga de retorno negativa.	28
Tabela 2.3 – Características da corrente contínua para um raio negativo.	29
Tabela 3.1 – Equipamentos utilizados durante as campanhas de aquisição de dados.	48
Tabela 4.1 – Dados gerais dos eventos ocorridos.....	66
Tabela 5.1 – Médias de intervalo entre pulsos e amplitude da corrente elétrica.	85
Tabela 5.2 – Média do intervalo entre pulsos encontrados na literatura.	85
Tabela 5.3 – Médias de intervalo entre pulsos e amplitude da corrente elétrica para o Caso B.	86
Tabela 5.4 – Dados gerais dos eventos ocorridos.....	90
Tabela 5.5 – Tabela dos valores das variáveis da função exponencial ($Q = Aet\tau + B$) da carga pelo tempo.....	93
Tabela 5.6 – Tabela dos valores das variáveis da função exponencial ($Q = AeL\tau + B$) da carga pela extensão.....	93
Tabela 5.7 – Extensão e velocidade dos líderes ascendentes.	97
Tabela 5.8 – Tabela dos valores das variáveis da função exponencial da variação da densidade de carga com o tempo.....	98
Tabela 5.9 – Dados gerais dos eventos ocorridos.....	99
Tabela 5.10 – Densidade linear de cargas encontradas na literatura.	100
Tabela A 1 – Quadros da câmera rápida V711 correspondentes ao alongamento dos canais de LANC no P1 e P2 e valores de pulsos de corrente adquiridos pelo TC (ganho maior) no P2.....	113
Tabela A 2 – IEQ da câmera V711 correspondentes ao desenvolvimento dos canais de LANC no P1 e P2 e valores de IEP no P2.....	115
Tabela B 1 – Quadros da câmera rápida V12, correspondentes ao alongamento dos canais de LANC e LAC no P1 e P2, associados aos instantes e valores de picos de corrente adquiridos pelo TC (ganho maior) no P1 e P2.	120

Tabela B 2 – Quadros da câmera rápida V711, correspondentes ao alongamento dos canais de LANC e LAC no P1 e P2, associados aos instantes e valores de picos de corrente adquiridos pelo TC no P1 e P2.	122
Tabela B 3 – IEQ das câmeras rápidas V711 e V12 correspondentes ao alongamento dos canais de LANC no P1 e LAC no P2.	124
Tabela B 4 – IEP adquiridos pelo TC no P1 e P2.	126
Tabela B 5 – Valores de extensão e velocidade dos canais de LAC e LANC do Caso B.	126
Tabela C 1 – Quadros da câmera rápida V12, correspondentes ao alongamento dos canais de LANC no P1 e P2, associados aos instantes e valores de picos de corrente adquiridos pelo TC no P2.	128
Tabela C 2 – Quadros da câmera rápida V711, correspondentes ao alongamento dos canais de LANC no P1 e P2, associados aos instantes e valores de picos de corrente adquiridos pelo TC no P2.	130
Tabela C 3 – IEQ da câmera rápida V12 correspondentes ao desenvolvimento dos canais de LANC no P1 e P2 e, IEP adquiridos pelo TC no P2.	132
Tabela C 4 – IEQ da câmera rápida V711 correspondentes ao desenvolvimento dos canais de LANC no P1 e P2 e, IEP adquiridos pelo TC no P2.	133
Tabela C 5 – Valores de extensão e velocidade dos canais de LANC no P1 e P2, Caso C.	134

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ALDIS	Austrian Lightning Detection and Information System
Cb	Cumulonimbus
CC	Corrente contínua
CSZ	Common streamer zone
DPS	Dispositivo de proteção contra surtos
DR	Descarga de retorno
DRS	Descarga de retorno subsequente
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo
fps	Frames per second
GPS	Global Positioning System
Ip	Pico de corrente
IEP	Intervalo entre pico de corrente
IEQ	Intervalo entre quadros
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
L1	Local de observação 1
L2	Local de observação 2
L3	Local de observação 3
LAC	Líder ascendente conectivo
LANC	Líder ascendente não conectivo
LLS	Lightning location system
M	Mediana
MA	Média aritmética
MG	Média geométrica
P1	Prédio 1
P2	Prédio 2
SPDA	Sistema de proteção contra descargas atmosféricas
TC	Transformador de corrente
TOA	Time of Arrival
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO CONCEITUAL	4
2.1 Raio, relâmpago e trovão	5
2.2 Nuvens de tempestade	7
2.3 Descargas atmosféricas	8
2.3.1 Processos físicos do raio	9
2.3.1.1 Quebra de rigidez dielétrica do ar	9
2.3.1.2 Iniciação do líder bidirecional	10
2.3.1.3 Propagação do líder descendente	10
2.3.1.4 Líderes ascendentes a partir do solo	14
2.3.1.5 Descarga de retorno	27
2.3.1.6 Corrente contínua	29
2.3.1.7 Líder de retorno	29
2.3.1.8 Descarga de retorno subsequente	31
2.3.1.9 Estabilidade do canal	32
2.3.2 Classificação dos raios	33
2.3.2.1 Raios intranuvem	33
2.3.2.2 Raios descendentes	34
2.3.2.2.1 Polaridade negativa	34
2.3.2.2.2 Polaridade positiva	34
2.3.2.3 Raios ascendentes	35
2.4 Proteção contra raios	36
2.4.1 Sistema de proteção contra descargas atmosféricas	37
2.4.2 Danos e perdas materiais	39
2.4.3 Lesões em pessoas	43
2.4.3.1 Descarga direta	43
2.4.3.2 Lesão por contato	43
2.4.3.3 Descarga lateral	43
2.4.3.4 Tensão de passo	44

2.4.3.5	Líderes ascendentes.....	44
2.4.3.6	Mecanismos não elétricos	44
3	INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA.....	46
3.1	Projeto PIP2.....	46
3.2	Local de observação	48
3.3	Equipamentos utilizados	52
3.3.1	Câmeras convencionais e de alta velocidade	52
3.3.2	Sensor de campo elétrico	54
3.3.3	Sistema de medição de corrente.....	56
3.3.4	Links de fibra óptica e sistema de aquisição de dados.....	62
3.3.5	Sistema de localização de descargas atmosféricas.....	63
4	AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS.....	66
4.1	Caso A – LANC P1 e P2.....	66
4.2	Caso B – LANC P1 e LAC P2	73
4.3	Caso C – LANC P1 e P2	78
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	83
5.1	Sinal de corrente elétrica.....	83
5.1.1	Intervalo entre pulsos de corrente elétrica	83
5.1.2	Amplitude dos pulsos de corrente elétrica	86
5.1.3	Colapso da corrente	89
5.2	Carga transferida	90
5.3	Sinal de campo elétrico	94
5.4	Extensão e velocidade dos líderes ascendentes.....	96
5.5	Densidade linear de cargas	97
6	CONCLUSÕES.....	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
Apêndice A	– INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES DO CASO A.....	111
Apêndice B	– INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES DO CASO B.....	118
Apêndice C	– INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES DO CASO C.....	127

1 INTRODUÇÃO

A física por trás da conexão de raios a estruturas aterradas não é inteiramente compreendida pela ciência, bem como o próprio fenômeno do raio. Um raio, ao se propagar em direção ao solo, intensifica o campo elétrico nas extremidades de estruturas encontradas na superfície. Conseqüentemente, descargas de polaridade oposta surgem e deslocam-se para cima, a fim de conectarem-se à descarga descendente. Quando ocorre a conexão, essa descarga ascendente é chamada de Líder Ascendente Conectivo (LAC). Ao longo das últimas décadas, modelos e teorias foram criados para descrever os líderes conectivos (RIZK, 2009; COORAY, BECERRA, 2012). No entanto, observações *in-situ* desses líderes são raras e quase inexistentes.

No decorrer de cinco anos, o Grupo de Eletricidade Atmosférica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) manteve câmeras de alta velocidade direcionadas ao Pico do Jaraguá, com a finalidade de registrar o processo de propagação de raios ascendentes. Além dos raios ascendentes, foram observadas diversas conexões diretas de raios descendentes a um par de edifícios residenciais idênticos (chamados neste trabalho de P1 e P2), localizados no campo de visada das câmeras. Vários líderes ascendentes que partiram de estruturas no solo, mas não se conectaram (Líder Ascendente Não Conectivo – LANC) também foram observados. A riqueza de detalhes das imagens chamou a atenção para a possibilidade de estudar o processo de conexão de descargas atmosféricas descendentes com estruturas no solo.

A investigação e entendimento das características físicas envolvidas no processo de formação e propagação de LACs e LANCs é importante na proteção tanto de edificações – auxiliando na especificação de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), quanto de humanos, resguardando pessoas de possíveis lesões causadas por descargas atmosféricas. No entanto, dados referentes às medidas de corrente de LACs e LANCs induzidos por descargas naturais são praticamente inexistentes na literatura.

Alguns dos trabalhos relacionados com medidas de corrente elétrica de LACs e LANCs foram desenvolvidos a partir de dados obtidos em torres metálicas - estruturas maiores que 60 m de altura (VISACRO et al., 2010; VISACRO, GUIMARAES, MURTA VALE, 2017) (NAG et al., 2021) e também de pequenas estruturas (SCHOENE et al., 2008).

Neste contexto, este trabalho é o primeiro a apresentar e analisar a resposta de para-raios de edifícios convencionais à aproximação de descargas descendentes naturais.

O grande diferencial dessa pesquisa está na utilização de equipamentos instalados a uma curta distância do local do evento. As câmeras de alta velocidade adquiriram imagens a uma taxa mínima de 37.000 fps (quadros por segundo, do inglês *frames per second*) localizadas a 200 m dos prédios. O sensor de campo elétrico localizava-se a 22,5 m do para-raios do prédio P1 e a 4 m do para-raios do prédio P2. Esta curta distância permite visualizar características referentes aos pulsos de LAC e LANC ainda não identificadas até o presente momento. Assim, o trabalho combina medidas simultâneas de corrente, campo elétrico e imagens de alta resolução temporal em uma só análise.

Tratando-se de descargas atmosféricas naturais, a obtenção do sinal de corrente elétrica produzida pelas tentativas de conexão torna-se ainda mais difícil pois é preciso instrumentar exatamente o local onde a descarga irá se conectar, ou muito próximo a ele. Com isso, a aquisição simultânea com os três equipamentos utilizados faz deste um trabalho relevante no meio científico.

A revisão conceitual deste trabalho apresenta, de maneira geral, processos físicos envolvidos na iniciação e propagação dos raios descendentes e, como consequência destes, o modo de formação de líderes ascendentes produzidos naturalmente por estruturas no solo. Foram descritos os principais trabalhos encontrados na literatura que abordam o tema. O capítulo de proteção contra descargas atmosféricas exemplifica os danos e perdas materiais causados por raios e os ferimentos que podem ocorrer em pessoas quando descargas líderes ascendentes são produzidas pelas vítimas.

O Capítulo 3 contém informações do projeto P1 P2 e apresenta o local de observação e equipamentos utilizados durante a aquisição de dados. As informações adquiridas e o tratamento dos dados são descritos no Capítulo 4. Nesta parte do trabalho os dados dos sensores são apresentados caso a caso.

Os resultados deste trabalho contribuíram na consolidação de informações encontradas na literatura, tais como: duração da fase de desenvolvimento e amplitude dos pulsos de corrente dos LANCs, duração do intervalo entre pulsos, amplitude da corrente no

momento do colapso, carga transferida, características do sinal de campo elétrico, extensão e velocidade dos líderes ascendentes e densidade linear de cargas.

2 REVISÃO CONCEITUAL

O pioneiro nos estudos relacionados à eletricidade atmosférica foi Benjamin Franklin, que em 1750 propôs um experimento para entender a natureza dos raios. Contudo, somente no início do século XX os estudos sistemáticos para mensurar parâmetros das descargas atmosféricas foram iniciados através do uso de câmeras e sensores de campo elétrico e de corrente.

Atualmente essa área da ciência busca investigar e compreender as propriedades físicas de formação, propagação e conexão dos raios a estruturas no solo, bem como o desenvolvimento e aperfeiçoamento de sistemas de proteção, tornando-os mais eficientes e minimizando o número de vítimas e prejuízos causados pelas descargas atmosféricas.

A revisão conceitual deste trabalho inicia-se com o tópico Raio, relâmpago e trovão, Capítulo 2.1. São explicados e diferenciados os termos linguísticos utilizados no meio científico, para se referir aos diferentes processos físicos envolvidos na propagação de descargas atmosféricas.

No Capítulo 2.2 são descritas as condições necessárias para que descargas elétricas sejam iniciadas no interior das nuvens de tempestade, e os tipos de raios capazes de se formarem e propagarem a partir delas. A seguir, no Capítulo 2.3, são apresentados os tipos de descargas atmosféricas e descritos os processos físicos envolvidos na formação destas no interior da nuvem e, as etapas até alcançar o solo.

Resumidamente a formação de um raio inclui a intensificação do campo elétrico entre os centros de cargas no interior da nuvem, quando ocorre a quebra de rigidez dielétrica do ar onde a descarga corona dá origem aos *streamers*¹ (termo em inglês usado no meio científico para denominar “pequenos filamentos de plasma frio”). O alongamento desses filamentos de plasma frio dá origem a um líder de plasma quente, chamado de líder bidirecional (que pode terminar dentro da nuvem ou alcançar o solo). Os líderes descendentes que se aproximam do solo dão origem a líderes ascendentes de carga oposta

¹ Por se tratar de uma área da ciência em pleno desenvolvimento, alguns termos ainda não possuem equivalentes em português.

que se propagam ao seu encontro, ao se conectarem ocorre a etapa mais intensa do raio, a descarga de retorno (DR). Essa descarga pode ser seguida imediatamente por uma corrente de baixa intensidade e longa duração, a corrente contínua (CC). Variações na CC são chamadas componentes M. Após esse processo o raio pode terminar. Caso ocorram líderes de retorno no interior da nuvem, descargas de retorno subsequentes (DRS) podem ocorrer.

Após a compreensão dos tipos de raios, dos processos físicos envolvidos desde a sua formação até o momento em que a descarga de retorno termina e de algumas características específicas desses processos a revisão conceitual aborda o tema proteção contra raios, no Capítulo 2.4. Uma breve descrição é feita sobre a função e importância dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas. São apresentados danos materiais causados por raios e as razões pelas quais ocorreram, além de ferimentos que pessoas podem sofrer como consequência de descargas atmosféricas ocorridas próximas a elas.

2.1 Raio, relâmpago e trovão

Embora intuitivamente pareça simples, em português, a definição técnica e científica destes fenômenos ainda se confunde de acordo com a aplicação e contexto. Por exemplo, em atividades com uso intensivo de observadores humanos, tais como as realizadas com finalidade aeronáutica, é muito comum se referenciar a qualquer evento de descarga atmosférica como um “evento de trovoada”, independente da detecção ou não da emissão de luz proveniente da descarga (MARINHA DO BRASIL, 2015; COMANDO DA AERONÁUTICA, 2017).

Embora esta definição soe estranha ao senso comum, é compreensível o uso neste contexto: afinal, em aplicações aeronáuticas, é de extrema importância alertar e desviar o tráfego aéreo de nuvens de tempestade. Sendo o trovão de fácil identificação pelo observador, acabou se tornando o indicador da existência de tempestades nos arredores de aeródromos. Mesmo assim, independente do uso e sem recorrer a glossários oficiais, o consenso sobre a definição de **trovão** não apresenta dificuldades: é simplesmente o **som** produzido pela descarga atmosférica.

No entanto, as definições de raio e relâmpago se confundem em suas aplicações. Em documentos científicos e de engenharia, muitas vezes devido ao uso de traduções de trabalhos de referência originalmente em inglês, termos como *lightning*, *flash*, *thunderbolt* (entre outras variantes), dependendo do contexto podem ser tratados como sinônimos e acabam por propagar a mesma definição para mais de um fenômeno.

Dicionários etimológicos apontam que a origem latina da palavra relâmpago vem de *re-lampare*, que significa “brilhar”. Está relacionada à luz, com a mesma raiz de lampejo, lampear, lâmpada, lampião e lamparina, por exemplo. Definem também como sendo a luz súbita e intensa, proveniente de descarga elétrica entre nuvens ou entre a nuvem e superfície, e como clarão súbito e breve, ou ainda, luz intensa de curta duração.

Mesmo com a simplificada descrição do fenômeno físico pelos dicionários, fica claro que “relâmpago” está relacionado à luz proveniente da descarga atmosférica, e não ao canal de plasma que a constitui.

Essa definição é ratificada por glossários de geofísica e meteorologia, como por exemplo os do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021) e o do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC, 2021), que definem o **raio** como sendo a descarga elétrica visível na nuvem, entre a nuvem e o solo, entre o solo e a nuvem produzida em resposta à intensificação da atividade elétrica e o **relâmpago** como a manifestação luminosa que acompanha as descargas elétricas naturais.

Assim, com base nesses fundamentos, neste trabalho são utilizadas as seguintes definições:

Raio: canal de plasma visível, gerado em resposta à intensificação da atividade elétrica na atmosfera. Podendo ser na nuvem, entre nuvem e solo e também no caso de líderes ascendentes, conectivos ou não.

Relâmpago: manifestação luminosa proveniente do raio, independentemente de o canal de plasma ser observado ou não.

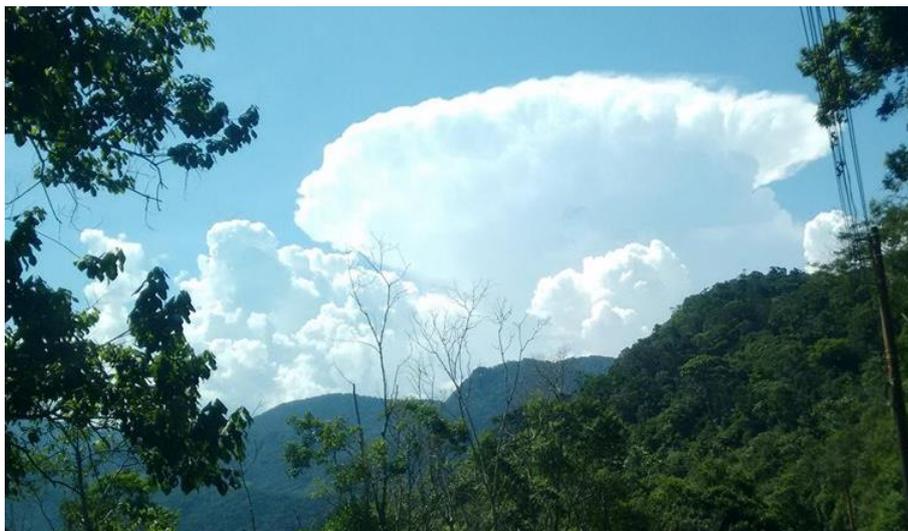
Trovão: manifestação sonora produzida pela abrupta expansão do ar devido à alta temperatura do plasma que constitui o raio.

2.2 Nuvens de tempestade

As nuvens de tempestade distinguem-se de outros tipos de nuvem em vários aspectos, como por exemplo, pela sua grande extensão vertical e por apresentarem fortes correntes verticais de ar. O processo de formação dessas nuvens depende basicamente de três fatores: a umidade do ar, a instabilidade atmosférica - relacionada à variação de temperatura com a altura - e a existência de forçantes dinâmicas que proporcionam a ascensão do ar quente e úmido.

As cumulonimbus (Cb) (Figura 2.1), nome técnico dado às nuvens de tempestades, têm sua formação a partir das cumulus - nuvens baixas que iniciam seu desenvolvimento em aproximadamente 1.000 m de altura (WALLACE; HOBBS, 2006). Uma das características dessas nuvens é ter a base plana, devido principalmente à presença de turbulência na camada limite planetária, que inibe a formação de nuvens da superfície até em torno de 1.000 m de altura. Sua extensão vertical alcança o topo da troposfera, resultando no cume plano em forma de “bigorna”, característico da Cb. A essa altura, em torno de 10 a 15 km, a temperatura não diminui com a altura, inibindo a convecção, fazendo com que a nuvem não se desenvolva mais verticalmente, se estendendo apenas horizontalmente. No entanto, caso haja intenso movimento vertical ascendente no interior da Cb, seu topo pode adentrar na tropopausa.

Figura 2.1 – Nuvem da espécie Cumulonimbus.



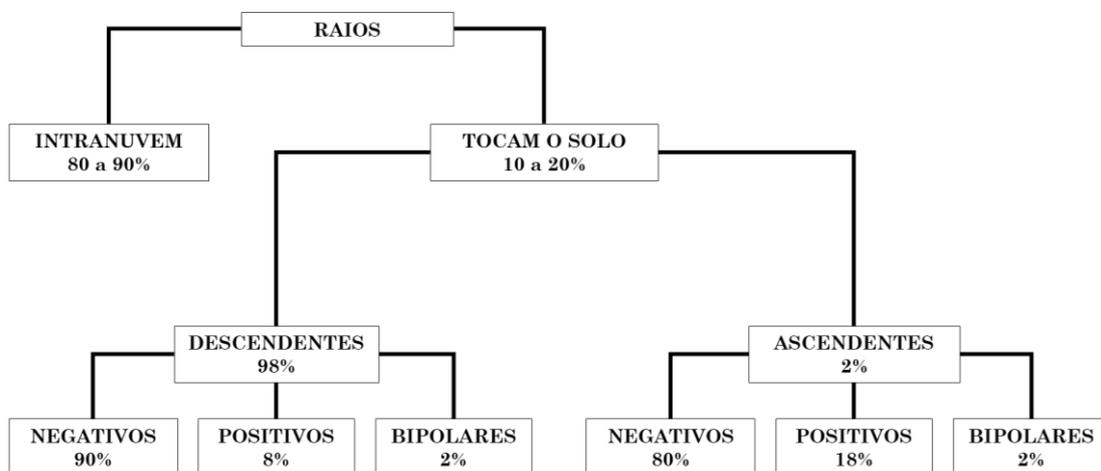
Fonte: Produção da autora.

Raios de ambas as polaridades se iniciam entre os centros de cargas da nuvem, onde a intensidade do campo elétrico é maior. Contudo, os raios descendentes negativos costumam ocorrer no início da tempestade, durante seu desenvolvimento convectivo - associada a rajadas de vento e raios descendentes. Geralmente quando os ventos e a forte precipitação cessam, resta a parte estratiforme da nuvem com baixa precipitação e excesso de cargas positivas. Nesse momento os raios descendentes positivos e os ascendentes costumam ocorrer.

2.3 Descargas atmosféricas

O raio é uma descarga atmosférica autopropagante muito intensa. Os raios têm polaridade positiva e negativa, podendo ser intranuvem, descendentes (nuvem-solo) ou ascendentes (solo-nuvem). A Figura 2.2 ilustra os tipos de raios, suas polaridades e frequência de ocorrência (RAKOV; UMAN, 2003).

Figura 2.2 – Classificação dos raios e porcentagem de ocorrência.



Fonte: Produção da autora.

A corrente elétrica produzida pelo raio gera um aquecimento brusco e expansão supersônica do ar que dá origem ao som ao qual denominamos trovão. Assim como uma corrente elétrica aquece a resistência de aquecedores, a corrente do raio ao passar pelo ar,

que é um mal condutor elétrico, o aquece e causa uma expansão violenta produzindo um som intenso.

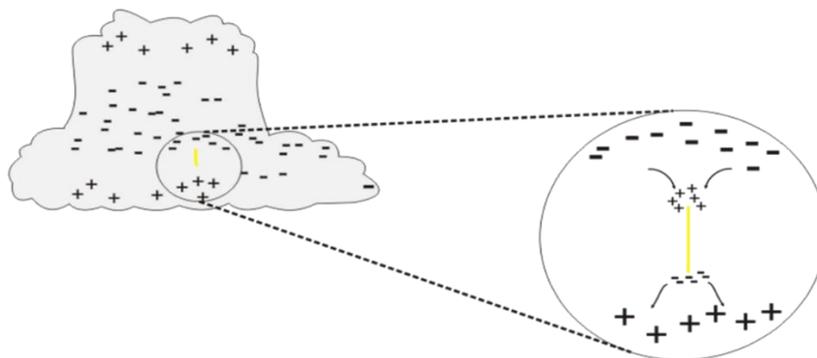
2.3.1 Processos físicos do raio

São diversos os processos físicos envolvidos na formação da descarga elétrica no interior da nuvem e as etapas pelas quais o raio passa até alcançar o solo. Nos raios descendentes as etapas principais são:

2.3.1.1 Quebra de rigidez dielétrica do ar

A iniciação do raio ocorre entre os centros de cargas presentes no interior da nuvem. Para que a descarga seja iniciada é necessária uma grande intensificação do campo elétrico entre esses centros de cargas, onde a rigidez dielétrica do ar é rompida. Esse processo ioniza os átomos ali presentes, acelerando os elétrons a ponto de produzir uma descarga de quebra da rigidez dielétrica. Como consequência, é gerado um canal ionizado com várias ramificações que se propagam tanto na vertical como na horizontal (COORAY, 2015). A Figura 2.3 ilustra o processo de iniciação do líder bipolar bidirecional entre os centros de cargas.

Figura 2.3 – Processo de iniciação do líder bipolar bidirecional.



Fonte: Produção da autora.

2.3.1.2 Iniciação do líder bidirecional

Após o processo de quebra de rigidez dielétrica, são formados os *streamers*, que tem sua origem a partir de avalanches de elétrons devido ao campo elétrico intenso na vizinhança de um eletrodo. Estes vão se formando como ramificações em torno de um canal principal, que vai se alongando (propagando) na direção do campo elétrico. As avalanches eletrônicas, ao gerarem uma alta densidade de carga em uma pequena região, evoluem para filamentos de plasma frio que se propagam com baixa corrente elétrica, da ordem de miliampères, e possuem extensão de alguns metros, denominados *streamers*. A soma das correntes elétricas dos *streamers* aquece o canal principal e, a partir de um valor crítico de temperatura (acima de 4.000 K \approx 3.700 °C), dá início à um processo de ionização térmica, reforçando a ionização e evoluindo para uma descarga mais robusta, denominada líder, um canal de plasma quente autopropagante (COORAY, 2015).

Os líderes não se propagam instantaneamente, mas intensifica o campo a sua frente quebrando a rigidez dielétrica do ar, alongando-se na direção de maior intensidade de campo elétrico.

2.3.1.3 Propagação do líder descendente

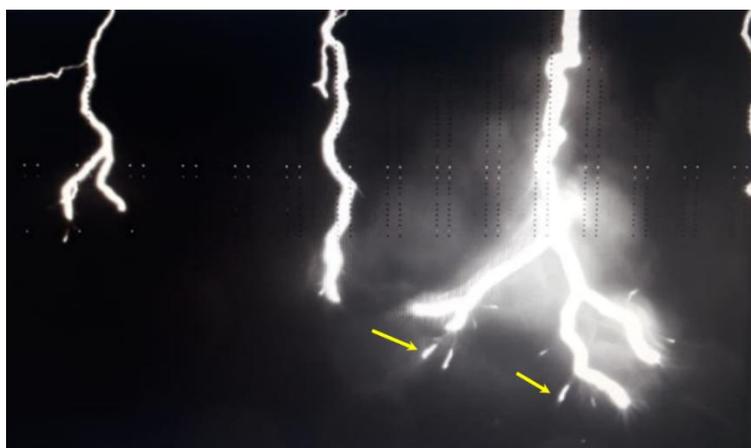
Líder negativo

O líder de polaridade negativa, também chamado de líder escalonado, possui cargas negativas na extremidade do seu canal. A concentração de carga negativa na extremidade do líder intensifica o campo elétrico nas suas vizinhanças, o que leva à ionização do ar nessa região. Os elétrons arrancados, por possuírem carga de mesma polaridade, se afastam da extremidade do líder e são capturados por átomos que possuem eletroafinidade, formando uma região de carga negativa logo à frente da extremidade do líder. Ao mesmo tempo, forma-se uma nuvem de cargas positivas na região onde ocorreram as ionizações, situada entre a extremidade do líder e a região de cargas negativas formada à sua frente.

As regiões de carga positiva e negativa formadas à frente da extremidade do líder propiciam uma grande intensificação do campo imediatamente à frente da extremidade do canal principal e dá origem a um novo processo de quebra de rigidez dielétrica que

leva à criação de canais de plasma frio menores, chamados *space stem*, que, ao se desenvolverem (aos moldes do líder bipolar bidirecional) dão origem a um pequeno canal de plasma autopropagante denominado *stem leader*. Este, por sua vez, conecta sua extremidade de polaridade positiva ao canal principal alongando-o, possibilitando sua propagação. Em geral, esse tipo de conexão emite alta taxa de radiação eletromagnética e intensifica o campo elétrico em estruturas no solo. Imagens obtidas através de câmeras rápidas registraram instantes antes dos *space leaders* conectarem-se ao canal do líder descendente (Figura 2.4). É possível identificar “pequenos líderes bidirecionais” na frente do canal principal.

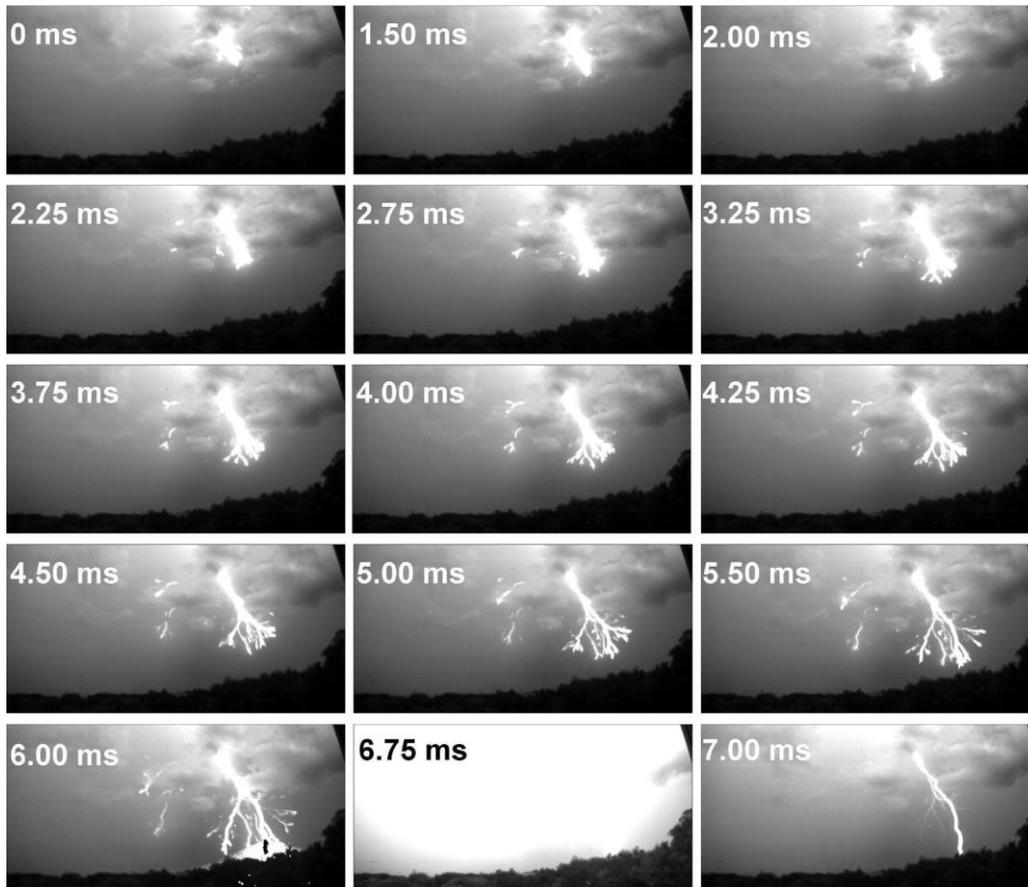
Figura 2.4 – *Space leaders* vistos por meio de câmera rápida.



Fonte: INPE (2015).

A Figura 2.5 apresenta quadro a quadro da propagação de um líder escalonado em direção ao solo. No decorrer dos anos, estudos relacionados aos raios negativos identificaram diversos aspectos do líder escalonado, durante sua propagação. A Tabela 2.1 apresenta parâmetros relacionados às etapas de propagação do líder.

Figura 2.5 – Evolução do líder escalonado visto através de câmera rápida.



Fonte: Cooray (2014).

Tabela 2.1 – Características do líder escalonado.

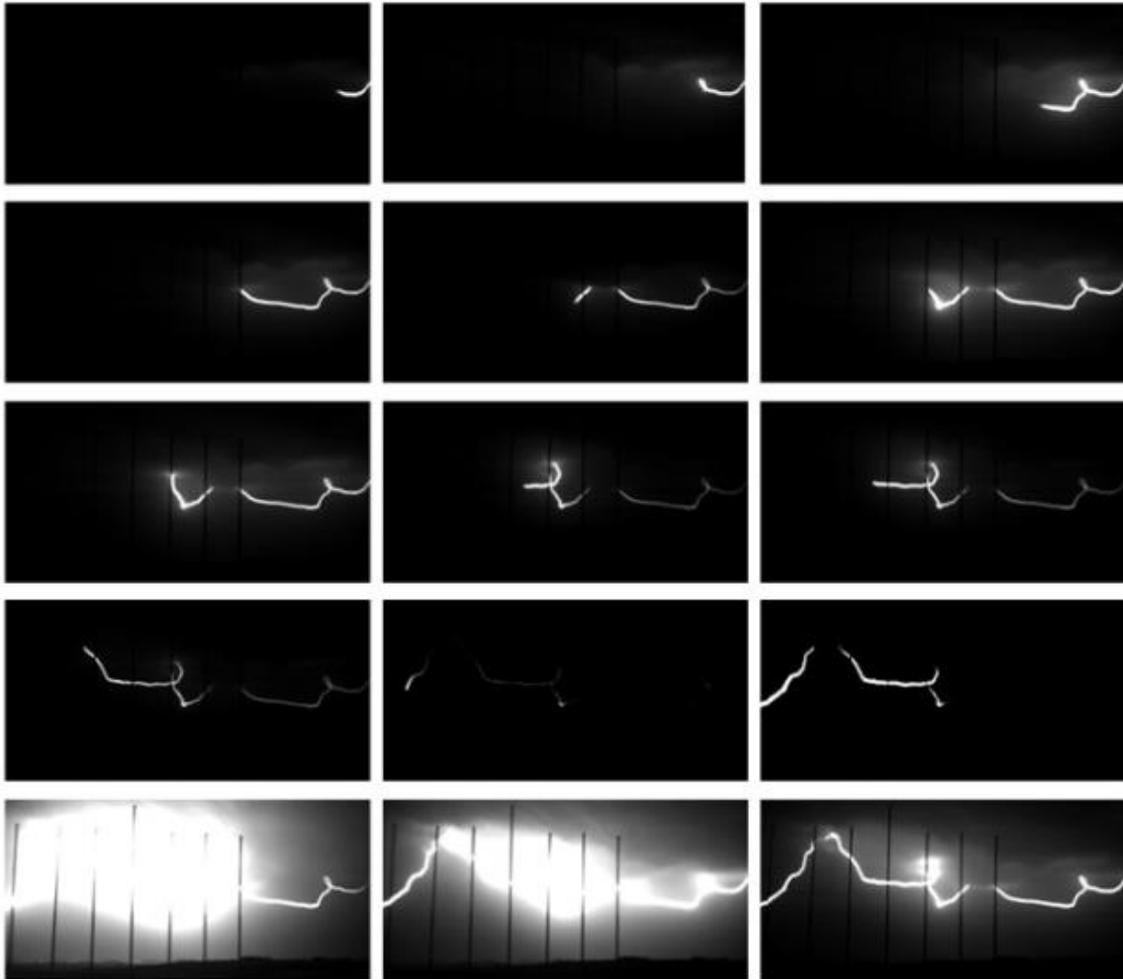
Líder escalonado	
Parâmetro	Valores típicos
Comprimento do canal (m)	50
Intervalo de tempo entre passos (μs)	20 – 50
Corrente de passo (kA)	> 1
Carga de passo (μC)	> 1
Velocidade média de propagação (m/s)	2×10^5
Duração total (ms)	35
Corrente média (A)	100 – 200
Carga total (C)	5
Potencial elétrico (MV)	~50
Temperatura do canal (K)	~10.000

Fonte: Adaptado de Rakov; Uman (2003).

Líder positivo

Ao contrário do líder negativo, o líder de polaridade positiva, ao intensificar o campo elétrico na sua vizinhança e provocar a quebra de rigidez dielétrica, ionizando o ar nessa região, converge elétrons para a extremidade do canal, criando avalanches eletrônicas que se adensam nas bordas da extremidade positiva do líder. O aumento da densidade de cargas numa pequena região propicia o surgimento de streamers positivos que se desenvolvem a partir da extremidade do canal. A soma das correntes dos streamers aquece o plasma do canal favorecendo o surgimento da ionização térmica, que aumenta a condutividade do mesmo. O canal torna-se autopropagante e estende-se continuamente acelerando com mais facilidade que o líder de polaridade negativa. A intensidade do campo elétrico necessária para a iniciação e propagação do líder positivo é cerca de 2 vezes menor quando comparada ao líder negativo (WILLIAMS, 2006). A Figura 2.6 apresenta quadro a quadro da propagação de um líder positivo.

Figura 2.6 – Evolução do líder positivo visto por meio de câmera rápida.



Fonte: Cooray (2014).

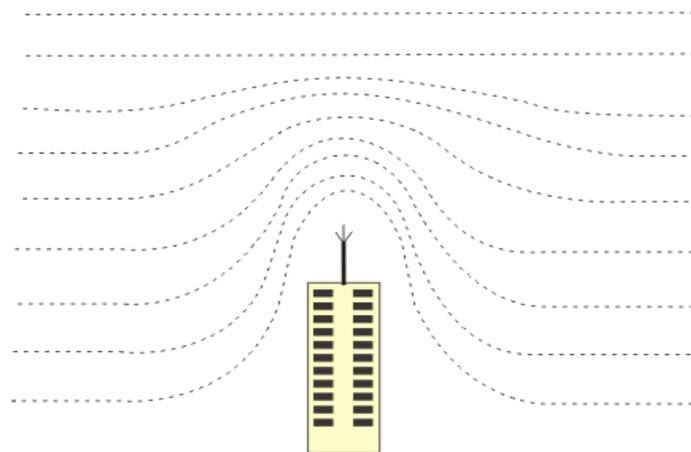
2.3.1.4 Líderes ascendentes a partir do solo

No solo, quanto maior for a extensão vertical de um objeto, maior será a probabilidade de que raios ascendentes sejam iniciados. Estruturas mais comuns, abaixo de 60 m, são na maioria das vezes (90% ou mais) atingidas por descargas descendentes negativas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). Entretanto, tais estruturas não esperam passivamente pela conexão.

Ao se aproximar do solo, o líder descendente intensifica o campo elétrico nas extremidades pontiagudas de objetos situados na superfície. Um exemplo do comportamento das linhas de campo elétrico, devido a essa intensificação, pode ser visto

na Figura 2.7. A figura mostra a deformação nas linhas equipotenciais de campo elétrico causada pela presença do prédio. A aproximação do líder descendente faz com que a distância entre as linhas se torne cada vez menor. Há uma maior densidade de linhas para uma mesma área, o que resulta numa intensificação ainda maior do campo. Quanto mais próximo da extremidade do condutor (para-raios, linhas de transmissão, topo de árvores, extremidade da grama no solo, etc.), menor o espaçamento entre as linhas de equipotencial.

Figura 2.7 – Intensificação do campo elétrico por estruturas no solo.



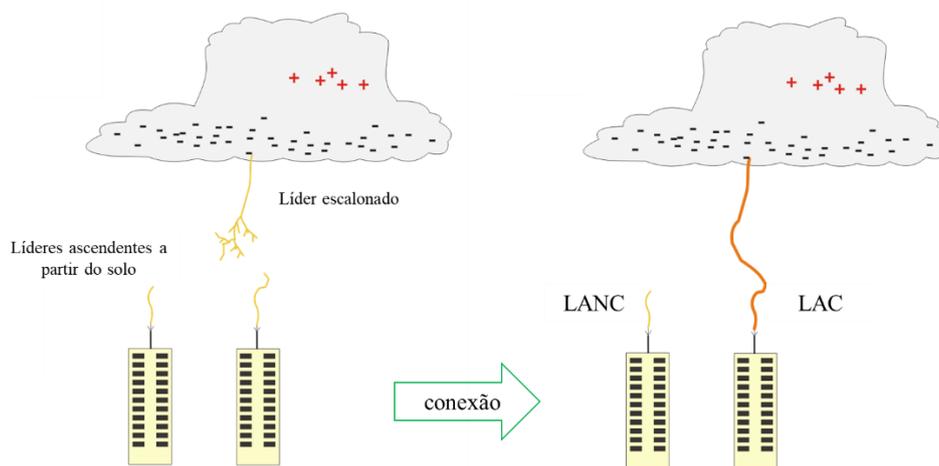
Fonte: Produção da autora.

Estruturas influenciadas pelo campo elétrico intenso dos canais ionizados dos líderes negativos, emitem líderes positivos que vão ao encontro destes, participando ativamente do processo de conexão. Qualquer protuberância no solo (torres, postes, edificações, árvores, inclusive pessoas) sob a ação de um campo elétrico suficientemente elevado, são capazes de produzir *streamers* e líderes ascendentes.

A extensão do líder ascendente torna-se proporcional a dois fatores: a quantidade de carga presente na extremidade do líder descendente e a distância que se encontra da estrutura (LU et al., 2012). O líder ascendente pode ou não se conectar à descarga descendente. Um líder ascendente que conecta a uma descarga descendente é denominado Líder Ascendente Conectivo (LAC), e um líder que não consegue se conectar à descarga

descendente é denominado Líder Ascendente Não Conectivo (LANC). A Figura 2.8 ilustra ambos os tipos de líder ascendente descritos acima.

Figura 2.8 – Ilustração de LAC e LANC.



Fonte: Produção da autora.

Essas descargas ascendentes ocorrem, frequentemente, nas proximidades do local onde o raio descendente toca o solo. LANCs produzidos por estruturas muito altas podem se estender por centenas de metros durante a tentativa de conexão e em seguida colapsarem (WARNER, 2010; LU et al., 2012). Tentativas de conexão partindo de estruturas muito baixas, próximo ao nível do solo, são ainda mais difíceis de serem identificadas pois possuem baixa luminosidade e extensão vertical (CUMMINS et al., 2018).

O estudo relacionado a LACs e LANCs é recente e, até o momento, poucos dados referentes a esse tipo de processo físico do raio foram adquiridos. Essa escassez deve-se principalmente à dificuldade de obtenção de imagens e informações desse tipo de evento. Além de um longo período de observação, câmeras devem estar posicionadas próximas ao local onde se espera a conexão. Ainda assim, existem alguns registros dessas tentativas de conexão feitos através de câmeras fotográficas tanto por pesquisadores da área quanto por amadores (Figura 2.9).

Figura 2.9 – Registros de conexões de raios descendentes com presença de LANCs.

a) LANCs iniciados no solo.



b) LANCs iniciados no topo de residências.



continua

Figura 2.9 – Conclusão.

c) LANC iniciado no topo de uma árvore.



Fonte: a) Adaptado de Cummins et al. (2018), b) Glauco Turcato (2020) e c) Johnson (2006).

Além de imagens fotográficas como as da Figura 2.9, líderes ascendentes conectivos e não conectivos foram também registrados por câmeras rápidas (WARNER, 2010; LU et al., 2010; LU et al., 2012; LU et al., 2013; JIANG et al., 2015; SABA et al., 2017; HILL, MATA, 2018). Em seu trabalho, Saba et al. (2017) apresenta imagens de LACs e LANCs partindo de edifícios convencionais (Figura 2.10).

Medidas dos valores de correntes produzidas por esse tipo de evento, no entanto, são mais raras, pois necessitam que o local de iniciação do LAC ou LANC esteja devidamente instrumentado. Algumas medidas obtidas por Schoene et al. (2008), Visacro; Guimaraes; Murta Vale (2017) e Nag et al. (2021) são apresentadas a seguir.

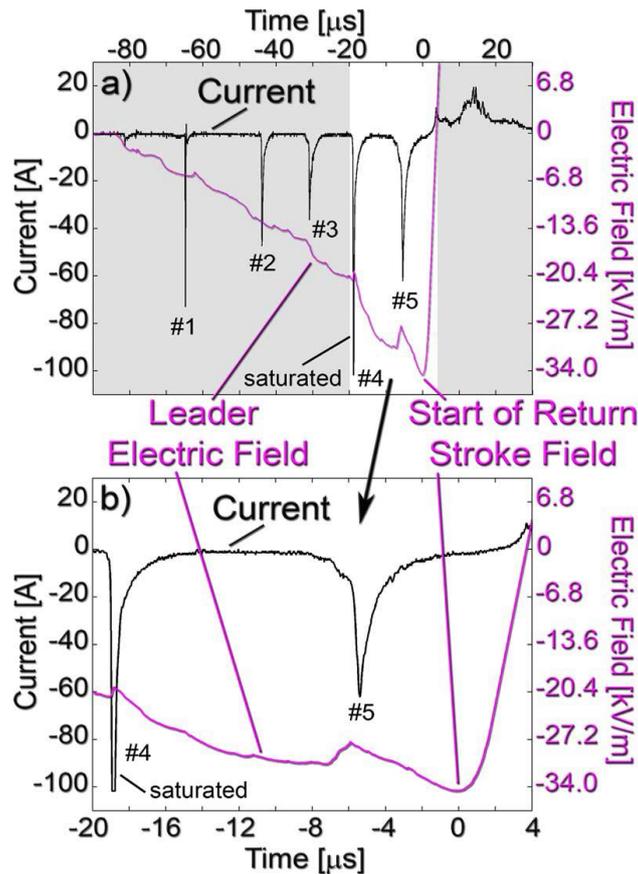
Figura 2.10 – Registro de tentativas de conexões em edifícios convencionais.



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

Schoene et al. (2008) mediu pulsos de LANC em um condutor vertical de 7 m localizado a aproximadamente 210 m do local onde o raio descendente de polaridade negativa (- 46 kA) tocou o solo. Durante a fase de desenvolvimento do LANC (tempo entre o primeiro pulso de corrente elétrica e o colapso) cinco pulsos de corrente foram induzidos. O sensor de campo elétrico encontrava-se a 100 m da DR e a aproximadamente 250 m do condutor vertical. A Figura 2.11 representa os pulsos de corrente no condutor vertical, bem como o campo elétrico durante o evento. O intervalo de tempo entre pulsos variou de 12 a 21 μ s. Os picos de corrente (I_p) dos pulsos foram: 73, 47, 36, 140 e 62 A, todos de polaridade positiva.

Figura 2.11 – Pulsos de LANC no condutor vertical.



Em a) cinco pulsos de LANC e campo elétrico registrados; b) pulso 4 e 5 e campo elétrico (que antecede a DR).

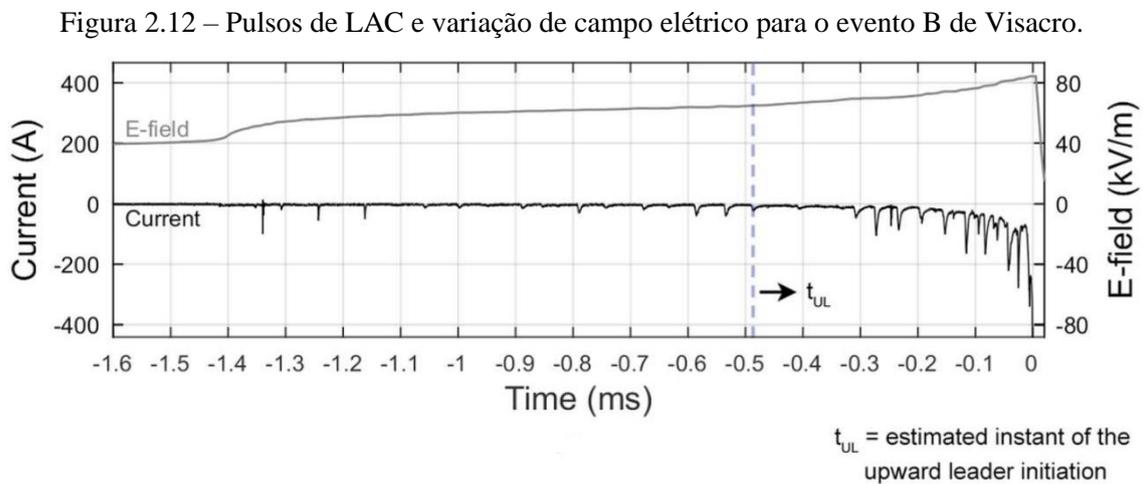
Fonte: Schoene et al. (2008).

A conclusão de Schoene et al. (2008) foi de que os pulsos de corrente estavam associados à propagação do líder escalonado. Os intervalos de tempo entre esses pulsos assemelham-se ao intervalo médio de propagação de um líder descendente negativo (25 μs) encontrado por Krider; Weidman; Noggle (1977). Em suas conclusões, Schoene et al. (2008) sugeriu que a variação do campo elétrico, devido à propagação do líder descendente, induzia corrente no condutor. O valor de corrente mais elevado foi de 140 A (antes da saturação).

Em seu trabalho Visacro; Guimaraes; Murta Vale (2017) obtiveram pulsos de LAC e LANC, utilizando o transformador de corrente (TC), para três eventos ocorridos em uma torre metálica de aproximadamente 60 m de altura. A estrutura está localizada em uma montanha a 1.450 m acima do nível do mar (VISACRO et al., 2010). As imagens foram

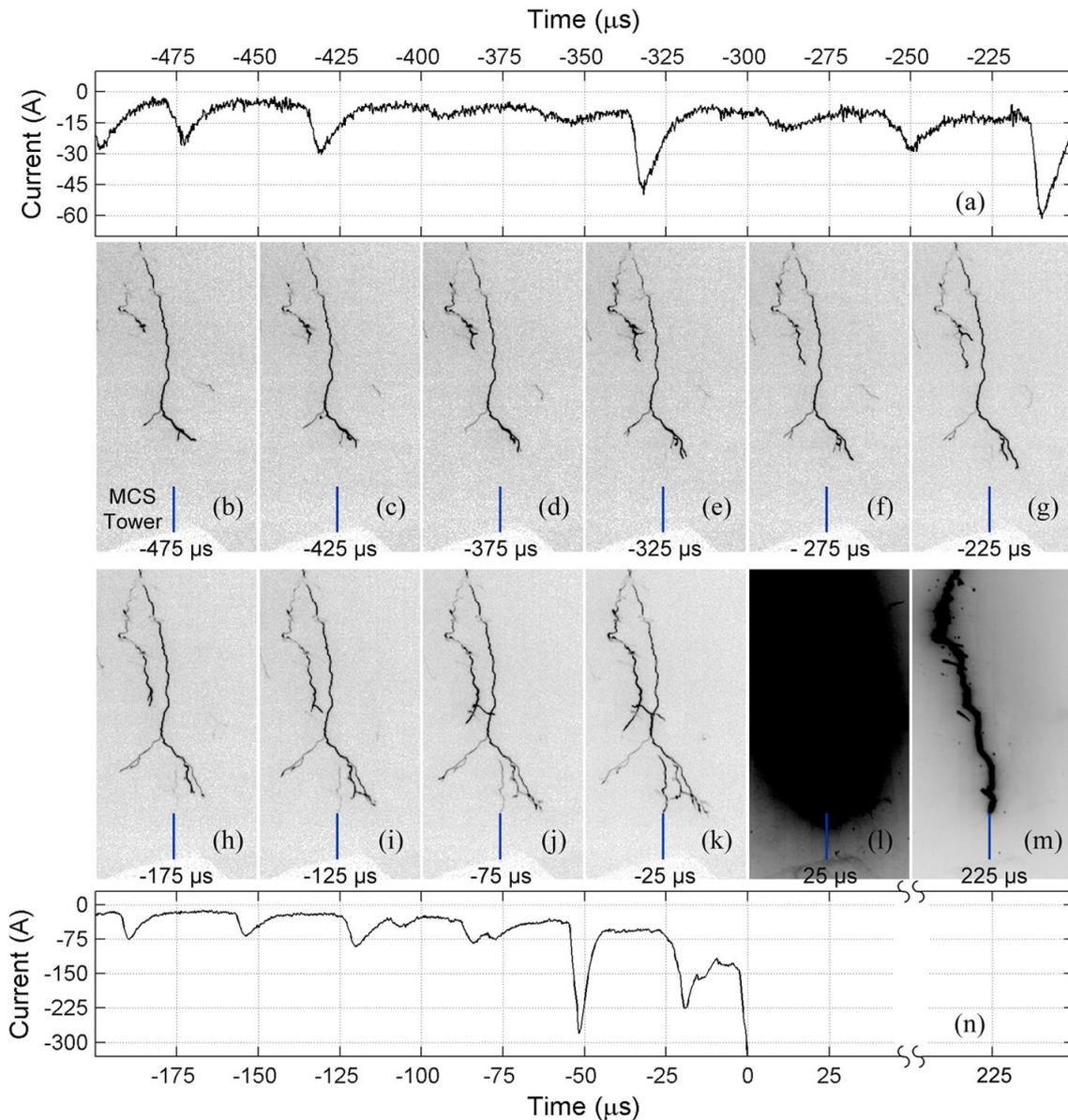
adquiridas por intermédio da câmara rápida *Photron* operando a 20.000 fps, localizada a 700 m do local observado. O sensor de campo elétrico encontrava-se a 50 m da estrutura.

A Figura 2.12 apresenta os pulsos de corrente e variação de campo elétrico obtidos durante o evento B analisado por Visacro; Guimaraes; Murta Vale (2017). Para este evento 13 pulsos de corrente de LAC foram adquiridos pelo TC. A maior amplitude do sinal de corrente, antes da conexão, foi de aproximadamente 270 A. O evento C de seu trabalho, resultou no gráfico combinado entre pulsos de LAC e quadros adquiridos pela câmara rápida Figura 2.13.



Fonte: Adaptado de Visacro; Guimaraes e Murta Vale (2017).

Figura 2.13 – Evento C, gráfico de pulsos de corrente e quadros da câmera rápida.



Fonte: Visacro; Guimaraes e Murta Vale (2017).

A partir dos dados obtidos Visacro; Guimaraes; Murta Vale (2017) apresentaram em suas análises o modo de propagação dos líderes ascendentes conectivos. A figura 9 de seu trabalho ilustra a sequência de eventos produzidos pela aproximação do líder escalonado (Figura 2.14). Sempre que o canal do líder escalonado se alonga (como consequência da conexão dos *space leader*) o campo elétrico sofre alteração e induz o acúmulo de cargas positivas na extremidade de estruturas no solo (a). O canal mantém seu comprimento e com a aproximação do líder escalonado, streamers positivos se desenvolvem na

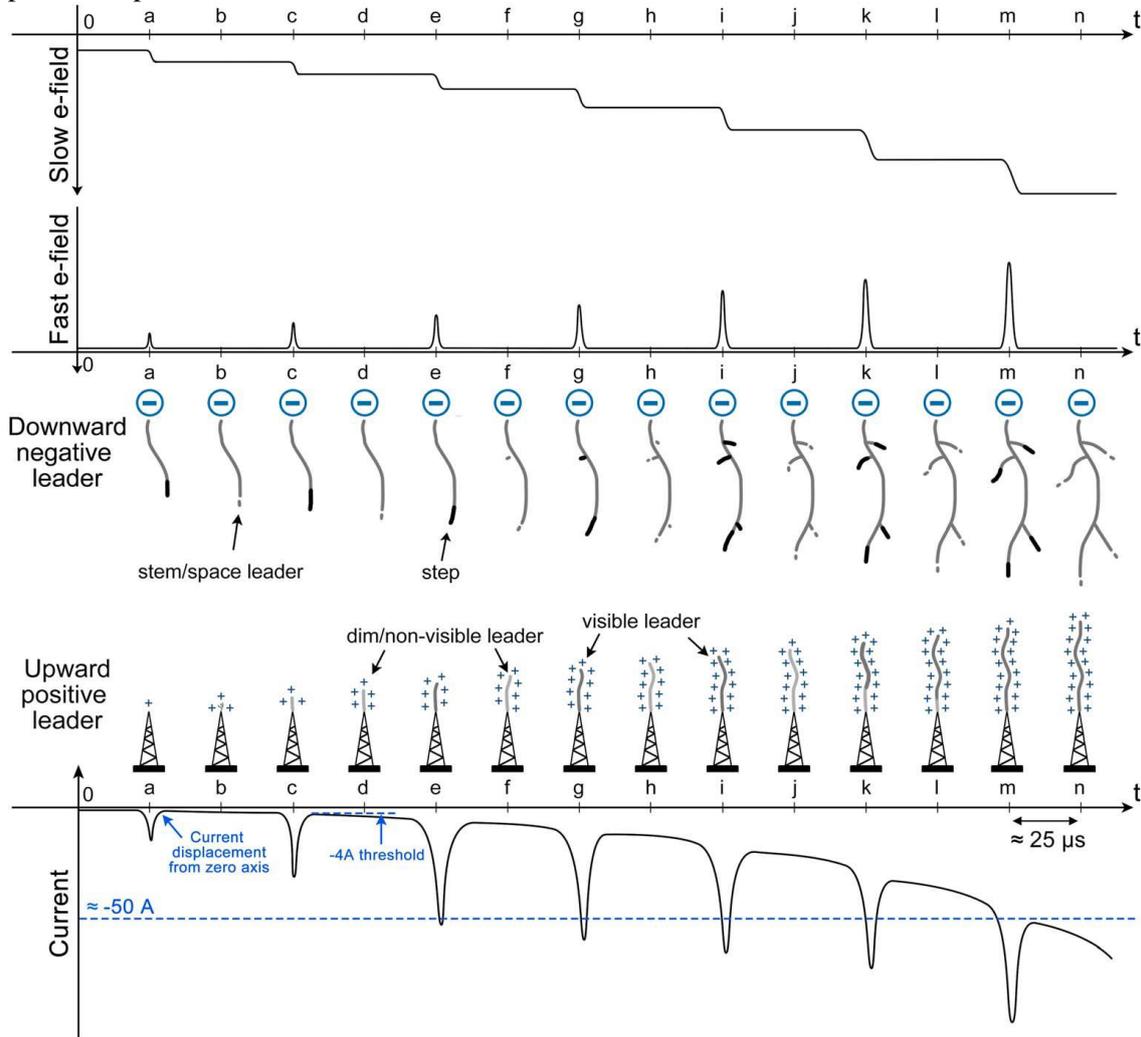
extremidade da estrutura (b). No estágio seguinte o líder escalonado novamente se alonga e uma corrente de alguns ampères (superior a 4 A) pode gerar um líder ascendente não visível (c). Conforme a distância entre o líder escalonado e a estrutura diminui, o líder ascendente formado se desenvolve continuamente (d) até que uma nova intensificação do campo induz uma corrente acima de 50 A, possibilitando a visualização inicial do canal através da câmera (e).

O líder ascendente positivo continua se desenvolvendo (f a j) produzindo luminosidade apenas quando o canal do líder escalonado se alonga e a variação do campo elétrico induz novos pulsos de corrente elétrica na estrutura (> 50 A) (g e i). A sequência desse processo alonga o canal dos líderes (ascendente e descendente) diminuindo a distância entre eles, resultando no aumento da corrente elétrica em ambos. Isso faz com que todo o canal do líder ascendente permaneça visível até o momento de sua conexão ou de seu colapso.

Visacro; Guimaraes; Murta Vale (2017) concluíram que LACs e LANCs produzidos por líderes escalonados têm propagação contínua e não em passos. Embora não haja ramificação observada, os líderes ascendentes podem desenvolver bifurcações laterais, induzidas por ramificações dos líderes descendentes. Em seus resultados, obtiveram velocidade de LAC = $1,6 \times 10^5$ e LANC = 6×10^4 m/s (compatíveis com a literatura).

Sob as mesmas disposições dos equipamentos, em 2010, no trabalho publicado por Visacro et al. (2010) foram descritas características quantitativas dos pulsos de corrente de LANCs. Os autores adquiriram 75 amostras desses pulsos, e a média do valor de pico de corrente foi de 86 A. Para as mesmas 75 amostras, o intervalo médio entre pulsos foi de 69 μ s.

Figura 2.14 – Processo de iniciação do líder ascendente a partir da intensificação do campo produzida pelo líder escalonado.



Fonte: Visacro; Guimaraes e Murta Vale (2017).

O trabalho publicado por Nag et al. (2021) contém informações de pulsos de corrente produzidos por 8 LANCs. As tentativas de conexão partiram de um para-raios do tipo *Franklin* de 6,2 m de comprimento, instalado no topo de uma torre metálica 91,5 m, localizada em terreno plano (Figura 1 de Nag et al. (2021)). A instrumentação utilizada para aquisição de corrente, foram sensores do tipo *Shunt* e bobina de *Rogowski*. Informações sobre as DR (ponto de contato com o solo e I_p) foram obtidas através do sistema de localização de descargas no local. Não foram utilizados sensores de campo elétrico, ou câmera rápida.

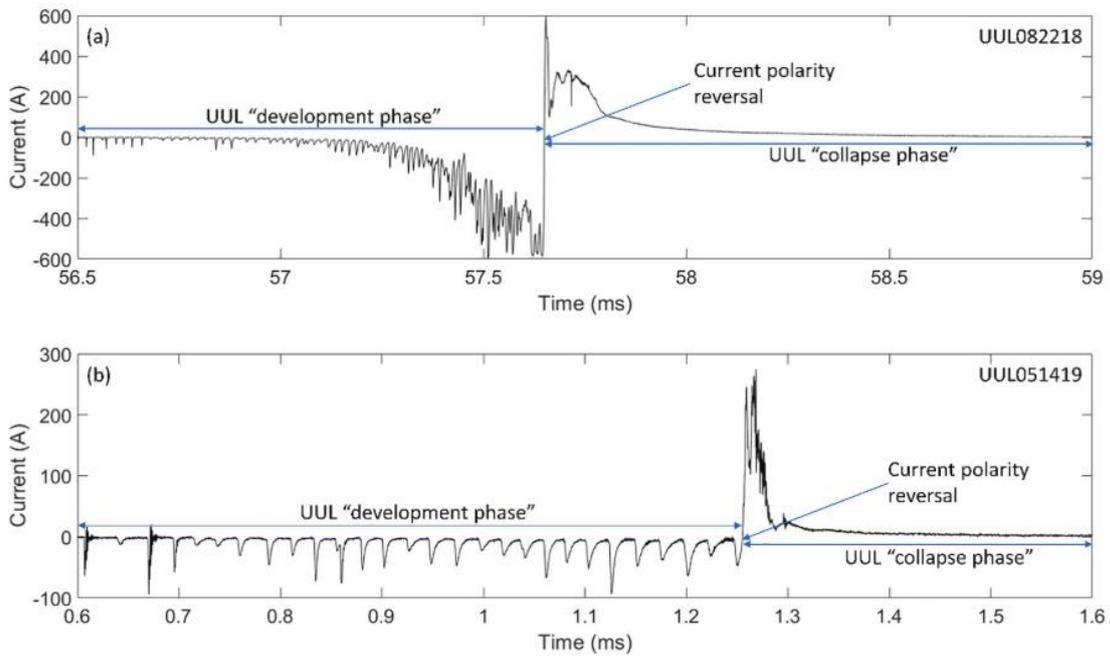
O trabalho apresenta informações de oito LANCs que ocorreram no período de agosto de 2018 a novembro de 2019. Os gráficos contendo os pulsos de corrente elétrica dos eventos A (UUL082218) e B (UUL051419), são apresentados na Figura 2.15. Para o evento A, o I_p da DR foi -20,1 kA, ponto de contato com o solo a 393 m do local do evento. A maior amplitude do sinal de corrente do LANC foi de 599 A. A amplitude do sinal de corrente no colapso foi de -595 A.

A DR que induziu o evento B, ocorreu a 664 m de distância da torre com I_p de -26,1 kA. A fase de desenvolvimento teve duração de 686 μ s. A amplitude no sinal de corrente com maior valor durante o desenvolvimento do LANC foi de 94 A e no colapso -274 A. A polaridade dos pulsos apresentados nos gráficos foi definida, pelo autor, a partir da polaridade da carga transferida para o solo. Dessa maneira, durante a fase de desenvolvimento do LANC, as cargas transferidas para o solo foram negativas. Ao colapsar, as cargas passam a ser positivas.

Em suas análises, Nag et al. (2021) ressalta que o canal do LANC é formado por cargas positivas, e por consequência transfere cargas negativas para o solo. Por isso, esses fenômenos podem ser considerados bipolares. Para os oito eventos analisados, valores médios dos dados são destacados: a) carga transferida para o canal do LANC de 6,4 mC; b) amplitude do sinal de corrente, durante a fase de desenvolvimento, 30.1 A; d) intervalo entre pulsos 20 μ s.

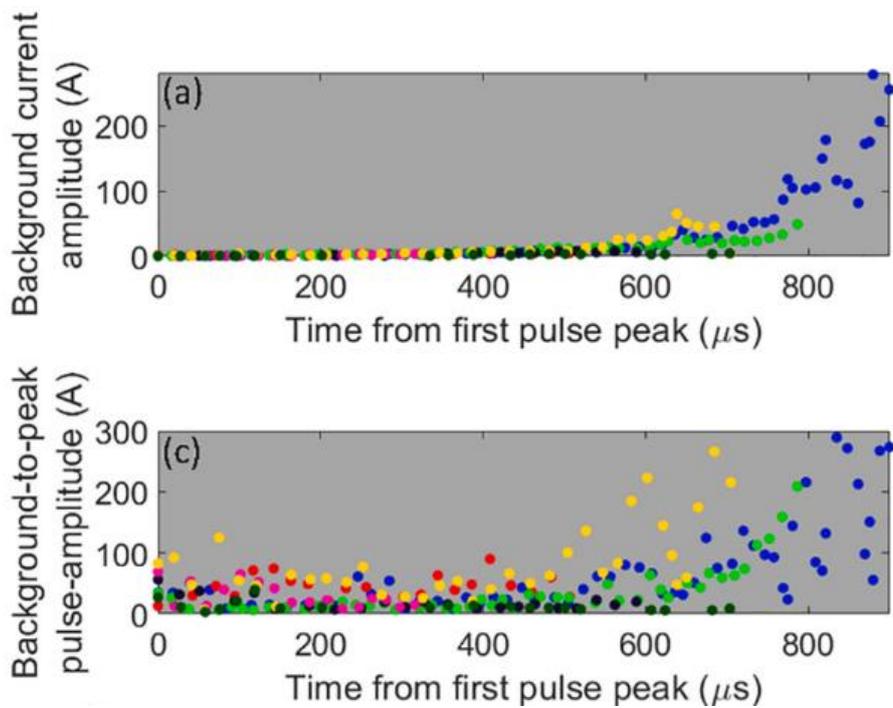
Em suas conclusões, Nag et al. (2021) ressaltam que a ausência de imagens obtidas através de câmera rápida impede a associação dos pulsos de corrente medidos com a extensão do canal do LANC durante o seu desenvolvimento. Apresentando a amplitude dos pulsos de corrente em relação ao tempo da fase de desenvolvimento na figura 6 ac de seu trabalho (Figura 2.16), o autor infere que esse aumento de amplitude observado está diretamente relacionado à extensão do canal do LANC. A extensão estimada do LANC é próxima de 100 m e que essa estimativa poderá ser constatada a partir da análise visual do evento.

Figura 2.15 – Pulsos de LANC obtidos por Nag et al.



Fonte: Nag et al. (2021).

Figura 2.16 – Gráfico de amplitude dos pulsos de corrente relacionados ao período da fase de desenvolvimentos do eventos analisados por Nag et al.



Fonte: Adaptado de Nag et al. (2021).

Além dos valores de medida de corrente apresentados, destaca-se ainda, o modelo criado pelos pesquisadores Becerra; Cooray (2009). Os autores apresentam dados obtidos através do modelo SLIM (do inglês *Self-consistent Lightning Interception Model*) que estuda o processo de conexão de líderes descendentes com estruturas no solo. O SLIM não prevê apenas as condições nas quais LACs e LANCs se iniciam, mas também estima a corrente e velocidade de propagação desses líderes. Durante o desenvolvimento do modelo, os valores obtidos apresentaram excelentes resultados quando comparados aos experimentos de raios induzidos, desenvolvidos por Willett; Davis; Laroche (1999).

A tabela 1 do trabalho de Becerra; Cooray (2009) apresenta valores de carga transferida para o canal do LANC para duas situações: I_p da DR de 30 kA, a carga é próxima de 420 μC ; I_p da DR de 80 kA, carga próxima a 1.640 μC . Posteriormente, no trabalho publicado pelos autores (COORAY; BECERRA, 2012) o valor da densidade linear de cargas do LANC foi estimado em $6,5 \times 10^{-7}$ C/m. Os valores obtidos através do modelo SLIM serão comparados aos dados adquiridos em campo, neste trabalho.

Miki et al. (2009) analisou a densidade linear de cargas em LANCs produzidos por uma chaminé de aproximadamente 200 m de altura, no Japão. Em seus resultados obteve uma densidade de cargas de aproximadamente 2×10^{-4} C/m.

2.3.1.5 Descarga de retorno

A DR ocorre no instante em que o líder descendente se conecta ao solo e é caracterizada por um I_p muito intenso. Esse I_p é acompanhado de máxima intensidade de luz e estrondoso som, o trovão. Cerca de 80% dos raios negativos possuem múltiplas DR, e apenas 20% apresentam uma única DR. Os raios de polaridade positiva, em aproximadamente 80% dos casos, produzem apenas uma DR e, conseqüentemente, uma única terminação no solo (SABA; BALLAROTTI; PINTO, 2006). A Tabela 2.2 adaptada de Rakov; Uman (2003) apresenta as principais características da DR de um líder negativo.

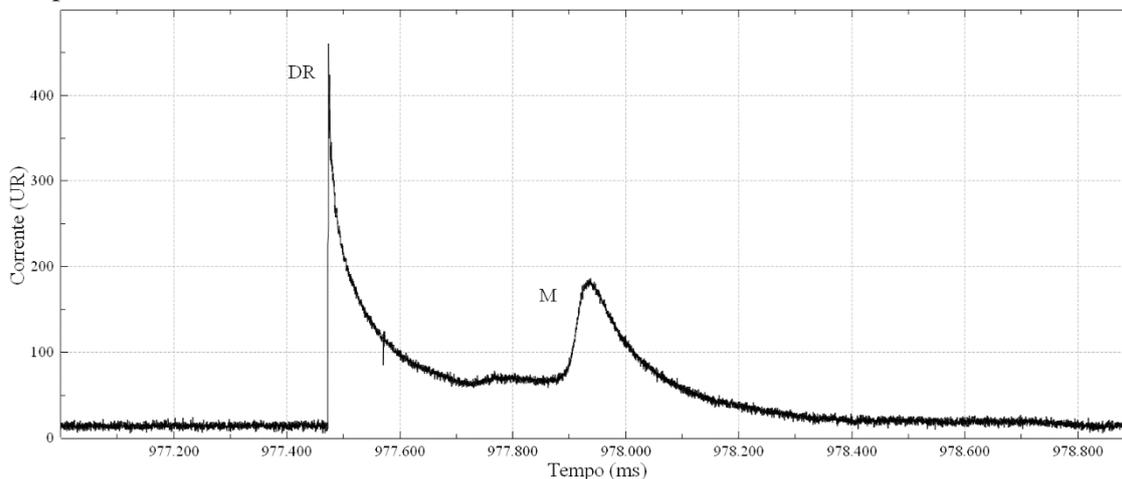
Tabela 2.2 – Principais características de uma descarga de retorno negativa.

Descarga de retorno	
Parâmetro	Valores típicos
Pico de corrente (kA)	30
Máxima taxa de aumento da corrente (kA/μs)	10 – 20
Tempo de subida da corrente, 10 – 90% (μs)	5
Duração do pico de corrente (μs)	70 – 80
Carga transferida (C)	5
Velocidade de propagação (m/s)	(1 – 2) x 10 ⁸
Raio do canal (cm)	~1 – 2
Temperatura do canal (K)	~30.000

Fonte: Adaptado de Rakov; Uman (2003).

A quantidade de carga transferida durante uma DR é significativa e o tempo em que isso acontece é da ordem de alguns microssegundos. Como consequência, picos de corrente da ordem de quilo amperes são gerados. O valor médio do I_p de um raio negativo é de aproximadamente 30 mil amperes, enquanto de um raio positivo está próximo a 52 mil amperes (RAKOV; UMAN, 2003). Um exemplo de sinal de corrente da DR é apresentado na Figura 2.17.

Figura 2.17 – Pulso de corrente registrado para uma descarga de retorno seguido de uma componente M.



Fonte: Produção da autora.

2.3.1.6 Corrente contínua

Após o pico de corrente de uma DR, a corrente que flui pelo canal pode cessar. No entanto, em alguns casos ela pode vir seguida por uma corrente de longa duração e baixa intensidade chamada corrente contínua.

Essa corrente é de baixa intensidade (cerca de dezenas a centenas de ampères) e percorre o canal do raio com duração de unidades a centenas de milissegundos. A CC mantém o canal do raio conectado à estrutura, podendo causar severos danos no local de contato. A CC longa está presente em cerca de 70% dos raios positivos, e em 30% dos raios negativos (SABA; BALLAROTTI; PINTO, 2006). A Tabela 2.3 apresenta alguns parâmetros relacionados à corrente contínua descritos por Rakov; Uman (2003).

Tabela 2.3 – Características da corrente contínua para um raio negativo.

Corrente contínua	
Parâmetro	Valores típicos
Magnitude (A)	100 – 200
Duração (ms)	~100
Carga transferida (C)	10 – 20

Fonte: Adaptado de Rakov; Uman (2003).

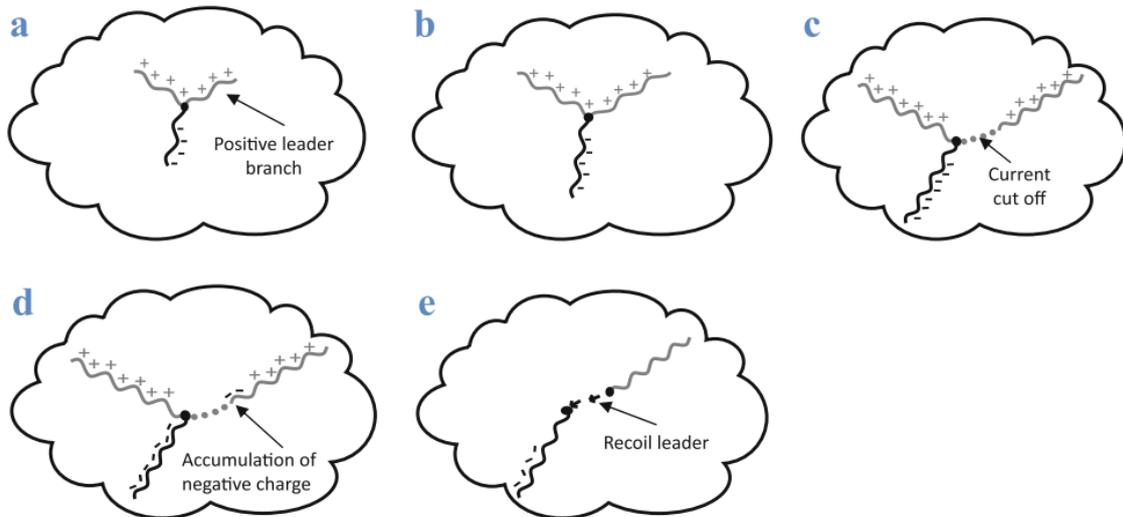
2.3.1.7 Líder de retorno

Um processo recorrente durante o desenvolvimento, e após a conexão dos líderes positivos, são os líderes de retorno. Em raios negativos, que tocam o solo, esses líderes de retorno ocorrem no interior da nuvem, onde a polaridade positiva do raio está se propagando. Ainda não se sabe ao certo como esses líderes são iniciados. Entretanto, baseado em observações experimentais é possível simular o processo envolvido na sua formação.

Em seu livro Cooray (2015) apresenta uma situação em que o canal de polaridade negativa do líder bidirecional se propaga em direção ao solo, enquanto dois outros canais de polaridade positiva se desenvolvem no interior da nuvem (Figura 2.18a,b). Supondo-se que a condutividade de um dos canais positivos decaia, ocorrerá a quebra deste canal na origem (Figura 2.18c). O líder deste mesmo canal continua se propagando, e carga negativa passa a se acumular na extremidade mais próxima ao local de quebra do canal

(Figura 2.18d). Quando a quantidade de carga negativa acumulada no canal alcança um valor crítico (i.e. excede o valor necessário para que ocorra a quebra de rigidez), um líder negativo é iniciado neste local, se propagando em direção ao local de quebra do canal, reestabelecendo a condutividade (Figura 2.18e). Esse líder de polaridade negativa é chamado líder de retorno.

Figura 2.18 – Processo de desenvolvimento dos líderes de retorno.



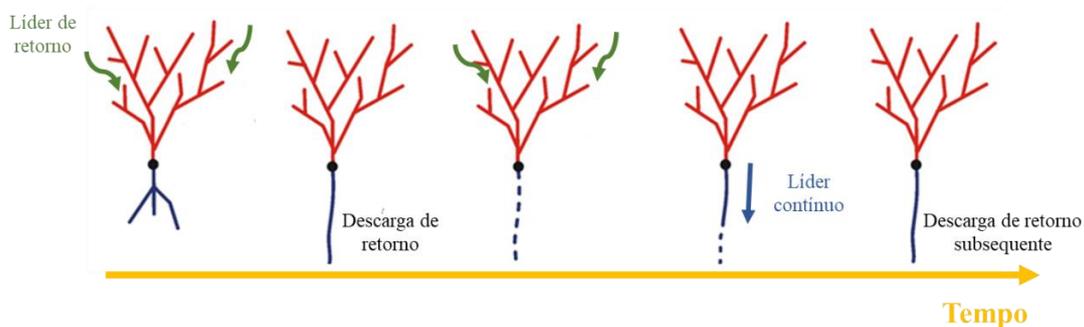
Fonte: Cooray (2015).

Caso o líder de retorno ocorra após a primeira conexão com o solo, quando o canal do raio decai, diferentes processos físicos poderão ocorrer como consequência do líder de retorno: (a) uma componente M; (b) uma tentativa de líder; (c) um líder contínuo; (d) um líder contínuo escalonado de uma nova descarga de retorno subsequente.

Quando o canal do raio se mantém ativo por intermédio de uma CC, os líderes de retorno que ocorrem no líder positivo dentro da nuvem realimentam essa CC intensificando-a abruptamente. Essa intensificação na corrente gera, por consequência, uma intensificação da luminosidade no canal principal conectado ao solo. Essas intensificações são chamadas de componentes M. A Figura 2.17 apresenta a forma de onda de uma DR seguida de uma componente M.

Quando uma DR termina, os líderes de retorno podem dar origem a uma tentativa de líder. Essa descarga percorre o caminho do canal principal, mas não chega a conectar-se ao solo. Os que conseguem retraçar o canal da primeira DR até o solo são chamados de líderes contínuos. A Figura 2.19 ilustra o processo de interação dos líderes de retorno com o canal ionizado pela DR. Cerca de 50% dos raios negativos usam o mesmo canal traçado anteriormente para a propagação das descargas de retorno subsequentes. Os outros 50% abandonam o canal principal e dão origem a uma descarga de retorno subsequente em um novo canal.

Figura 2.19 – Líderes de retorno retraçando o canal da descarga de retorno.



Fonte: Adaptado de Cooray (2014).

2.3.1.8 Descarga de retorno subsequente

A todas as descargas de retorno que ocorrem após a primeira DR, damos o nome de descarga de retorno subsequente (DRS). As DRS podem seguir pelo mesmo canal da DR, ou criar um canal independente, atingindo o solo em pontos distintos. A Figura 2.20 apresenta uma foto de longa exposição tirada durante a ocorrência das múltiplas descargas de retorno de um raio negativo. Cerca de 80% dos raios negativos possuem múltiplas DR, enquanto que para os raios positivos isso ocorre em apenas 20% dos casos (SABA; BALLAROTTI; PINTO, 2006). Observações experimentais indicam que as DRS costumam ter um I_p menor que a primeira DR.

Figura 2.20 – Descargas múltiplas de um raio descendente negativo.



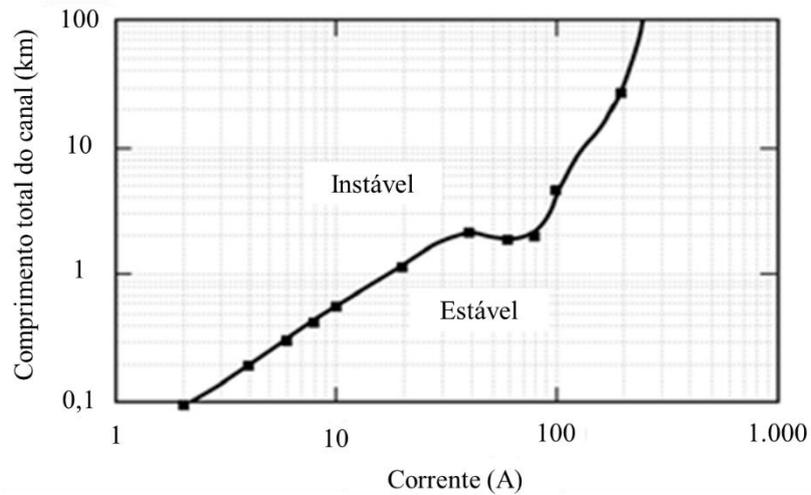
Fonte: INPE (2015).

2.3.1.9 Estabilidade do canal

A CC é responsável por manter o canal principal ativo e quanto maior a extensão vertical do canal, mais alta deve ser esta corrente. Esse fator implica na questão da multiplicidade de DR de um raio negativo. Sua corrente não é alta o suficiente para manter o canal ativo por muito tempo, assim ocorre a quebra do canal. A Figura 2.21 mostra o comprimento do canal principal (em quilômetros) e o valor da corrente necessária para mantê-lo estável.

Conectado ao solo, o raio positivo possui maior estabilidade devido a intensa corrente que passa pelo seu canal. Contudo, para o raio descendente negativo ocorre uma situação diferente pois o líder que se propaga no interior da nuvem, alimentando com cargas o canal descendente, é o de polaridade positiva. Sendo a sua velocidade média de propagação e quantidade de ramificações inferior ao do líder negativo, o líder positivo não fornece corrente suficiente para manter a estabilidade do canal descendente negativo desestabilizando-o e fazendo com que o número de DRS seja maior.

Figura 2.21 – Gráfico de estabilidade do canal.



Comprimento do canal (km) em relação a corrente contínua (A). Quanto maior a extensão vertical do raio, maior deverá ser a corrente elétrica fluindo pelo canal para mantê-lo estável.

Fonte: Adaptado de Heckman (1992).

2.3.2 Classificação dos raios

2.3.2.1 Raios intranuvem

Do total de ocorrência, 80 a 90% dos raios são intranuvem e os 10 a 20% restantes atingem o solo (RAKOV; UMAN, 2003). Essa diferença se dá devido ao menor caminho para uma descarga se propagar em meio aos centros de cargas localizados no interior da nuvem. A Figura 2.22 apresenta uma imagem de raio intranuvem.

Figura 2.22 – Raio intranuvem.



Fonte: INPE (2015).

2.3.2.2 Raios descendentes

Os raios descendentes são aqueles que têm origem no interior da nuvem e se conectam ao solo. A extremidade inferior do canal pode conter uma carga líquida de polaridade negativa (Figura 2.23) ou positiva (Figura 2.24).

2.3.2.2.1 Polaridade negativa

São responsáveis por cerca de 80% de todas as descargas descendentes e ocorrem geralmente no início da tempestade (RAKOV; UMAN, 2003). Em geral, são mais ramificados e produzem mais terminações que tocam o solo.

2.3.2.2.2 Polaridade positiva

Ocorrem geralmente no final da tempestade e, em geral, constituem a minoria dos raios descendentes, correspondendo de 8 a 10% do total (RAKOV; UMAN, 2003). Embora ocorram com menor frequência, os raios positivos são responsáveis por danos maiores devido à maior transferência de carga elétrica, se comparado aos das descargas negativas.

Figura 2.23 – Raio descendente negativo.



Fonte: INPE (2015).

Figura 2.24 – Raio descendente positivo.



Fonte: Warner (2012).

2.3.2.3 Raios ascendentes

Os raios ascendentes ocorrem em sua maioria no final da tempestade em resposta à perturbação na nuvem causada geralmente por líderes negativos associados a descargas

intranuvem ou a raios descendentes positivos (SABA et al., 2016). Estes líderes negativos percorrem a base da nuvem de tempestade e, se a sua trajetória passar próximo ou por sobre edificações ou estruturas, pode dar origem a líderes ascendentes partindo destas mesmas estruturas, iniciando assim raios ascendentes (Figura 2.25). Essa iniciação se deve à uma súbita perturbação no campo elétrico intenso existente na extremidade da estrutura.

Figura 2.25 – Raio ascendente.



Fonte: INPE (2015).

A denominação da polaridade do raio ascendente se dá, por convenção, pela transferência de carga ao solo e não pela polaridade do líder ascendente. Assim, um líder ascendente positivo, dá origem a um raio ascendente negativo pois este transfere carga negativa ao solo (SABA et al., 2016; SCHUMANN et al., 2019).

2.4 Proteção contra raios

A seguir é apresentada uma breve descrição de como os sistemas de proteção contra raios atuam em estruturas localizadas no solo protegendo equipamentos e pessoas em seu

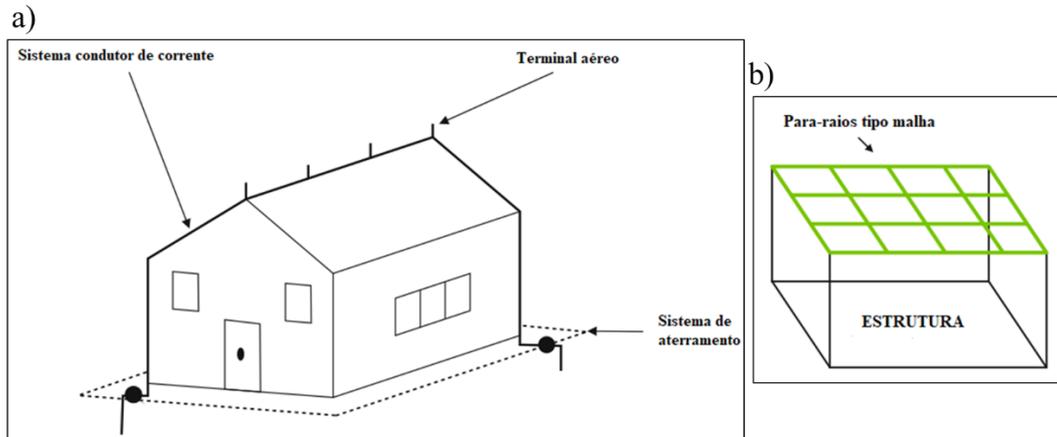
interior, ou próximas a elas. São apontados também os danos materiais e lesões provocadas em pessoas atingidas direta ou indiretamente por raios.

2.4.1 Sistema de proteção contra descargas atmosféricas

A ocorrência de uma descarga direta em edificações ou estruturas pode causar sérios danos. A maior parte desses danos pode ser evitada com a implantação de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA). A proteção adequada foi inventada por Benjamin Franklin: uma haste condutora que serve de caminho para a corrente elétrica do raio. Com o passar dos anos, esse sistema de captação foi aprimorado e atualmente conta com uma estrutura capaz de proteger tais edificações. O sistema externo de proteção é composto por três principais componentes: terminação aérea (para-raios) que pode ser do tipo *Franklin* ou malha (*gaiola de Faraday*); sistema condutor de corrente e; sistema de aterramento, Figura 2.26. O terminal aéreo tem a função de interceptar o líder descendente fazendo com que a corrente elétrica proveniente da descarga de retorno seja transferida pelo sistema condutor de corrente até o sistema de aterramento, onde a corrente é dissipada.

Caso o SPDA externo não seja implantado corretamente na edificação, uma série de acidentes podem ocorrer resultando em danos ou perdas materiais. No caso de a estrutura apresentar cobertura inflamável (madeira, tecido, etc.), a corrente contínua longa de uma descarga elétrica pode manter contato durante algumas dezenas de milissegundos fazendo com que a cobertura seja tomada pelas chamas. Caso o raio atinja coberturas metálicas, as altas temperaturas do canal podem derreter o material criando furos, onde centelhas da descarga elétrica podem saltar para o interior da edificação ou da estrutura causando ferimentos à pessoas e/ou equipamentos eletrônicos. Estruturas de concreto, ao serem atingidas por raios, podem sofrer danos devido a vaporização d'água. A Figura 2.27 ilustra o dano causado à estrutura de concreto atingida por uma descarga descendente.

Figura 2.26 – Modelos de SPDA externos.



SPDA externo, em a) para-raios tipo *Franklin*; b) para-raios tipo malha (gaiola de *Faraday*).

Fonte: Adaptado de Cooray (2015).

Figura 2.27 – Exemplo de ruptura no concreto por expansão da água acumulada nas fissuras.



Fonte: INPE (2015).

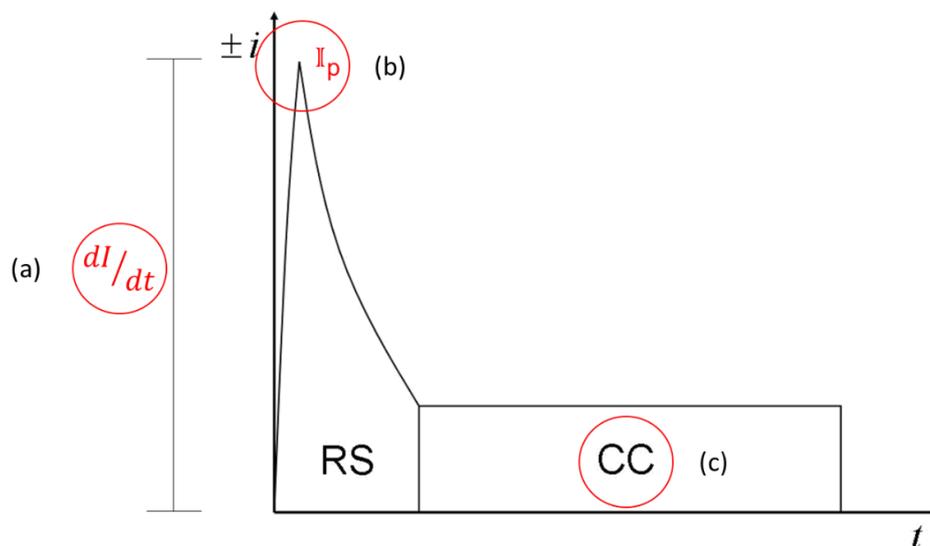
Na hipótese de o SPDA externo não ser instalado corretamente, a corrente do raio não será aterrada de maneira correta e, por consequência, terá acesso ao sistema elétrico local. Faíscas podem saltar das tomadas presentes no interior dessas construções. Os equipamentos ligados à rede elétrica podem ser danificados e até mesmo causar danos físicos às pessoas próximas a eles.

A posição do para-raios é considerada adequada se a estrutura a ser resguardada estiver integralmente situada dentro do volume de proteção provido pelo sistema de captação. São três os métodos para determinar a posição correta do para-raios: método da esfera rolante; método do ângulo protetor e; método da malha (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

2.4.2 Danos e perdas materiais

SPDA externos e internos têm a função de reduzir os danos físicos no sistema elétrico (componente de alimentação em baixa tensão) e eletrônico (eletrodomésticos, eletroeletrônicos etc.) da edificação, devido ao contato direto ou indireto (por indução) com descargas atmosféricas. Os raios descendentes oferecem três diferentes riscos para estruturas: (a) a variação da corrente no tempo (di/dt); (b) o pico de corrente (I_p) e; (c) corrente contínua (CC) (Figura 2.28).

Figura 2.28 – Ilustração dos três momentos nos quais a corrente do raio pode causar danos.



Fonte: Produção da autora.

A variação de corrente causada pela DR (da ordem de dezenas de quiloampères em microssegundos) causa uma forte indução de corrente em circuitos elétricos próximos. A

tensão induzida nos circuitos será proporcional à variação da corrente e à área exposta do circuito e, inversamente proporcional à distância do circuito ao raio. Essa repentina variação induz um campo magnético muito intenso que, ao atravessar um circuito fechado, gera uma corrente no material condutor.

Pela Lei de Ampère, o campo magnético (B) gerado por uma corrente elétrica (i), é calculado através da Equação 2.1.

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad (2.1)$$

onde r é a distância em que o circuito se encontra do ponto de contato do raio no solo e; μ_0 a permeabilidade magnética no vácuo.

A variação desse campo B no tempo é dada pela Equação 2.2.

$$\frac{dB}{dt} = \frac{\mu_0}{2\pi r} \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

Portanto, a variação da corrente gerada pela DR no tempo pode ser calculada pela Equação 2.3.

$$\frac{di}{dt} = \frac{2\pi r}{\mu_0} \frac{dB}{dt} \quad (2.3)$$

A tensão induzida em um circuito condutor (força eletromotriz, ϵ) é obtida pela Equação 2.4.

$$\varepsilon = \int E dl = -\frac{d}{dt} \int B da \quad (2.4)$$

onde E é o campo elétrico induzido no circuito.

A integral do campo B na área (A) do circuito condutor, equivale ao fluxo magnético (ϕ_m) conforme representado na Equação 2.5.

$$\int B da = \phi_m \quad (2.5)$$

Para um campo uniforme B , a força eletromotriz pode ser expressa pela Equação 2.6.

$$\varepsilon = -\frac{d}{dt} \phi_m = \frac{d}{dt} BA \quad (2.6)$$

Substituindo o valor do campo magnético da Equação 2.1 na Equação 2.6, obtém-se a Equação 2.7.

$$\varepsilon = -\frac{\mu_0}{2\pi r} \frac{di}{dt} A \quad (2.7)$$

Assim, como o valor da variável r depende do local onde a DR toca o solo, raios distantes produzem induções menores. Descargas subsequentes, costumam apresentar um maior valor de di/dt e, portanto, maior indução. Por fim, quanto maior a área exposta do circuito, maior a indução.

Além da variação da corrente, ocorre um aumento da variação do potencial, como consequência do rompimento do isolamento elétrico de materiais. Um exemplo desse tipo

de dano é apresentado na Figura 2.29, onde um circuito de distribuição de energia foi severamente danificado por efeito de um raio. Já a corrente contínua, pela sua longa duração é responsável pelos danos térmicos, sendo associada, por exemplo, à combustão de elementos inflamáveis e ao derretimento de materiais diversos (Figura 2.30).

Figura 2.29 – Circuito de distribuição de energia danificado por raio.



Fonte: INPE (2015).

Figura 2.30 – Derretimento de uma haste metálica pela corrente contínua.



Fonte: INPE (2015).

2.4.3 Lesões em pessoas

Quando a corrente produzida pelo raio atravessa o corpo de uma pessoa, em questão de microssegundos, alcança estruturas internas carregando-as eletricamente. Assim que a quebra de rigidez na superfície do corpo do indivíduo é atingida, uma descarga elétrica flui através dele, até que a corrente interna seja reduzida drasticamente (COOPER; HOLLE, 2019).

Durante o tempo em que a corrente permanece no interior da vítima, paradas cardíacas e ou respiratórias podem ocorrer, principalmente se o coração estiver no caminho percorrido pela corrente. Em seu trabalho, Cooper; Holle; Andrews (2010) catalogaram cinco mecanismos pelos quais pessoas podem sofrer ferimentos pela corrente elétrica produzida pelo raio (Figura 2.31), são eles:

2.4.3.1 Descarga direta

Ocorre quando o raio atinge diretamente a vítima (Figura 2.31a). Na maioria dos casos esse tipo de acidente acontece em áreas descampadas, quando o indivíduo não encontra um local adequado para proteção. Dentre os cinco tipos, a fatalidade por descarga direta é de 3 a 5% do total.

2.4.3.2 Lesão por contato

Quando a vítima está em contato com um objeto atingido pelo raio, uma diferença de potencial é gerada entre eles (Figura 2.31b), resultando em uma corrente que flui através de ambos. A ocorrência desse tipo de dano é de 3 a 5% do total.

2.4.3.3 Descarga lateral

Descargas laterais ocorrem quando o raio atinge um objeto (poste, árvore, prédio) e, durante sua descida até o solo, descargas laterais são lançadas alcançando a vítima que está próxima a essas estruturas (Figura 2.31c). Esta é uma das causas mais frequentes de lesões em pessoas e animais, cerca de 30 a 35%. Por isso, o mais indicado é que no

momento de uma tempestade, o indivíduo permaneça longe de objetos altos. E, não havendo local seguro para se abrigar, fique de cócoras abraçada às pernas.

2.4.3.4 Tensão de passo

Esse tipo de lesão ocorre quando a corrente do raio flui pelo solo. Dada a resistividade do solo, uma diferença de potencial ocorre entre as pernas de uma pessoa ou patas de um animal (Figura 2.31d). A corrente irá fluir também através das pernas da pessoa, de um lado ao outro, causando lesões na parte de baixo do seu corpo. Esse tipo de lesão é responsável por 50 a 55% do total de vítimas de raios.

2.4.3.5 Líderes ascendentes

A terceira maior causa de danos em pessoas (cerca de 10 a 15%) corresponde a descargas ascendentes. Quando a vítima se encontra próxima ao local de contato da descarga descendente com o solo, descargas ascendentes podem sair de sua cabeça ou ombros na tentativa de conexão com aquela que desce (Figura 2.31e). Caso essa pessoa não seja atingida diretamente pela descarga, o LANC produzido pelo seu corpo (no decorrer de alguns milissegundos) colapsa retornando ao ponto de origem em poucos microssegundos. Essa injeção repentina de corrente no corpo de uma pessoa pode, em alguns casos, levar a morte.

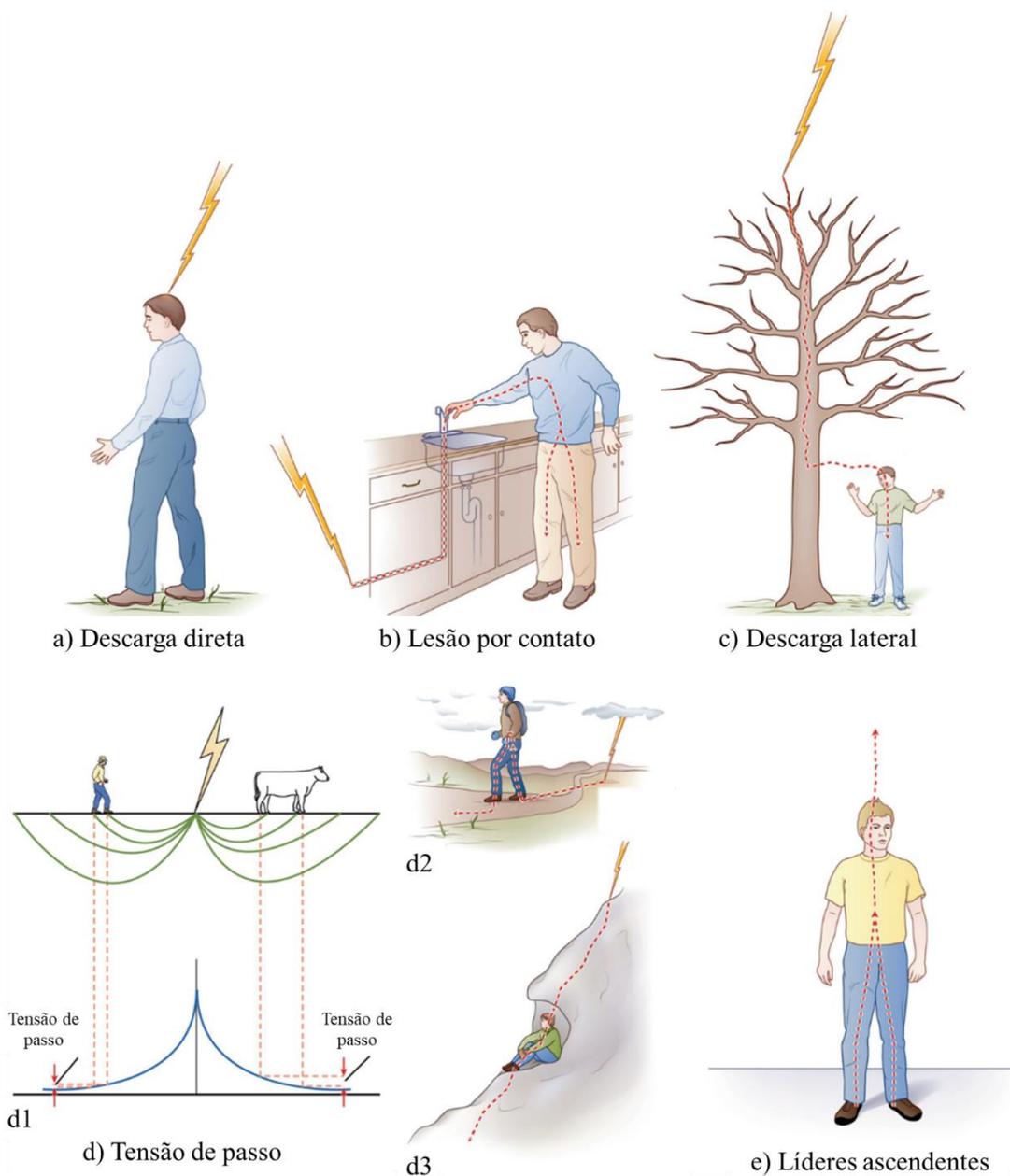
2.4.3.6 Mecanismos não elétricos

Em seu trabalho Hunt et al. (2020) menciona outros dois mecanismos que, mesmo não envolvendo a corrente elétrica do raio, também podem causar ferimentos em pessoas.

- a) Proximidade do local de conexão do raio. A onda de choque gerada pela abrupta expansão do ar, pode danificar a pele ou o tímpano da pessoa, e a intensidade luminosa do canal do raio, pode causar perda de visão.
- b) Efeitos secundários. Queda de lugares ou estruturas altas, devido a onda de choque. Queda de materiais pesados a partir de estruturas, galhos de árvores ou estilhaços de árvores atingidas por raios. Queimaduras devido a materiais

inflamáveis ao redor da conexão. Ondas de choque devido a explosões próximas a pessoa e possíveis traumas psicológicos.

Figura 2.31 – Mecanismos causadores de ferimentos em pessoas.



Fonte: Adaptado de Cooper; Holle (2019).

3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

3.1 Projeto P1P2

Com o objetivo de observar raios ascendentes que partiam do topo das torres localizadas no Pico do Jaraguá, câmeras de alta velocidade foram instaladas no bairro de Pirituba na cidade de São Paulo. A Figura 3.1 apresenta a visada do local de observação 1 (L1) onde as câmeras rápidas foram instaladas.

Figura 3.1 – Vista das câmeras rápidas instaladas.



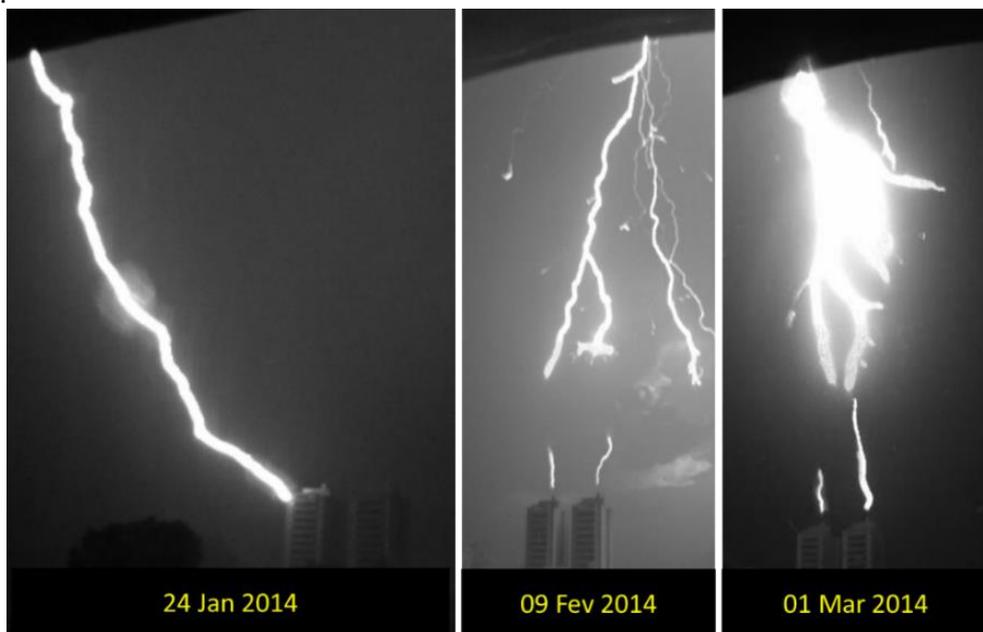
Fonte: INPE (2015).

Durante as centenas de registros desses raios, foram observadas diversas conexões entre raios descendentes e os para-raios dos prédios situados dentro do campo de visada das câmeras. Vários LANCs também foram observados. Alguns desses registros, são apresentados na Figura 3.2.

O tempo necessário para que o para-raios responda ao líder descendente (seja por meio de LAC ou LANC) é menor que 1 ms. A partir da análise de 8 tentativas de conexão, Nag et al. (2021) concluiu que essa resposta pode durar, em média, 789 μ s. Dessa forma, mesmo sendo sempre presente na conexão de um líder a um para-raios, a percepção de tal fenômeno é impossível a olho nu. Para que fosse possível registrar esse fenômeno, câmeras de alta velocidade foram utilizadas. Outros instrumentos foram instalados no

topo de ambos os prédios para a aquisição de informações complementares dos processos físicos envolvidos nesses eventos.

Figura 3.2 – Conexões de raios descendentes nos edifícios convencionais, localizados em São Paulo.



Imagens de conexões registradas durante o período de observação das descargas ascendentes.

Fonte: INPE (2015).

O projeto acima descrito foi nomeado P1 P2 (prédio 1, prédio 2) e teve duração nos verões entre os anos de 2015 e 2019. As análises feitas neste trabalho foram dos dados obtidos pelos sensores de corrente e campo elétrico, além de imagens feitas através de câmeras de alta velocidade. A Tabela 3.1 apresenta a relação dos equipamentos utilizados durante as campanhas, local e ano de instalação.

Tabela 3.1 – Equipamentos utilizados durante as campanhas de aquisição de dados.

Equipamento	Local	Instalação
Câmera <i>Phantom V12</i>	L1	2012
Câmera <i>Phantom V711</i>	L1	2012
Câmera convencional (30 fps)	L1	2015
Câmera convencional (30 fps)	L2	2015
Campo elétrico (ganho alto)	P2	2015
TC Pearson	P1	2015
TC Pearson	P2	2015

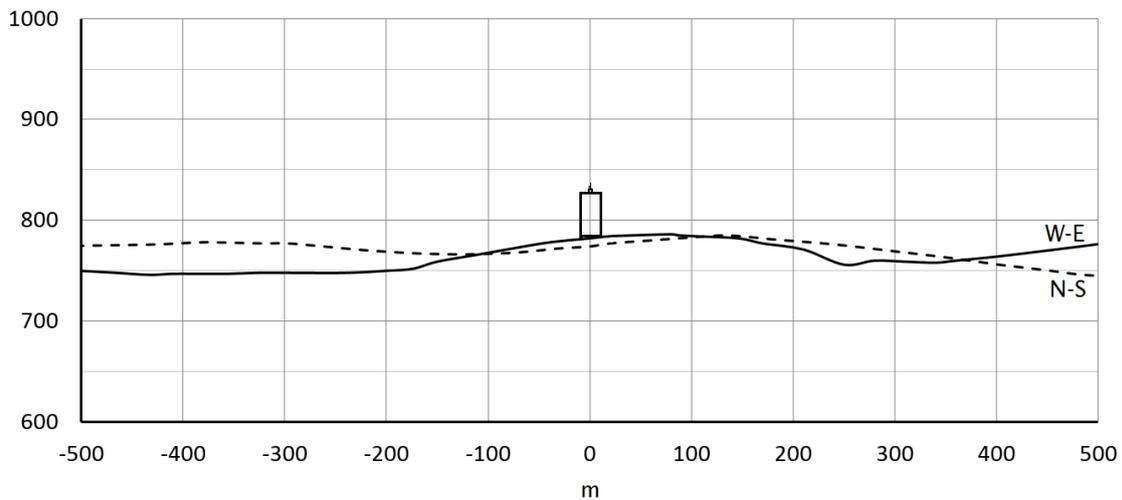
Fonte: Produção da autora.

3.2 Local de observação

Os dados de conexão e tentativa de conexão reunidos neste trabalho foram adquiridos na cidade de São Paulo – SP, (23.483°S, 46.728°O) região sudeste do Brasil, durante os verões de 2015-2016 (caso A) e 2016-2017 (casos B e C). A densidade de descargas atmosféricas na região é de 11 raios/km² por ano (ELAT/INPE, 2015). Neste local, os dois edifícios residenciais idênticos de 14 andares (denominados P1 e P2) eram monitorados por câmeras de alta velocidade situadas a uma distância de 200 m, instaladas no L1.

A Figura 3.3 apresenta a elevação aproximada do terreno, em metros, onde encontram-se os edifícios. A direção oeste a leste (O – L) é indicada pela linha sólida, a direção norte a sul (N – S) é indicada pela linha tracejada. O prédio está desenhado sobre a curva O – L, em escala.

Figura 3.3 – Representação da elevação do terreno onde os edifícios monitorados se encontram.

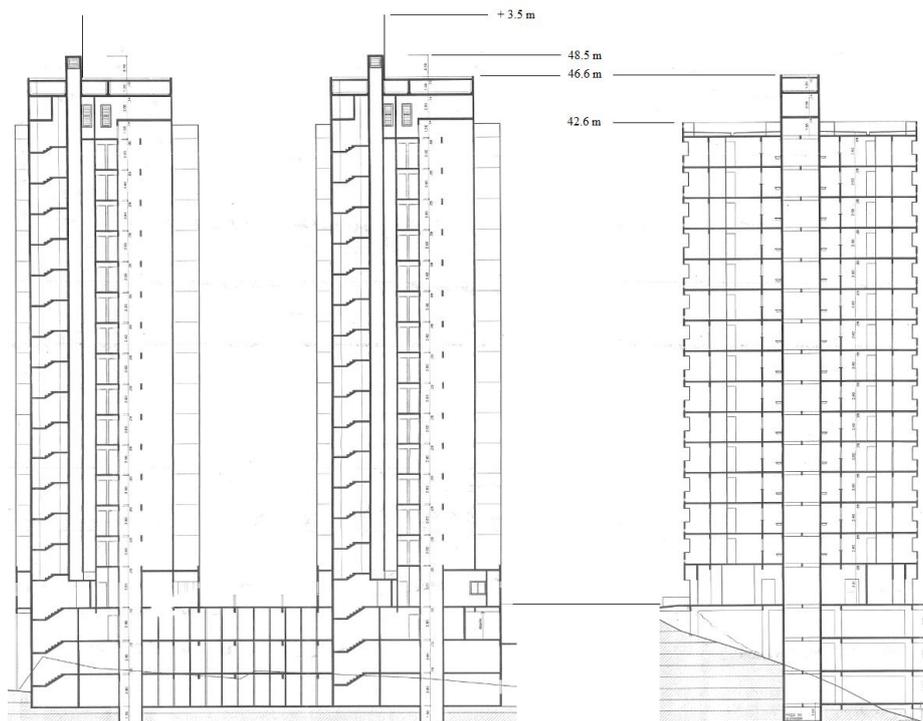


Fonte: INPE (2015).

A planta que apresenta a estrutura dos prédios, cedida pelo próprio condomínio, é apresentada pela Figura 3.4. Nela é possível verificar a altura da estrutura, bem como a altura do para-raios. Os prédios possuem SPDA externo, a terminação aérea encontrada no topo era do tipo Franklin. A extremidade desses para-raios estava a uma altura de 52 m do solo. As ferragens estruturais ao redor, são utilizadas como condutores de descida e seus subsistemas de captação são convencionais (hastes e condutores interligados, e estes interligados com as ferragens).

As hastes no centro de cada um desses prédios são relativamente altas e interceptam a maioria das descargas atmosféricas que os atingem. Há, porém, como dito anteriormente, registros de LANCs partindo das quinas desses prédios e até LAC, em alguns casos. Entretanto, isso não é um problema, uma vez que as bordas e quinas dos prédios estão devidamente protegidas por condutores do subsistema de captação.

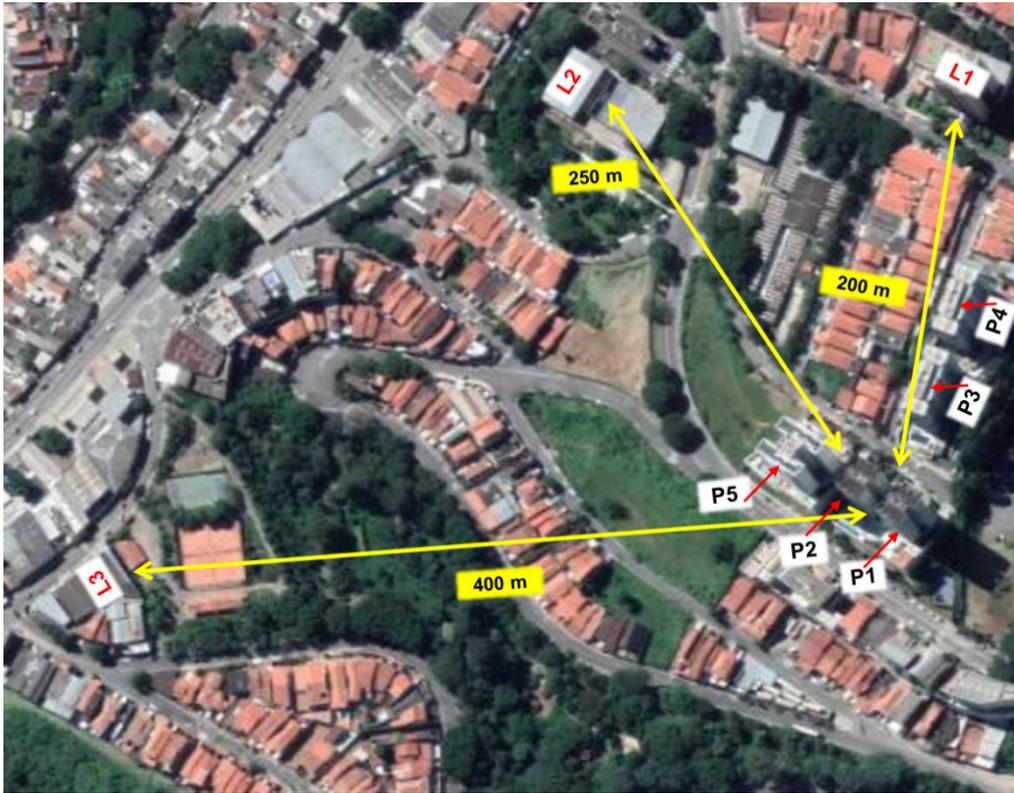
Figura 3.4 – Planta dos edifícios monitorados durante as campanhas.



Fonte: Condomínio Vila Florida (2014).

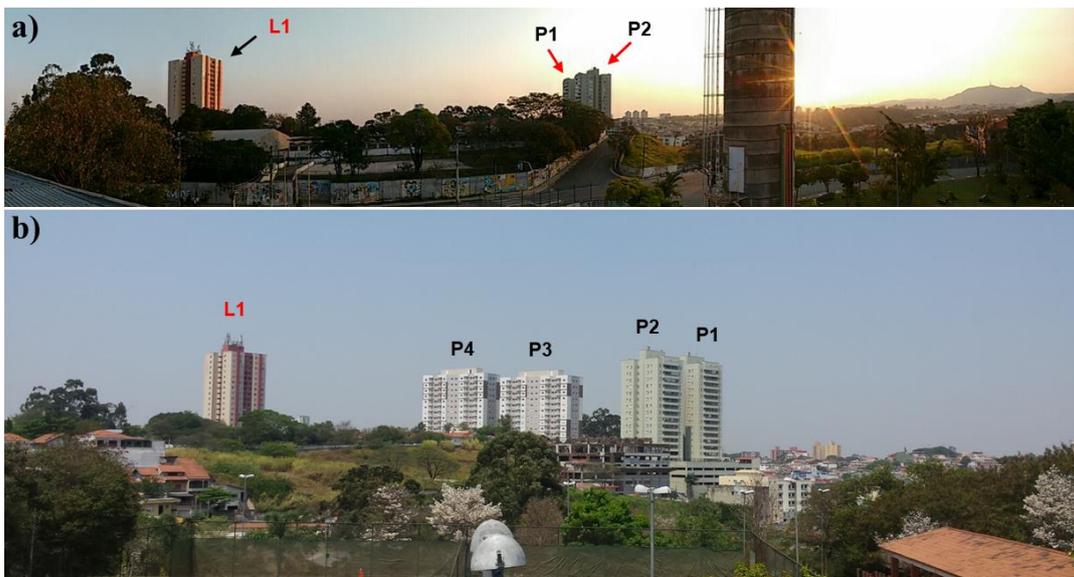
Câmeras comuns, instaladas em dois diferentes pontos ao redor dos prédios, denominado local de observação 2 e 3 (L2 e L3), também obtiveram registros de alguns dos casos apresentados. A Figura 3.5, retirada no *Google Maps*, apresenta a disposição das câmeras e sua distância aproximada em relação aos prédios. Também foram marcados outros três prédios (P3, P4 e P5) construídos no decorrer das campanhas realizadas. Houve formação de LANCs em duas dessas construções durante dois dos três casos registrados no P1 P2. A Figura 3.6 apresenta a vista do L2 e L3, onde as câmeras convencionais foram instaladas.

Figura 3.5 – Localização dos prédios P1 P2 e suas distâncias em relação as câmeras.



Fonte: Adaptado de *Google Earth* (2020).

Figura 3.6 – Visada dos locais de observação 2 e 3.



Vista do local de observação, em a) L2; b) L3.

Fonte: INPE (2017).

3.3 Equipamentos utilizados

3.3.1 Câmeras convencionais e de alta velocidade

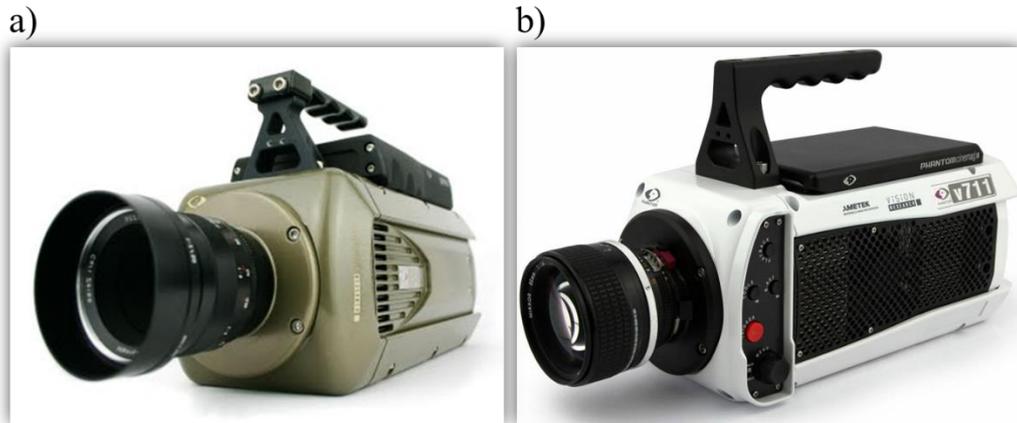
O raio é um fenômeno de duração extremamente curta, em média 0,4 s (BALLAROTTI et al., 2012). Assim, para observar as características visuais dos raios e obter o momento exato da sua conexão com o solo, é necessário o uso de câmeras rápidas, com capacidade de gravação de milhares de quadros por segundo. Por intermédio dessas câmeras, detalhes da propagação e de sua conexão com o solo podem ser obtidos e analisados de maneira minuciosa.

A observação de raios a partir de câmeras de alta velocidade, similares às utilizadas neste trabalho, iniciou-se por volta de 1978 com o trabalho de Waldteufel; Metzger (1980), o qual gravou uma descarga elétrica a 730 fps. No Brasil o uso delas para observação de raios começou no ano 2000 durante uma campanha de pesquisa no INPE (campus de Cachoeira Paulista) com o Dr. Carl Potvin (*Inst. De Rech. d'Hidro-Québec*) que trouxe uma câmera de alta velocidade operando a 1.000 fps.

Para a aquisição das imagens analisadas, foram utilizados dois modelos de câmeras rápidas da fabricante *Phantom (Vision Research's Phantom)*: V12 e; V711, Figura 3.7. As câmeras possuem sincronização com GPS. As aquisições foram feitas em tons de cinza (preto e branco), com taxas de aquisição superiores a 30.000 fps.

Na intenção de futuramente reconstruir uma projeção 3-D dos raios, além das câmeras de alta velocidade, imagens complementares, de outros eventos, foram adquiridas por câmeras convencionais, instaladas nos arredores dos prédios. Os modelos trabalhavam com uma resolução de 30 a 60 fps. Mais detalhes sobre as câmeras podem ser obtidos no trabalho de Schumann et al. (2019).

Figura 3.7 – Câmeras de alta velocidade.

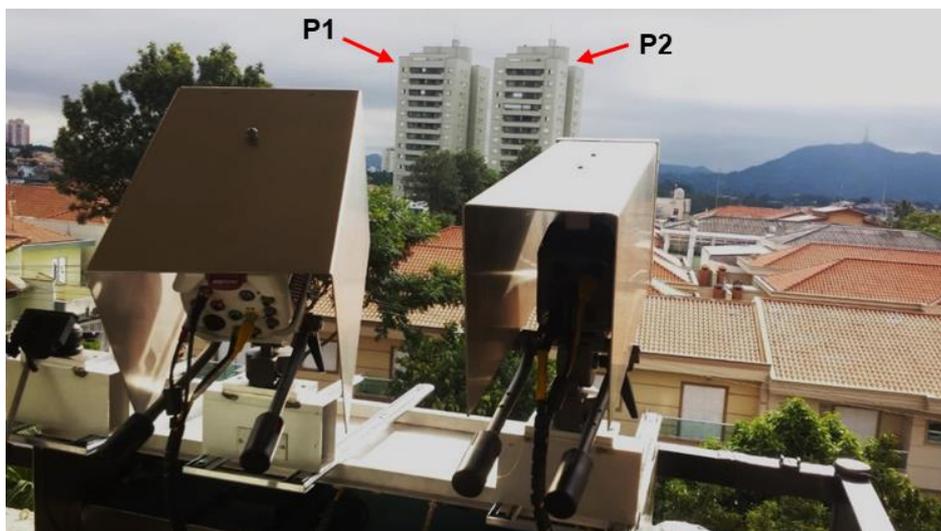


Em a) V12; b) V711

Fonte: *Phantom* (2021).

No L1 encontravam-se as câmeras V711 e V12. No L2 e L3 encontravam-se câmeras convencionais operando a 30 fps. A Figura 3.8 é uma foto feita no L1, apresentando a disposição das câmeras em relação aos prédios.

Figura 3.8 – Câmeras de alta velocidade direcionadas para o P1 P2.



Fonte: INPE (2013).

3.3.2 Sensor de campo elétrico

Todas as descargas atmosféricas estão diretamente associadas ao rápido movimento de cargas elétricas. O estudo da medida da variação do campo elétrico, associada a esse movimento de cargas, auxilia no entendimento dos principais processos físicos do raio. Neste trabalho, a medição da variação do campo elétrico foi feita a partir de um modelo de antena, do tipo prato, de dipolo simples (Figura 3.9). A antena foi instalada no topo do edifício P2. Permaneceu localizada a 4 m do para-raios do prédio 2 e a 22,5 m do para-raios do prédio 1.

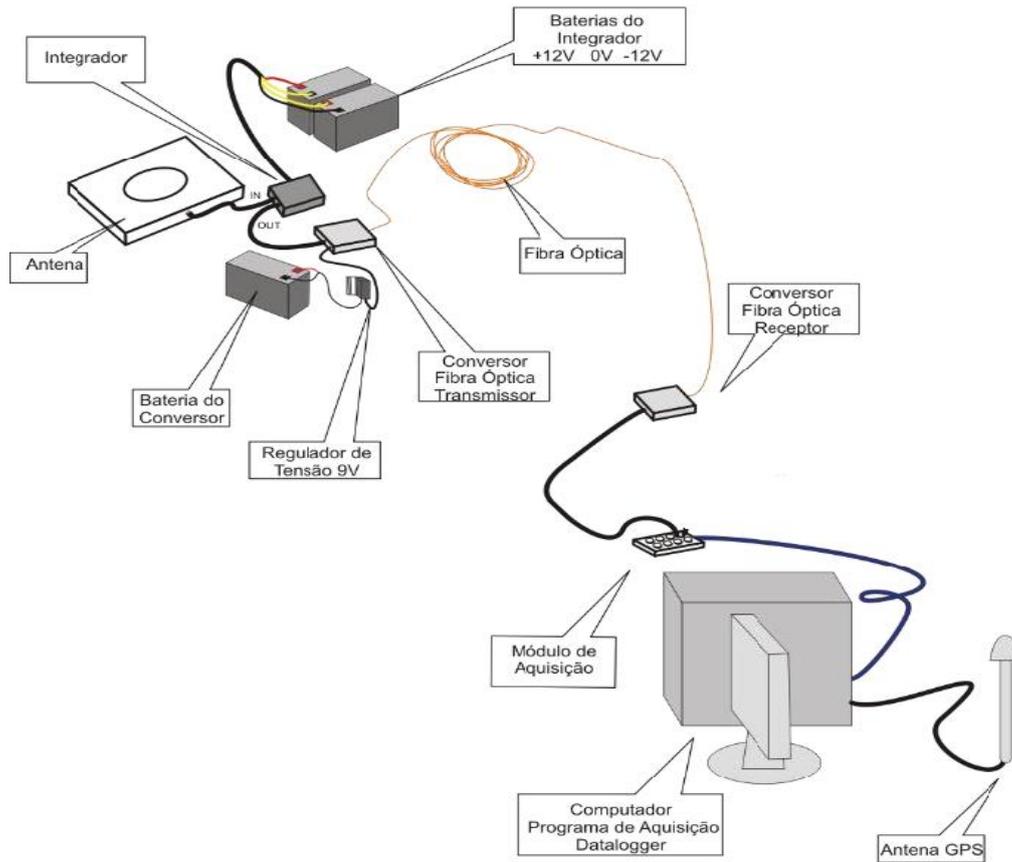
Figura 3.9 – Antena de campo elétrico utilizada.



Fonte: INPE (2016).

A antena tipo prato mede a derivada do campo elétrico no tempo. O sinal obtido passa por um integrador, que fornece o campo elétrico. A frequência de operação do integrador vai de 300 Hz a 1,5 MHz (SCHUMANN, 2016). O módulo integrador é ligado a um link de fibra óptica que transmite os dados para o módulo de aquisição do computador. A configuração do sistema é apresentada na Figura 3.10.

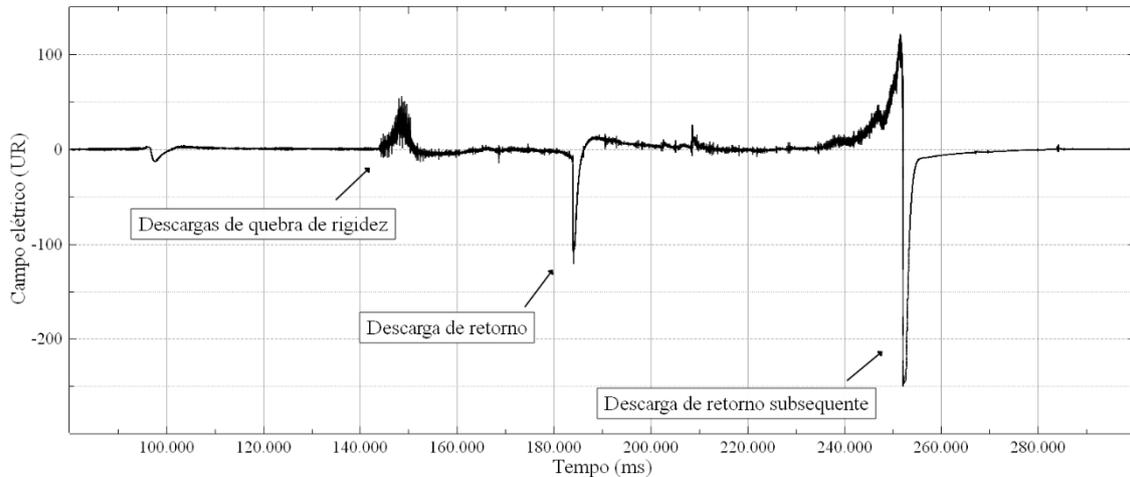
Figura 3.10 – Sistema de aquisição de campo elétrico.



Fonte: Adaptada de Schumann (2016).

A Figura 3.11 apresenta um exemplo de campo elétrico produzido por um raio descendente obtido através do sistema de aquisição utilizado neste trabalho. Podemos notar neste gráfico uma perturbação inicial do campo produzida pelas descargas de quebra de rigidez que ocorrem no interior da nuvem no momento em que o líder bidirecional é iniciado, seguida de duas perturbações intensas produzidas por duas descargas de retorno negativas.

Figura 3.11 – Sinal de campo elétrico produzido pela DR de um raio descendente.



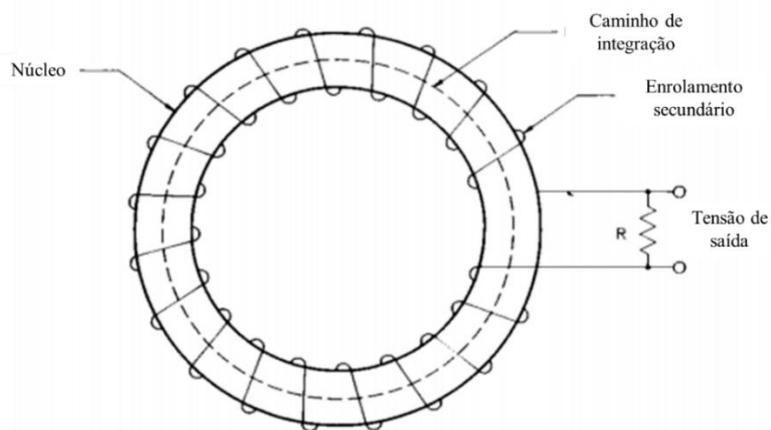
Fonte: Produção da autora.

3.3.3 Sistema de medição de corrente

O fenômeno físico no qual se baseia o funcionamento dos transformadores de corrente (TC) é o da indução eletromagnética, ou seja, os TCs não adquirem informações a partir de correntes contínuas. Os TCs são utilizados para medir e caracterizar formas de ondas de correntes que variam entre micro e milhares de amperes. Esse tipo de transformador registra variações bruscas de corrente como as produzidas pelas DRs. Entretanto, para variações de corrente de baixa frequência, esse tipo de TC não costuma ser indicado. O transformador é composto por quatro elementos principais: núcleo magnético, enrolamento secundário, terminação resistiva e escudo eletromagnético (Figura 3.12).

O TC utilizado neste estudo, da fabricante *Pearson* (Figura 3.13), foi cedido por pesquisadores da *Austrian Electrotechnical Association and Austrian Power Grid AG – ALDIS*. Para adquirir dados utilizando este sensor, não é necessário que o caminho pelo qual a corrente elétrica do raio passa, seja interrompido. Basta que o TC envolva a haste que conduz a corrente elétrica do raio para que haja uma tensão induzida no enrolamento interno, quando acontecer uma variação na corrente.

Figura 3.12 – Sistema interno do transformador de corrente Pearson.



Fonte: Adaptado de Waters (1986).

Figura 3.13 – Transformador de corrente da fabricante Pearson modelo 301X.



Fonte: INPE (2014).

O TC modelo 301X possui resistência de 50Ω e capacidade de aquisição de correntes de até 50 kA . Os limites de frequência do equipamento são de 5 Hz e 2 MHz .

Nas medições realizadas os valores de corrente elétrica esperados poderiam chegar a centenas de quilo amperes. Como forma de proteção dos equipamentos de transmissão e atenuação dos sinais, foram utilizados protetores de surto (Figura 3.14). Esse tipo de dispositivo de proteção contra surtos (DPS) atua como um centelhador entre os condutores interno e externo da linha coaxial, o qual centelha quando a tensão passa de um valor especificado entre esses condutores.

Figura 3.14 – Protetor de surto.



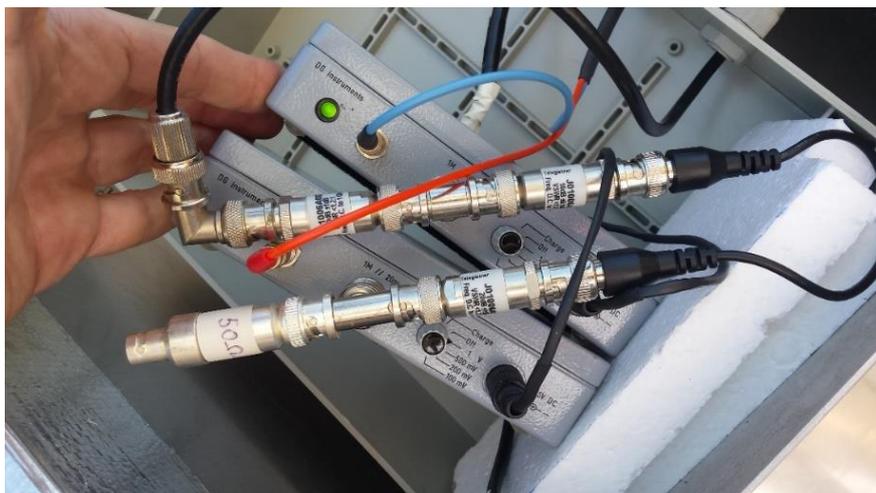
Fonte: INPE (2014).

Conversores de fibra óptica (Figura 3.15) foram utilizados no envio das informações fornecidas pelo TC para o receptor localizado no térreo do P2. Para que o sinal adquirido pelo TC não ultrapasse o valor máximo de tensão de entrada do conversor de fibra óptica, foram utilizados atenuadores de 20 e 10 dB apresentados na Figura 3.15.

O atenuador 20 dB possibilita medições de entrada de corrente entre 0 e 2 kA, acima desse valor o sinal satura e não há informação válida para esse canal. A resolução para esse ganho é de 500 mV/kA. Esse atenuador possibilitou a aquisição das informações das correntes elétricas de LAC e LANC, utilizadas neste trabalho.

No caso da atenuação de 50 dB os valores são adquiridos de 0 a 50 kA. O sinal satura acima do valor máximo. Assim, toda a forma de onda da corrente da DR é visível. A resolução para esse ganho é de 15,81 mV/kA. Esse atenuador permite aquisição de informações de correntes elétricas de DR, não sendo viável para corrente elétrica de baixa intensidade, como a dos LANCs.

Figura 3.15 – Atenuadores e conversores de fibra óptica utilizados.



Fonte: INPE (2016).

Para obter informações da corrente elétrica que passa pelo para-raios, o TC deve envolver a haste condutora. Como essa corrente gerada pela DR pode chegar a centenas de quilo amperes, a aquisição e transmissão dos dados só é possível se os equipamentos estiverem protegidos contra possíveis interferências geradas por essas descargas elétricas. Dessa forma, foram elaborados dois suportes metálicos idênticos capazes de abrigar e proteger os equipamentos de transmissão de dados (atenuadores e conversores) além das baterias que alimentavam esses equipamentos. A Figura 3.16 apresenta o modelo instalado na base de cada um dos para-raios dos prédios P1 e P2.

Estes suportes atuam como uma *gaiola de Faraday*, sendo capazes de isolar os equipamentos em seu interior, impedindo que ocorram interferências eletromagnéticas. Foram realizados testes de compatibilidade eletromagnética e resistência a correntes elétricas no laboratório de alta tensão do Instituto de Energia Elétrica da Universidade de São Paulo – USP, coordenados pelo grupo em conjunto com pesquisadores da universidade.

Figura 3.16 – Suporte utilizado para armazenar os equipamentos responsáveis pela transmissão de dados de corrente.

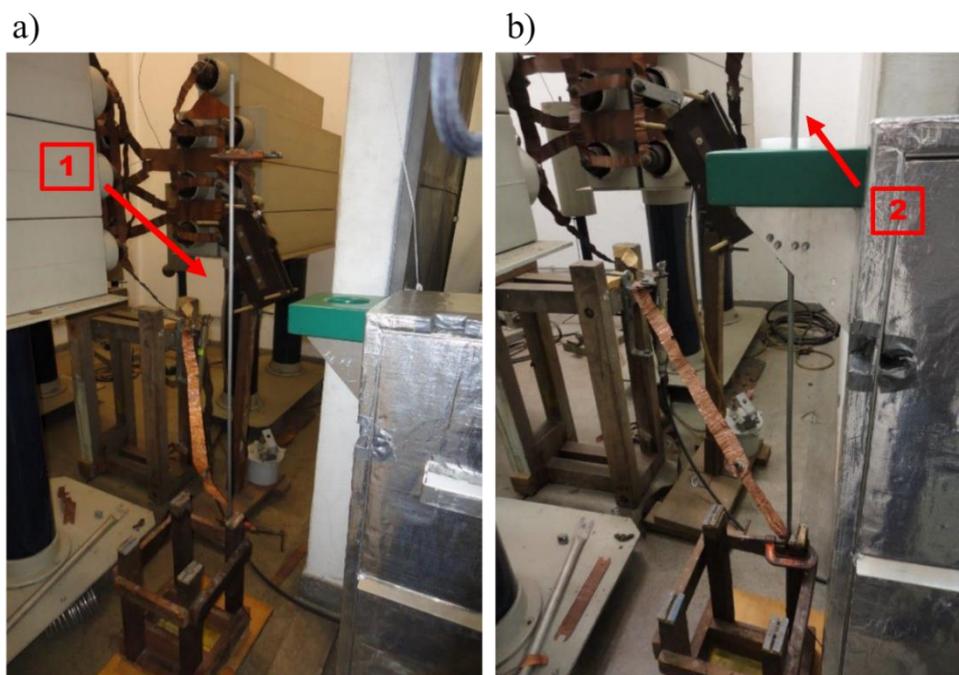


Fonte: INPE (2016).

Os testes averiguaram a blindagem do suporte (3.17) que, durante as medições, permaneceu fechado da mesma maneira que seria utilizado no topo dos prédios. No primeiro teste uma corrente elétrica foi aplicada numa haste condutora (Figura 3.17a) posicionada a 0,3 m de distância do TC (1). No segundo teste (Figura 3.17b) a haste condutora foi posicionada (2) de forma a simular a conexão esperada no para-raios. Não houve interferência nos equipamentos instalados no interior do suporte.

Os dados de corrente que chegavam ao receptor de fibra óptica, eram encaminhados para dois computadores diferentes; ganho maior (20 dB) e ganho menor (50 dB), localizados no térreo do P1. Dados de campo elétrico eram armazenados nestes computadores. A Figura 3.18 apresenta a disposição em que se encontravam durante o período das campanhas realizadas.

Figura 3.17 – Testes do suporte realizados na USP.



Fonte: INPE (2016).

Figura 3.18 – Rack onde os computadores de armazenamento permaneceram alojados.



Fonte: INPE (2016).

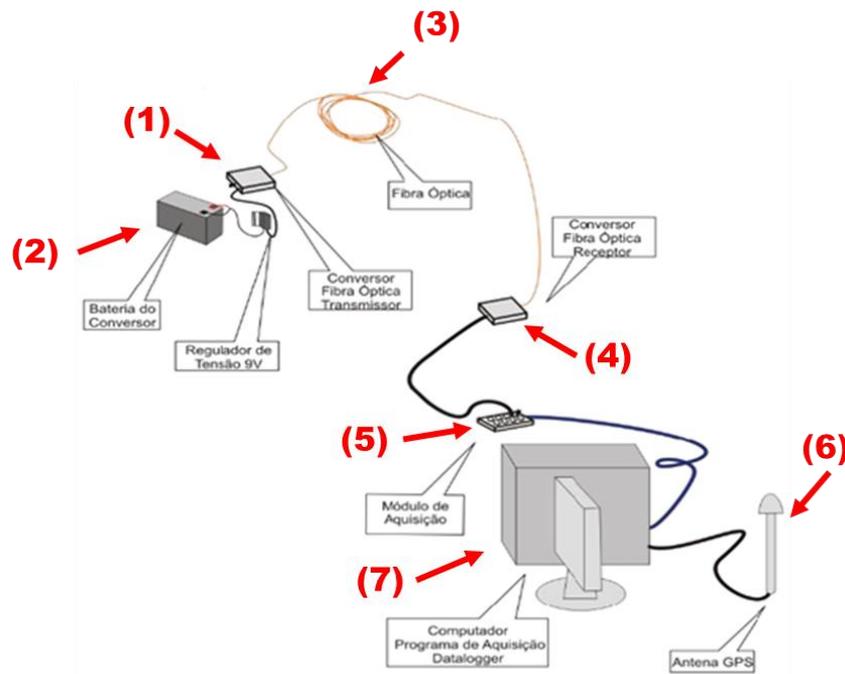
3.3.4 Links de fibra óptica e sistema de aquisição de dados

Para garantir a isolação elétrica entre os sensores (campo elétrico e corrente) e o sistema de aquisição de dados, foram utilizados links de fibra óptica, localizados no interior das caixas metálicas. Os links conduziam o sinal adquirido no topo dos prédios até o sistema de aquisição localizado no térreo do P2.

O sistema consistia em um link de fibra óptica da fabricante *DG Instruments* modelo FOS1 (1,4) com largura de banda de 5 MHz, e tensão de entrada de ± 1 V. No topo dos prédios, era alimentado por baterias de 12 V (2) (Figura 3.19). O link recebia o sinal elétrico dos sensores, convertia-o para sinal óptico e transmitia os dados, a partir de fibras ópticas (com extensão de 120 m) (3), até o receptor (4) que convertia, novamente, os dados para sinais analógicos transmitindo-os até o Módulo de Aquisição, uma caixa de conectores que recebe os 4 canais de entrada (os quais suportavam corrente e campo elétrico) e antena GPS (5).

Uma antena de GPS (6) permaneceu conectada ao *datalogger* para que os dados adquiridos, durante os eventos, estivessem sincronizados ao horário UT. Todos os registros eram adquiridos pelo sistema de aquisição *datalogger* (7). Trata-se de uma placa interna ao computador, configurada para adquirir 5 milhões de amostras por segundo (5 MS/s) por canal de entrada, com resolução de 12 bits. Os dados são armazenados na memória do computador localizado no térreo do P2. Mais detalhes do sistema de aquisição de dados podem ser encontrados no trabalho de Saba et al. (2019).

Figura 3.19 – Esquemática da transmissão e gravação dos dados com a utilização dos links de fibra óptica.



(1) Link de fibra óptica - transmissor; (2) Bateria externa; (3) Fibra óptica; (4) Link de fibra óptica - receptor; (5) Conectores de entrada de sinal e GPS; (6) Antena de GPS; (7) Computador com placa *datalogger* e placa GPS, utilizado também para armazenar os dados.

Fonte: Adaptado de Schumann (2016).

3.3.5 Sistema de localização de descargas atmosféricas

Ao se propagar, o raio emite pulsos eletromagnéticos com um amplo espectro de frequência. Durante seu percurso, processos físicos (com duração de centenas de milissegundos a poucos microssegundos) produzem assinaturas eletromagnéticas entre poucos hertz (corrente contínua longa) e 10^{20} Hz (emissão de raios-x).

A maneira mais comum de obter a localização, polaridade e uma estimativa do I_p das descargas atmosféricas é através de dados fornecidos pelos sistemas de localização de descargas, do inglês *Lightning Location System* – LLS. O LLS, é uma rede em solo composta de no mínimo 4 ou 5 sensores e um processador central. Cada um dos sensores que compõem a rede mede o sinal eletromagnético emitido por descargas elétricas. Dependendo da frequência de operação, os LLSs podem também adquirir uma enorme variedade de características dos diferentes processos físicos do raio (formação do canal,

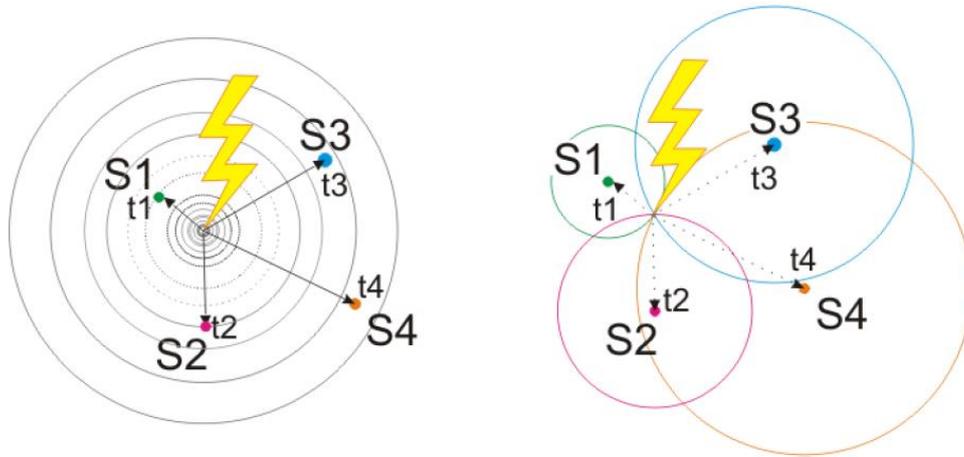
pulsos do líder, número de descargas de retorno, entre outras características) (NAG et al., 2015).

As duas técnicas mais comumente utilizadas na obtenção de dados referentes a descargas atmosféricas são a) por tempo de chegada, do inglês *Time of Arrival* – TOA e b) identificador da direção magnética, do inglês *Magnetic Direction Finding* – MDF (NAG et al., 2015). As redes utilizadas, neste trabalho, para detecção das descargas atmosféricas foram BrasilDat e RinDat. Ambas trabalham com a detecção das descargas atmosféricas a partir do método TOA.

A técnica TOA utiliza o registro do tempo de ocorrência de um formato de onda específico feito por 4 ou mais sensores. Uma diferença temporal na chegada dos pulsos eletromagnéticos em cada sensor é identificada e então a central de processamento gera, para cada par de sensores uma hipérbole que define um conjunto de possíveis localizações para a origem do pulso. Pares de múltiplos sensores permitem que a intersecção de múltiplas hipérbolas identifique a localização do evento (NACCARATO et al., 2012).

A Figura 3.20 apresenta o método TOA que ao invés de usar hipérbolas trabalha com círculos com origem em cada sensor. Esses círculos aumentam seu raio à medida que o tempo retrocede. O ponto de intersecção entre eles define o ponto de origem do sinal, ou o ponto de impacto da descarga. Esse método tem a vantagem de necessitar de apenas 3 sensores para obter uma solução sem dubiedade, enquanto o método das hipérbolas necessita de, no mínimo, 4 sensores.

Figura 3.20 – Método por tempo de chegada TOA.



Fonte: Schumann (2016).

4 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

Durante as campanhas, 6 eventos foram registrados pelos TCs, entretanto somente 3 tiveram características para a análise e discussão das medidas de corrente de LACs e LANCs. A Tabela 4.1 apresenta os dados gerais dos três casos analisados neste trabalho.

Nos Apêndices A, B e C são apresentadas informações adicionais dos casos; sinal de corrente adquirido com excesso de ruído, tabelas de dados das câmeras de alta velocidade e corrente do TC (valores de I_p , e tempo de ocorrência), figuras desenvolvidas a partir dos quadros das câmeras rápidas que registraram os eventos, informações adicionais de cálculo de extensão e velocidade dos líderes.

A descrição e análise dos 3 casos selecionados serão apresentados nos Capítulos 4.1, 4.2 e 4.3.

Tabela 4.1 – Dados gerais dos eventos ocorridos.

Caso	Data	Evento	Local	Corrente ganho maior	Corrente ganho menor	Sistema de localização
A	24 Fev 2016	LANC	P1 e P2	P2	-	detectado
B	01 Fev 2017	LANC	P1	P1 e P2	-	detectado
		LAC	P2			
C	03 Fev 2017	LANC	P1 e P2	P2	-	detectado

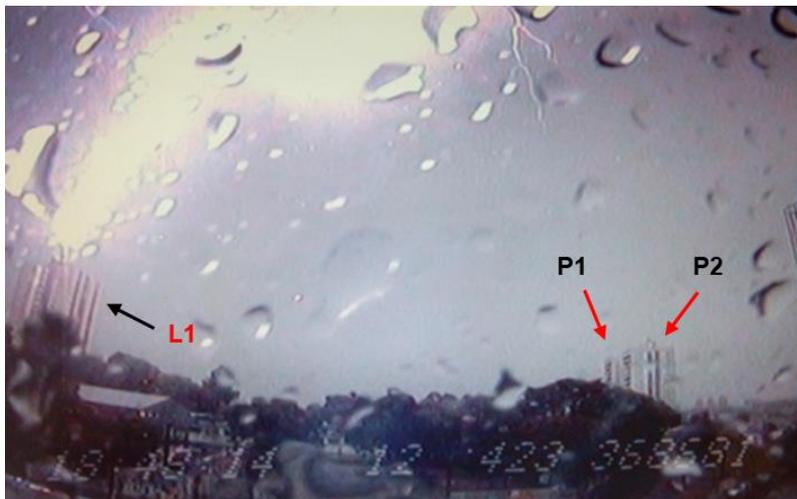
Fonte: Produção da autora.

4.1 Caso A – LANC P1 e P2

O caso A ocorreu no dia 24 de fevereiro de 2016. Dados extraídos do LLS indicam que o raio que desencadeou os líderes ascendentes nos para-raios do P1 e P2 era de polaridade negativa, produzindo uma DR com corrente elétrica de -36 kA no horário UT 18:48:16 426,843 (hh:mm:ss ms,µs). A descarga tocou o solo a 200 m de distância dos prédios P1 P2, mais precisamente no prédio L1, como mostra a Figura 4.1 (imagem obtida

pelo L3). O LLS localizou a DR a exatamente 200 m dos prédios P1P2, indicando uma boa precisão dos sensores que compõem o sistema de localização.

Figura 4.1 – Registro da DR do caso A pela câmera em L2.



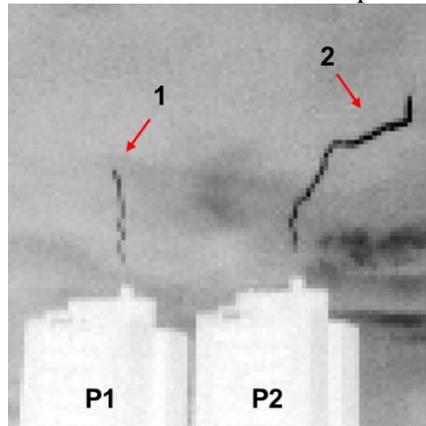
Fonte: INPE (2016).

Durante o evento, os dados dos LANCs foram adquiridos por três tipos de sensores: o óptico (câmera rápida); corrente (TC) e; campo elétrico localizado no topo do P2. A câmera rápida V711 localizada no L1, fez o registro dos LANCs no P1 e P2. No momento do evento a câmera era operada a uma taxa de 80.000 fps, com intervalo entre quadros de 12,32 μ s e resolução de 128 \times 360 pixels. A duração da fase de desenvolvimento do LANC no P2 foi de \sim 553 μ s.

A câmera rápida registrou o canal visível do LANC em ambos os prédios. Os pulsos de corrente foram registrados apenas no TC do P2. Estes pulsos que ocorreram até o instante da DR foram nomeados de A a Q. Os quadros que registraram a luminosidade dos canais de LANC no P1 e no P2 foram enumerados de 1 a 30. No caso do registro simultâneo destes dados, utilizam-se as letras e números correspondentes (p. ex., 2A representa o quadro 2 adquirido pela câmera rápida e o pulso A registrado pelo TC). A figura apresentando as imagens destes quadros associados aos pulsos adquiridos pelo TC no P2 encontra-se no Apêndice A.

A Figura 4.2 apresenta o quadro 16 adquirido pela câmera rápida no instante do pulso K adquirido pelo TC no P2. A partir dela, é possível observar os LANCs numerados por 1 e 2, partindo dos prédios P1 e P2, respectivamente.

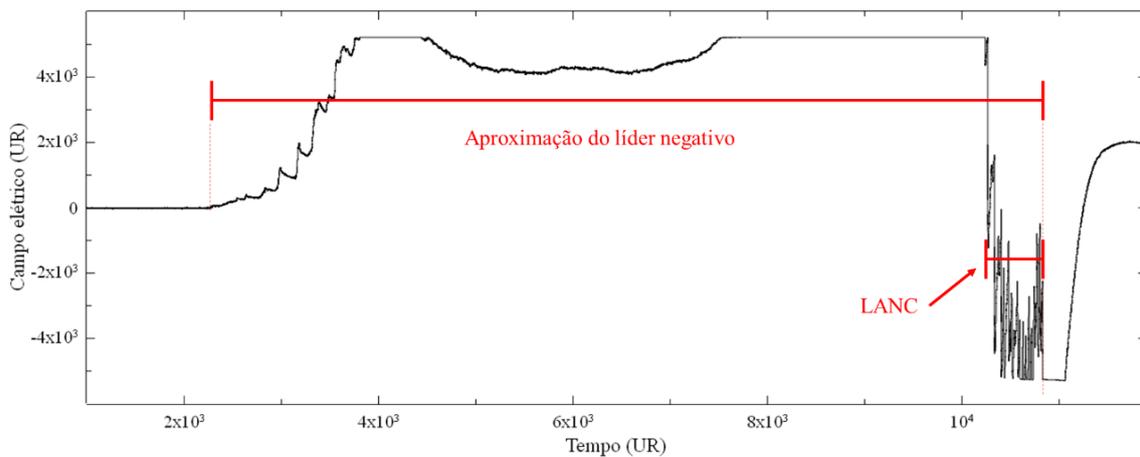
Figura 4.2 – Registro dos LANCs desenvolvidos no P1 e P2 pela câmera rápida localizada em L1.



Fonte: Produção da autora.

O registro do campo elétrico para este evento é apresentado na Figura 4.3. As unidades de campo elétrico e tempo são relativas. Busca-se ilustrar o tempo de aproximação do líder descendente e o tempo de propagação do LANC observado neste caso.

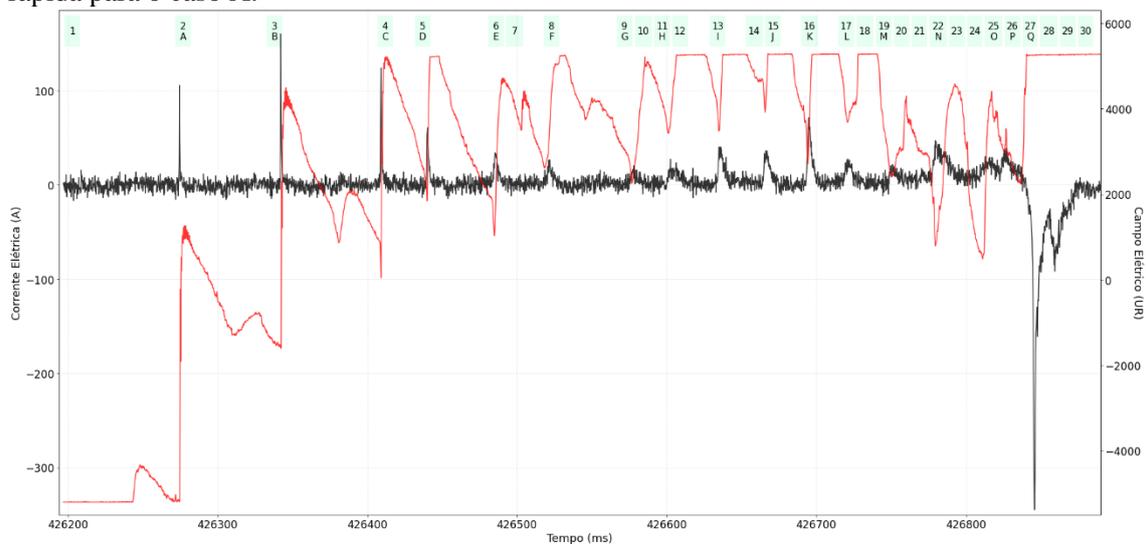
Figura 4.3 – Sinal de campo elétrico adquirido no caso A.



Fonte: Produção da autora.

A Figura 4.4 apresenta uma visão geral do evento, com todas as informações adquiridas pelos três sensores. Nesta figura, os retângulos verdes representam as janelas de aquisição da câmera rápida, estes contêm números e letras. Os números correspondem ao quadro da câmera rápida onde os canais de LANC (tanto para o P1 quanto para o P2) foram visíveis. As letras representam os pulsos de corrente adquiridos pelo TC no P2. As curvas em vermelho e preto representam as medidas de campo elétrico (obtidas no topo do P2) e as medidas de corrente (ganho maior) do P2, respectivamente. Os quadros sem luminosidade no canal dos LANCs e pulsos de corrente registrados, não foram referenciados na figura.

Figura 4.4 – Associação entre os pulsos de corrente no P2, campo elétrico e quadros da câmera rápida para o caso A.

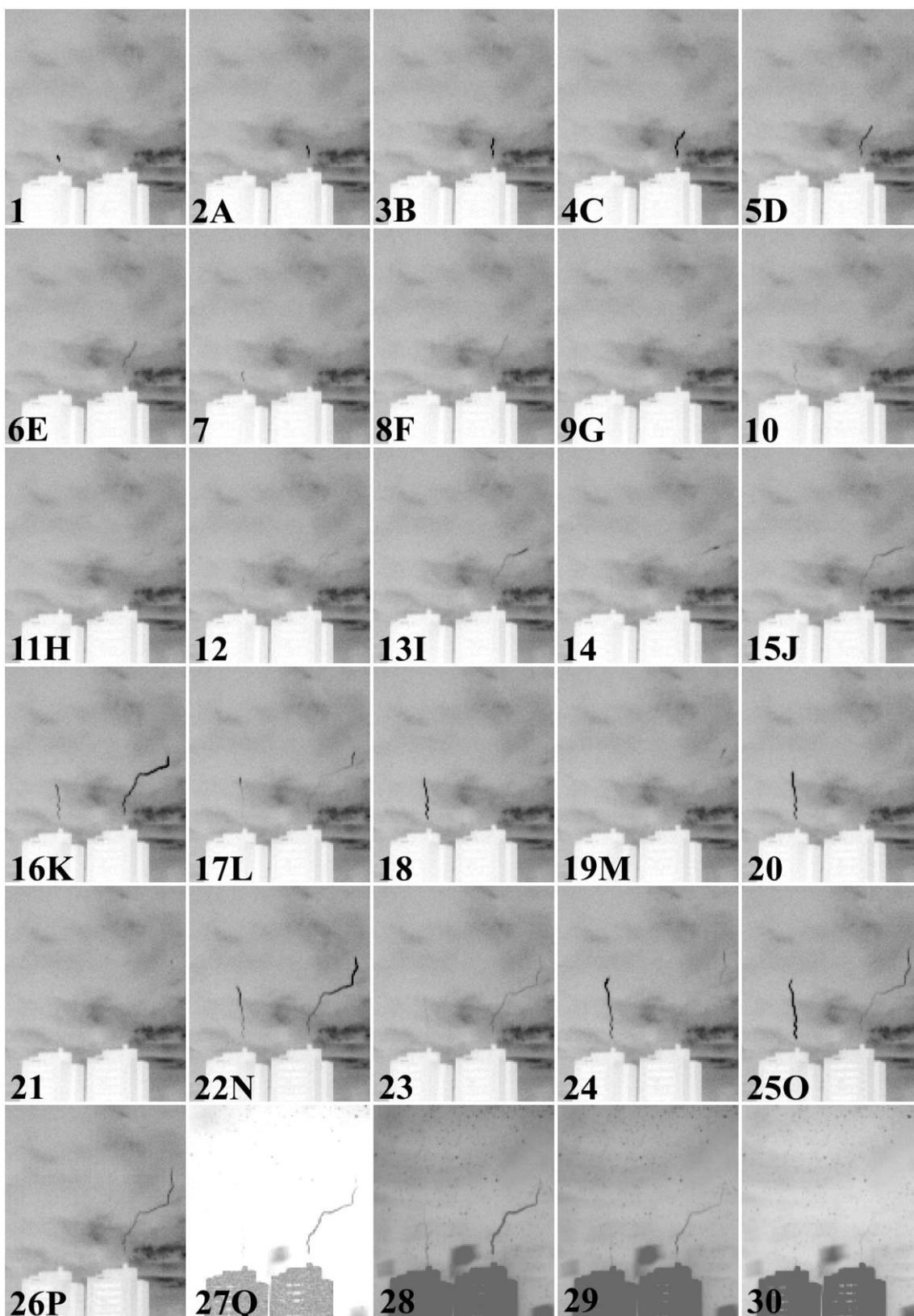


Fonte: Produção da autora.

Os quadros extraídos da câmera rápida correspondentes ao processo de desenvolvimento do LANC no P2 são apresentados na Figura 4.5. Nessa figura, o P1 encontra-se a esquerda e, o P2 à direita, da imagem. A partir dessas figuras (Figura 4.4 e Figura 4.5) é possível verificar que, para este caso, o intervalo entre quadros da câmera V711 teve resolução temporal suficiente para que cada pulso de corrente elétrica fosse associado aos pulsos de luminosidade do LANC.

Após o colapso da corrente, observou-se “pulsos de colapso” do LANC que foram associados aos quadros da câmera rápida, obtidos após a DR. Não existem registros na literatura do comportamento de LANCs após a DR. Como este trabalho contou com apenas duas amostras deste comportamento, não foi possível tratar os dados.

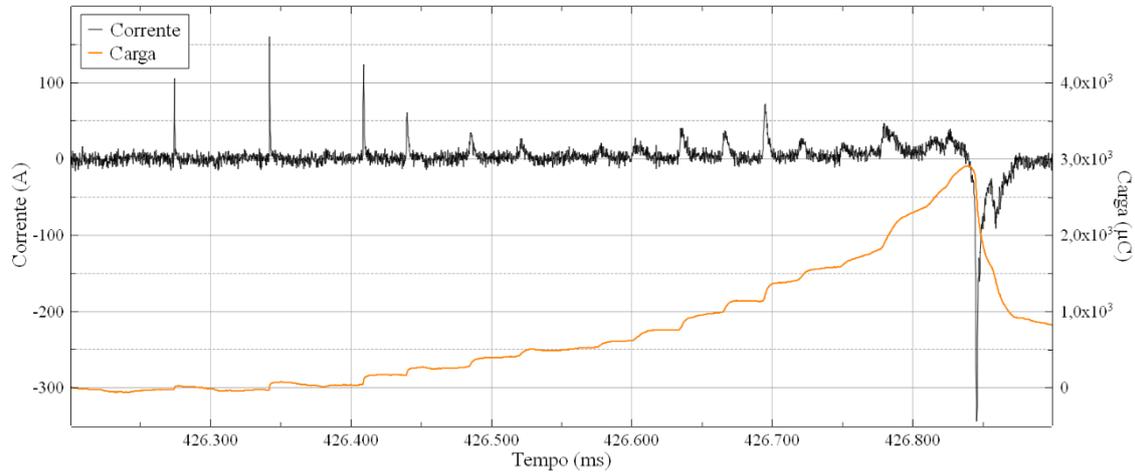
Figura 4.5 – Quadros da câmera rápida associados aos pulsos de corrente do P2.



Fonte: Produção da autora.

A Figura 4.6 apresenta a curva de carga transferida para o canal de LANC correspondente ao intervalo de tempo de aquisição dos dados.

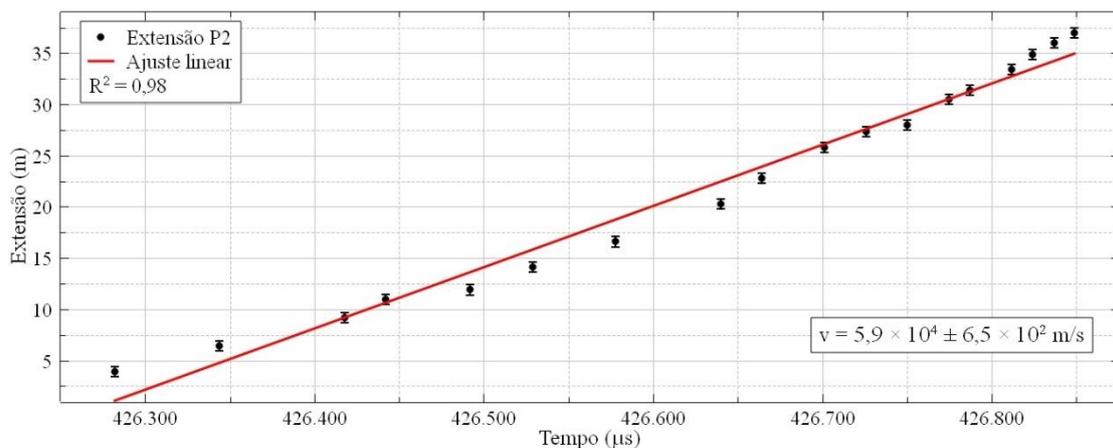
Figura 4.6 – Relação entre pulsos de corrente e quantidade de carga transferida pelo canal do LANC no caso A.



Fonte: Produção da autora.

Os dados de extensão e velocidade do LANC no P2 foram estimados a partir da análise do vídeo da câmera V711. O gráfico da extensão no P2 é apresentado na Figura 4.7. A partir dos valores de extensão calculados para o LANC no P2, foi plotada a curva de velocidade feita com ajuste linear.

Figura 4.7 – Gráfico da extensão e velocidade do canal do LANC no P2.

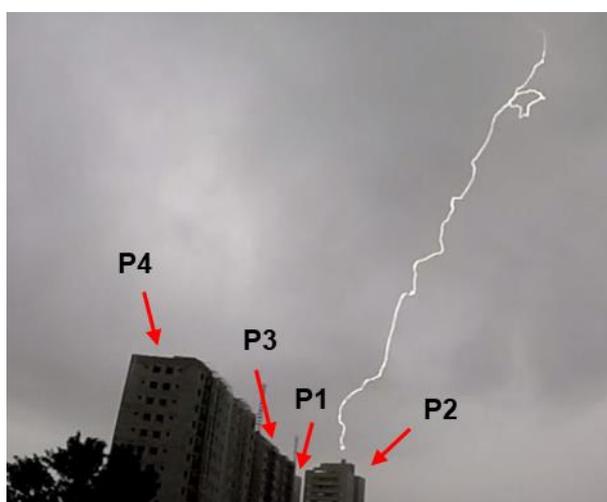


Fonte: Produção da autora.

4.2 Caso B – LANC P1 e LAC P2

Em 01 de fevereiro de 2017 ocorreu o caso B. O raio descendente de polaridade negativa, que iniciou o LANC no P1 e LAC no P2, teve conexão no horário UT 19:01:10 689,305 (hh:mm:ss ms,µs). O LLS identificou o I_p do raio em -73 kA, e o ponto de contato com o solo a 300 m do real ponto de contato (o prédio P2). A imagem do momento da conexão no P2 foi registrada por uma das câmeras convencionais instaladas em L1 (Figura 4.8).

Figura 4.8 – Imagem do momento em que o raio atinge o para-raios do P2, durante o caso B.



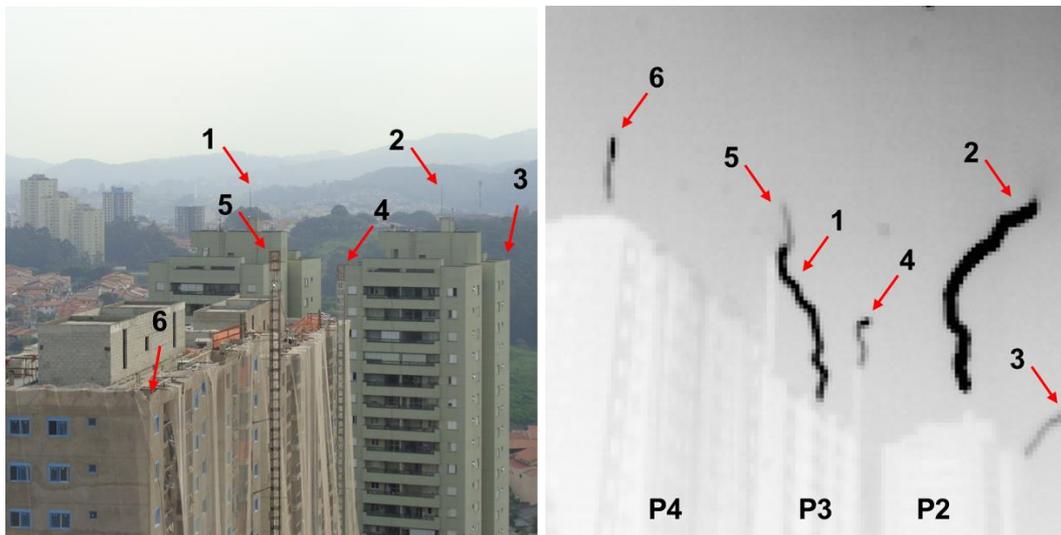
Fonte: INPE (2017).

Os dados obtidos durante o evento foram registrados pelas câmeras rápidas V711 (37.800 fps, intervalo de aquisição dos quadros 26 µs e, resolução 368 × 416) e V12 (70.000 fps, intervalo de aquisição dos quadros 14 µs e, resolução 128 × 360), pelo TC do P1 e P2 (ganho maior) e, sensor de campo elétrico localizado no topo do P2. Durante o evento, seis líderes ascendentes disputavam pela conexão com o líder escalonado. Para distingui-los e indicar a partir de qual estrutura partiram, foi elaborada a Figura 4.9.

O prédio P1 não é visível nesta figura, apenas a ponta do seu para-raios e o líder que se desenvolveu (1). O prédio P2 é visível, e de seu topo partiram dois líderes ascendentes – um do para-raios (2) e um de uma das hastes condutoras ao redor do prédio (3). O prédio P3 emitiu uma tentativa de conexão (4) a partir do topo de um elevador provisório externo ao prédio em construção, enquanto o P4 emitiu as tentativas (5 e 6) a partir do um outro

elevador externo e uma haste metálica presente na quina do último andar. Entretanto, apenas dados de corrente (ganho maior) dos prédios P1 e P2 foram obtidos.

Figura 4.9 – Caso B líderes ascendentes.

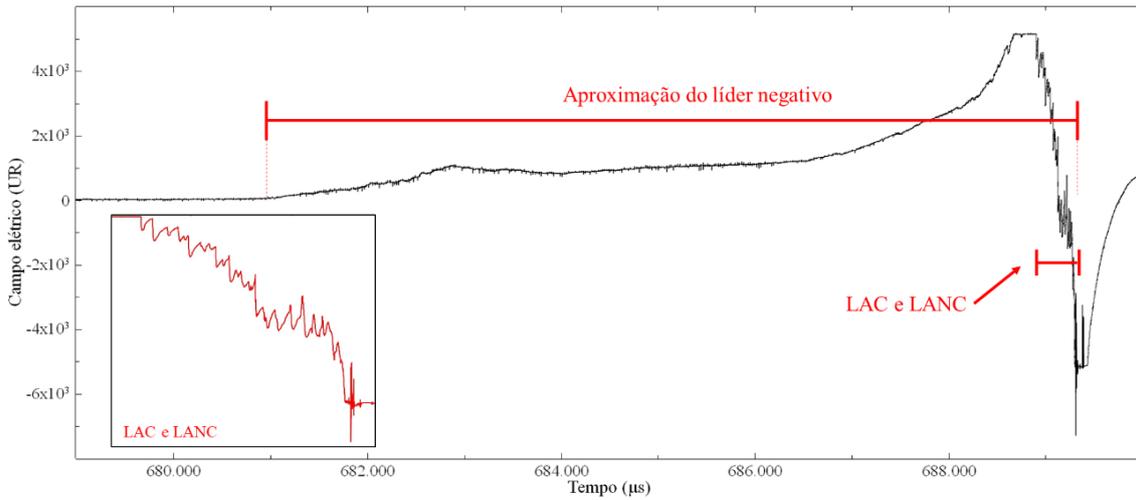


Fonte: Produção da autora.

O registro do campo elétrico para este evento é apresentado na Figura 4.10. A unidade de campo elétrico é relativa. Busca-se ilustrar o tempo de aproximação do líder descendente e o tempo de propagação do LAC e LANC observados neste caso.

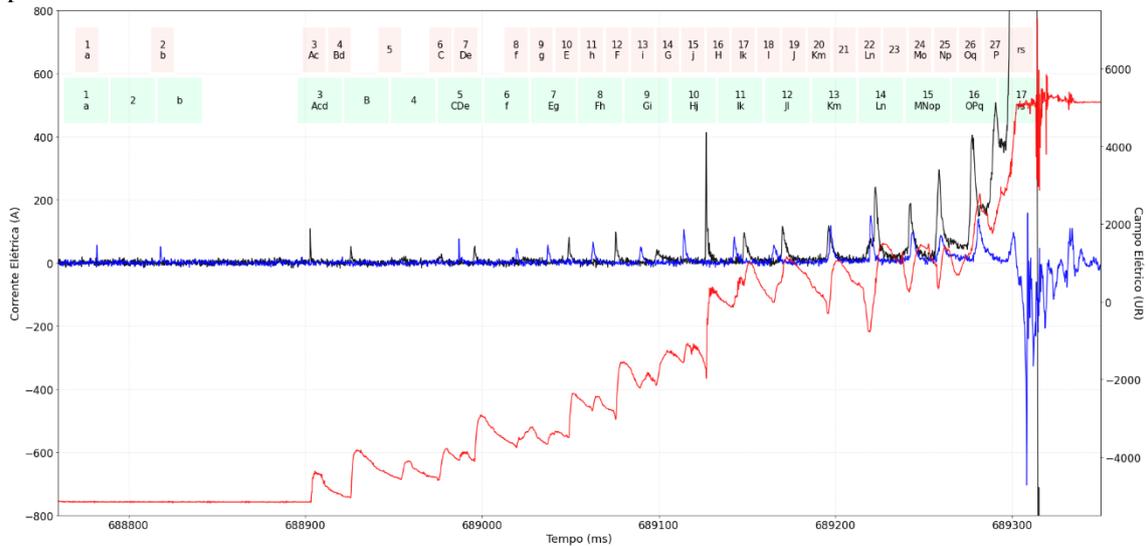
Os pulsos de corrente adquiridos pelo TC no P1 foram nomeados de a a s (letras minúsculas) e os adquiridos no P2 foram nomeados de A a P (letras maiúsculas). Os quadros das câmeras rápidas V711 e V12 estão representados pelos retângulos verde e vermelho e, foram enumerados de 1 a 17 e de 1 a 27, respectivamente. Dessa forma, para representar a aquisição simultânea de uma das câmeras para o P1 ou P2 e a corrente registrada, usa-se o modelo da câmera, número do quadro e letra correspondente ao pulso de corrente (p. ex., V711 3d representa o quadro 3 registrado pela câmera rápida V711 e o pulso d registrado pelo TC no P1). Estes dados são apresentados na Figura 4.11.

Figura 4.10 – Sinal de campo elétrico adquirido no caso B.



Fonte: Produção da autora.

Figura 4.11 – Associação entre os pulsos de corrente, campo elétrico e quadros da câmera rápida para o caso B.

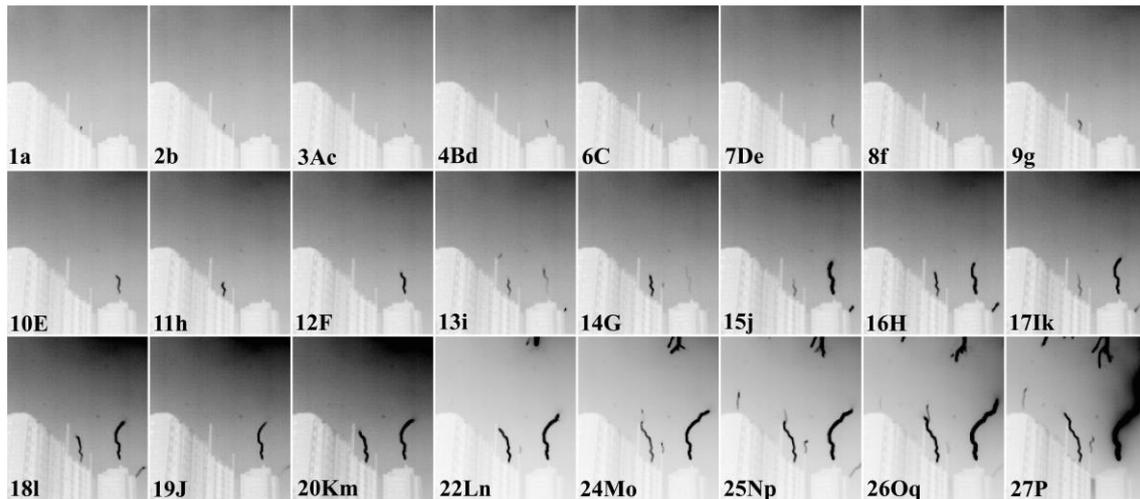


Fonte: Produção da autora.

A partir da comparação entre os pulsos de corrente elétrica e os quadros adquiridos pelas câmeras rápidas verificou-se que para este caso, o intervalo entre quadros da câmera V12 (14 μ s) teve a resolução temporal compatível com os pulsos de corrente elétrica durante o desenvolvimento dos líderes

Para melhor visualização, a Figura 4.12 apresenta imagens quadro-a-quadro do alongamento dos canais de LANC no P1 e LAC no P2 registrados pela câmera V12. A fase de desenvolvimento do LANC no P1 foi de $\sim 519 \mu\text{s}$, para o LAC essa duração foi de $\sim 388 \mu\text{s}$.

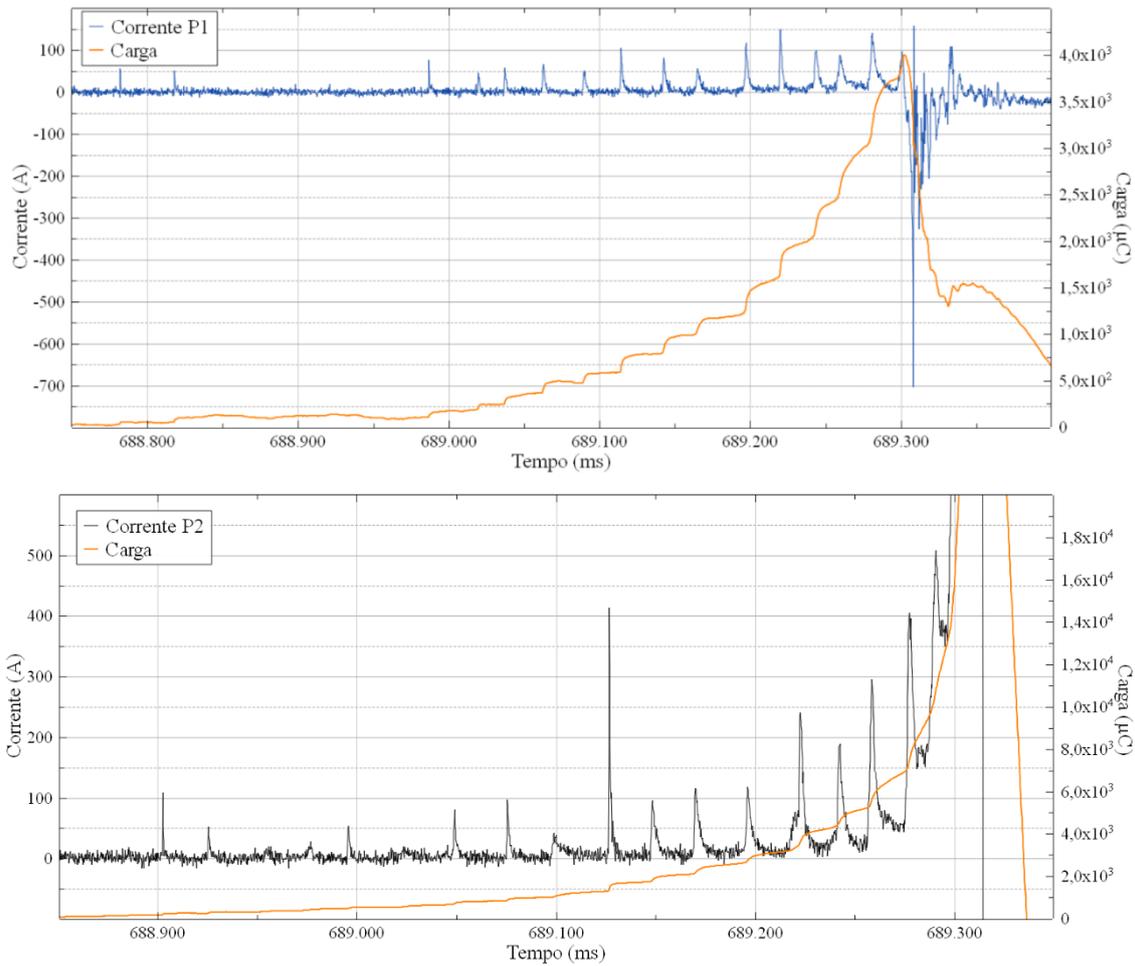
Figura 4.12 – Quadros da câmera rápida V12 associados aos pulsos de corrente adquiridos pelo TC no P1 e P2.



Fonte: Produção da autora.

A Figura 4.13 apresenta a curva de carga transferida para os canais de LAC e LANC correspondente ao intervalo de tempo de aquisição dos dados.

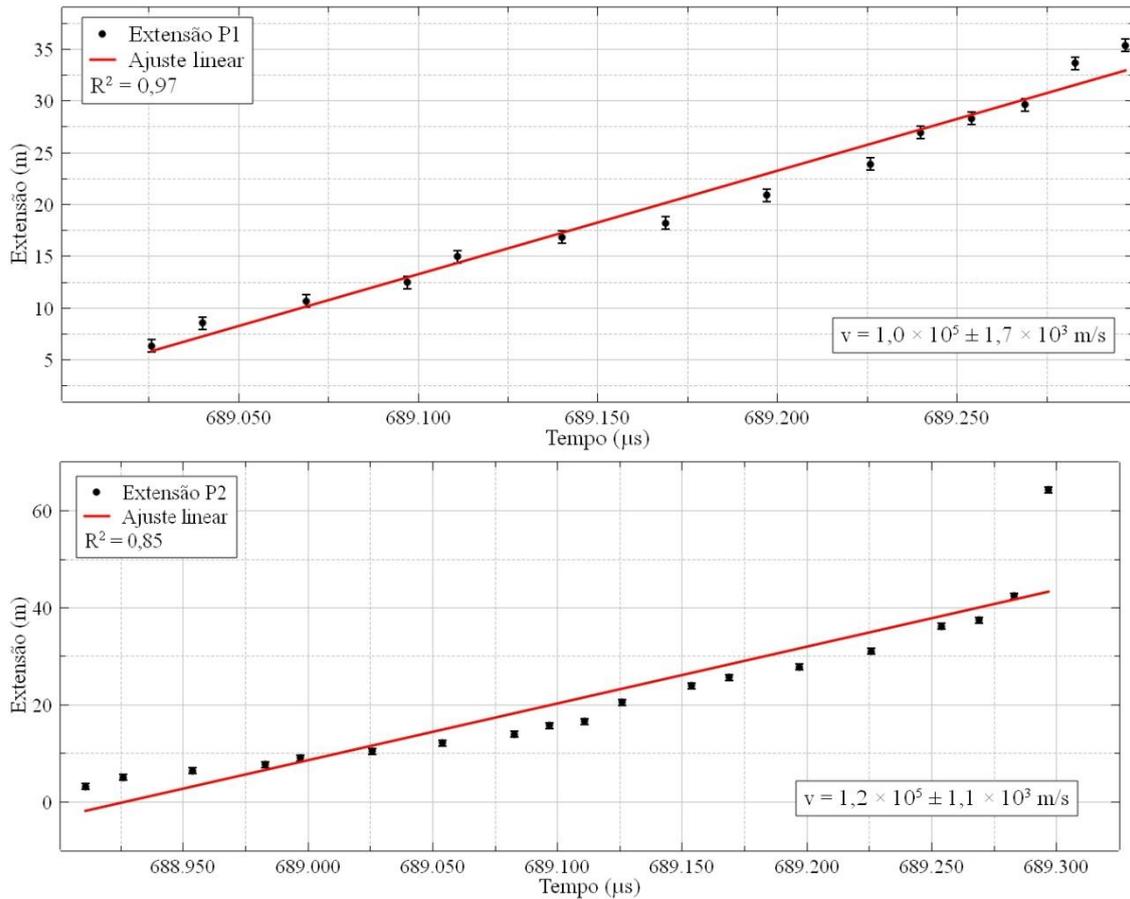
Figura 4.13 – Pulsos de corrente e quantidade de carga transferida pelo canal do LANC no P1 e LAC no P2.



Fonte: Produção da autora.

Os dados de extensão e velocidade do LANC no P1 e LAC no P2 foram estimados a partir da análise do vídeo da câmera V12. Os gráficos da Figura 4.14 apresentam a extensão dos líderes ascendentes em relação ao tempo do evento. A partir desses valores, foi feito o ajuste linear representado pela reta em vermelho. Mais detalhes dessas estimativas estão descritos no Apêndice B.

Figura 4.14 – Gráfico da extensão e velocidade do canal do LANC no P1 e LAC no P2.



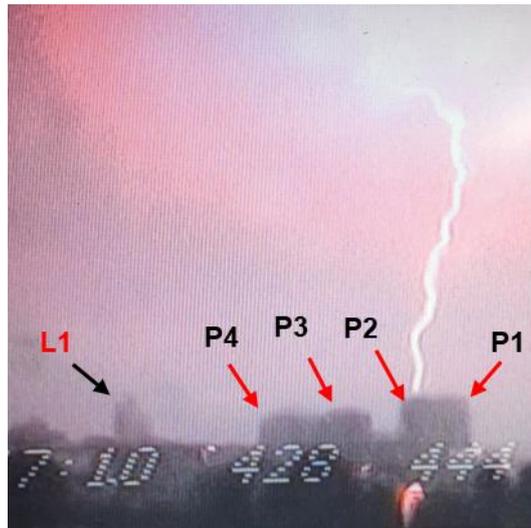
Fonte: Produção da autora.

O último ponto deste gráfico não foi considerado no ajuste da curva pois o aumento abrupto na extensão do líder se deve a outro fenômeno conhecido como *final jump*. O “pulo final” consiste na junção da CSZ (sigla em inglês para o termo *Common Streamer Zone*) entre o LAC e o líder descendente (COORAY, 2015).

4.3 Caso C – LANC P1 e P2

O caso C ocorreu no dia 03 de fevereiro de 2017. A descarga de retorno identificada pelo LLS tocou o solo no horário UT 22:47:09 404,908 (hh:mm:ss ms,μs), a 1 km de distância dos prédios produzindo corrente elétrica de -30 kA. A Figura 4.15 apresenta a imagem do raio, adquirida pelo L3.

Figura 4.15 – Registros da descarga de retorno do L3.



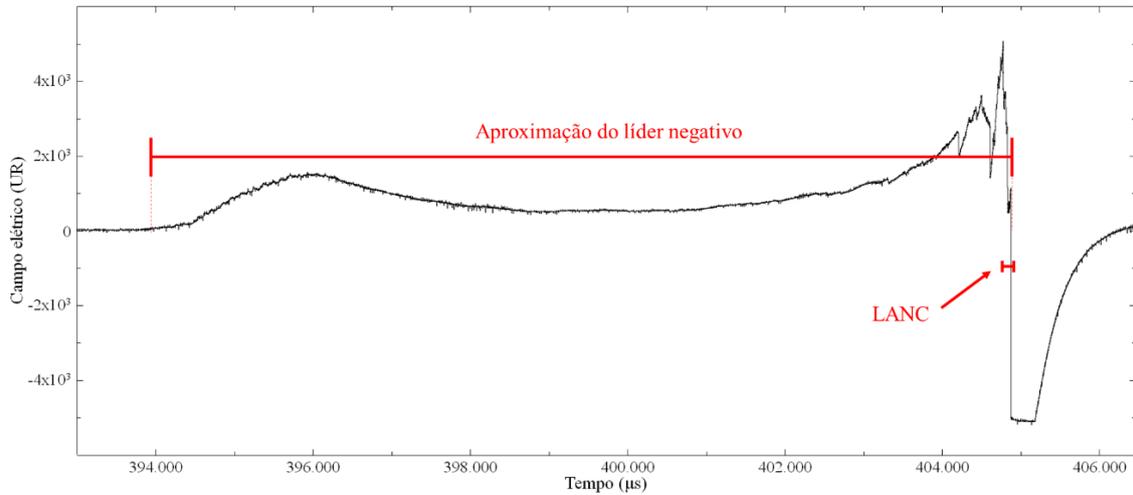
Fonte: INPE (2017).

O líder escalonado induziu LANCs em ambos os prédios. Contudo, dados de corrente (ganho maior) foram adquiridos apenas no P2. As imagens foram obtidas pelas câmeras rápidas V711 (37.800 fps, intervalo entre quadros de 26 μ s e resolução 368 \times 416) e V12 (110.000 fps, intervalo entre quadros de 9 μ s e resolução 192 \times 152).

O registro do campo elétrico para este evento é apresentado na Figura 4.16. A unidade de campo elétrico é relativa. Busca-se ilustrar o tempo de aproximação do líder descendente e o tempo de propagação do LANC observado neste caso.

Os pulsos de corrente adquiridos pelo TC no P2 foram nomeados de *A* a *D*. Os quadros das câmeras rápidas V711 e V12 foram enumerados de 1 a 10 e de 1 a 21, respectivamente. Dessa forma, para representar a aquisição simultânea das câmeras e corrente registrada no P2, usa-se o modelo da câmera, número do quadro e letra correspondente ao pulso de corrente (p. ex., *V12 11B* representa o quadro 11 registrado pela câmera rápida V12 e o pulso B registrado pelo TC no P2).

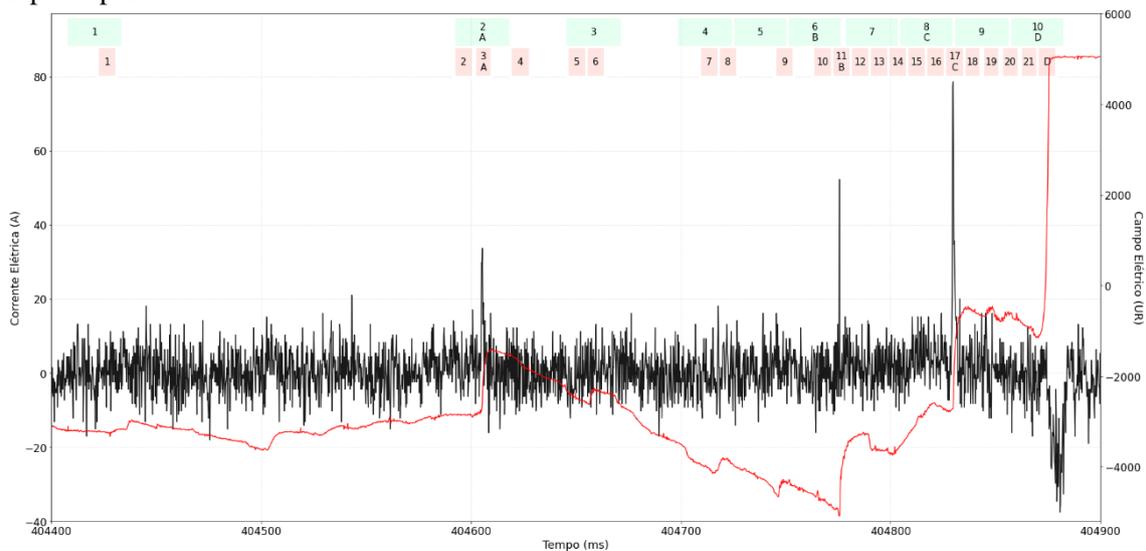
Figura 4.16 – Sinal de campo elétrico adquirido no caso C.



Fonte: Produção da autora.

O gráfico apresentado na Figura 4.17 contém as informações descritas acima. Os retângulos vermelhos representam as janelas de aquisição da câmera V12, os retângulos verdes representam as janelas de aquisição da câmera V711. A figura acompanha também as curvas de corrente elétrica do P2 (preto) e campo elétrico (vermelho) adquirido no topo do P2.

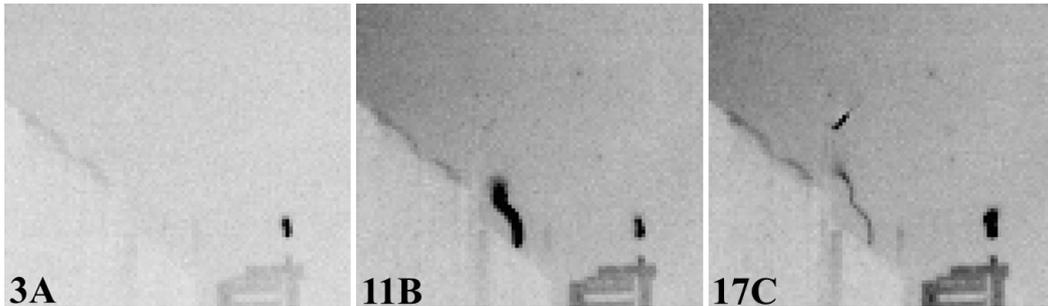
Figura 4.17 – Associação entre os pulsos de corrente do P2, campo elétrico e quadros das câmeras rápidas para o caso C.



Fonte: Produção da autora.

A fase de desenvolvimento do LANC no P2 foi de $\sim 224 \mu\text{s}$. Novamente, as diferenças na taxa de aquisição das câmeras puderam ser comparadas para verificar a melhor resolução temporal a ser utilizada durante a evolução dos LANCs.

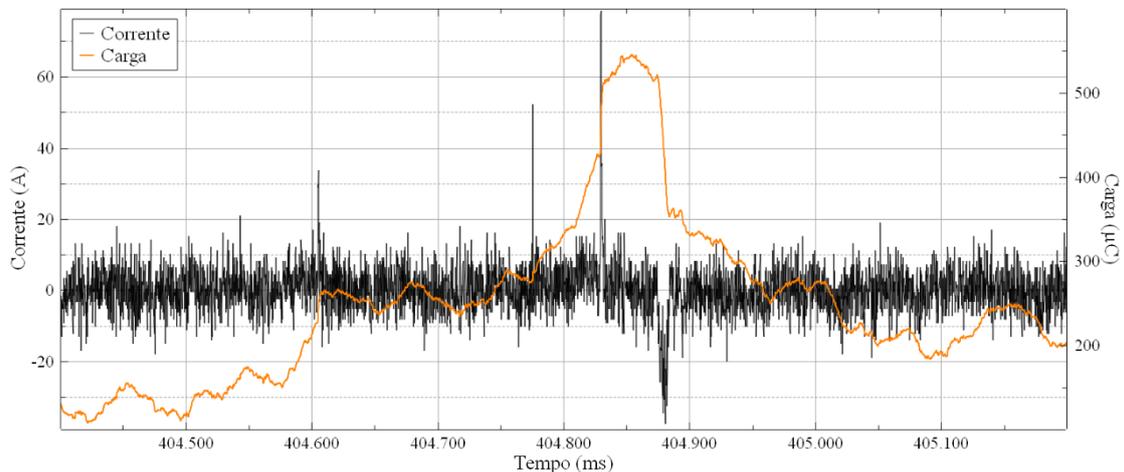
Figura 4.18 – Quadros da câmera rápida associados aos pulsos de corrente adquiridos pelo TC no caso C.



Fonte: Produção da autora.

A carga transferida para o canal do LANC no caso C está representada na Figura 4.19.

Figura 4.19 – Carga elétrica transferida para o canal do LANC no Caso C.

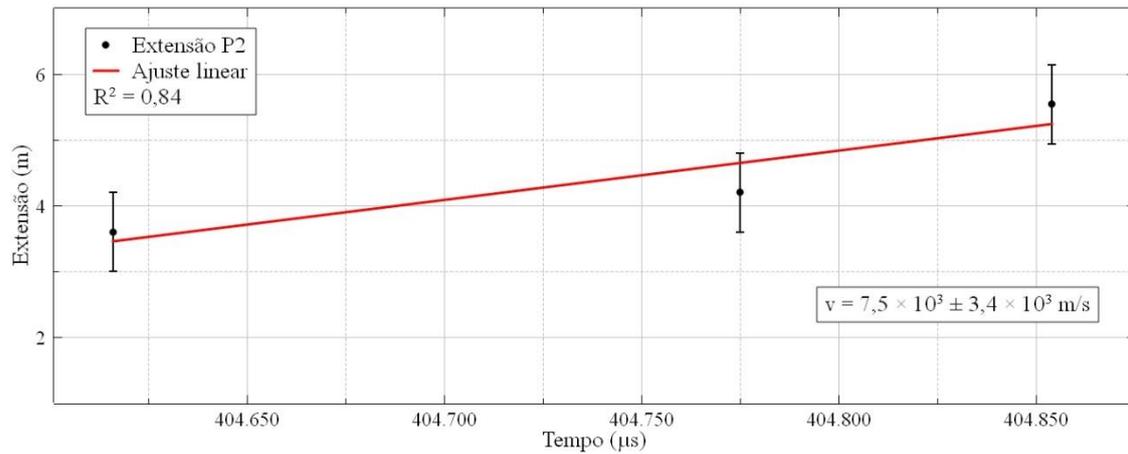


Fonte: Produção da autora.

Os dados de extensão e velocidade do LANC no P2 foram estimados a partir da análise do vídeo da câmera V12. O gráfico da extensão no P2 é apresentado na Figura 4.20a. A partir dos valores de extensão calculados foi desenvolvido o gráfico da curva de

velocidade feita com ajuste FIT, apresentado na Figura 4.18b. Mais detalhes dessas estimativas estão descritos no Apêndice C.

Figura 4.20 – Gráfico da extensão e velocidade do canal do LANC no P2.



Fonte: Produção da autora.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Concluído o tratamento dos dados adquiridos, foram encontradas características comuns aos três casos nos seguintes parâmetros: a) sinal de corrente elétrica; b) carga transferida; c) sinal de campo elétrico; d) extensão e velocidade dos líderes ascendentes; e) densidade linear de cargas. O caso C contém apenas três pulsos de corrente, de baixa amplitude. A DR deste evento ocorre a aproximadamente 1 km dos prédios P1 P2, com I_p de -30 kA, por essa razão foi desconsiderado em algumas dessas análises.

5.1 Sinal de corrente elétrica

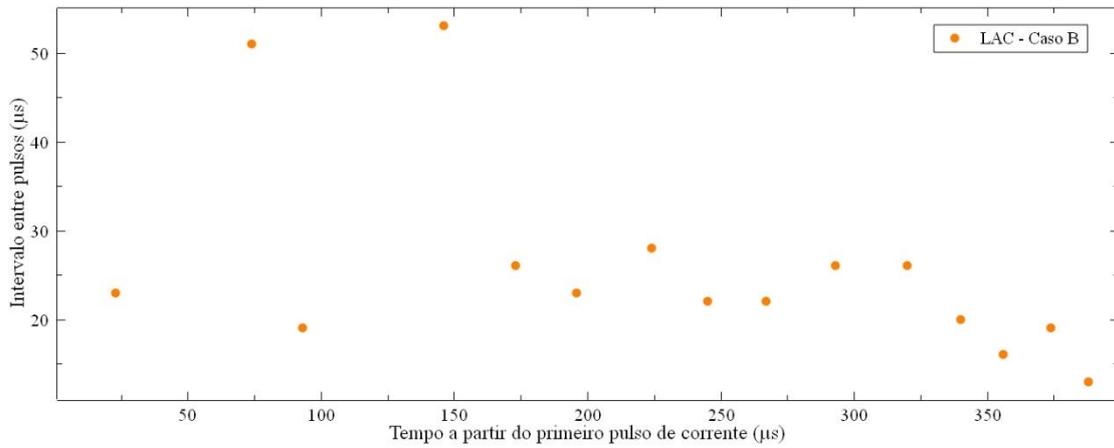
Durante a fase de desenvolvimento dos três eventos (A, B e C) foram adquiridos 37 pulsos de LANC e 16 pulsos de LAC. A partir da análise desses pulsos, algumas características relacionadas ao sinal de corrente puderam ser observadas: i) valor médio do intervalo de tempo entre pulsos de LAC e LANC; ii) amplitude do sinal de corrente elétrica dos líderes ascendentes; iii) colapso da corrente do LANC.

5.1.1 Intervalo entre pulsos de corrente elétrica

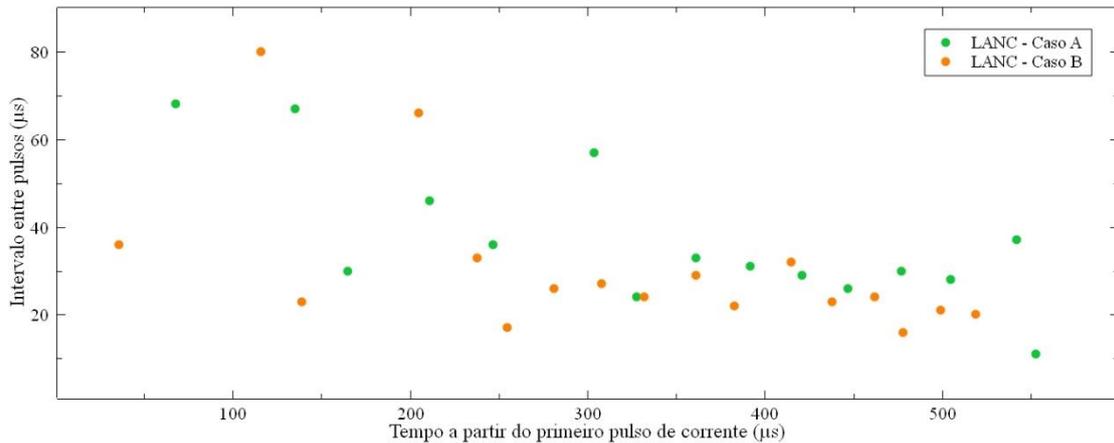
A Figura 5.1 apresenta o gráfico do intervalo entre pulsos, durante os eventos de LAC e LANC, em relação ao tempo a partir do primeiro pulso adquirido. Nota-se que, conforme o líder escalonado se aproxima do para-raios, o intervalo entre eles diminui. Esse comportamento era esperado, já que o campo elétrico na extremidade das estruturas se intensifica ainda mais com a aproximação do líder descendente. A duração da fase de desenvolvimento dos LANCs do caso A (553 μ s) e B (519 μ s) são maiores que na fase de desenvolvimento do LAC (388 μ s).

Figura 5.1 – Gráfico do intervalo entre pulsos.

a) Dados do LAC.



b) Dados dos LANCs.



Fonte: Produção da autora.

A Tabela 5.1 apresenta os valores da média aritmética (MA), média geométrica (MG) e mediana (M) para os parâmetros: intervalo entre pulsos e amplitude do pulso de corrente dos Casos A, B e C. Na tabela, a quantidade de amostras utilizadas para os cálculos, está representada pela letra N. A média aritmética do intervalo entre pulsos de LAC foi 25,8 µs. Para os pulsos de LANC essa média foi de 32,7 µs.

O desvio padrão calculado para as médias dos valores de intervalo entre pulsos foi de 11,37 µs para o LAC e 14,82 µs para os LANCs. O fato de as médias encontradas serem relativamente próximas e o desvio padrão correspondente a cada uma delas ser alto, indica

que estatisticamente os valores de intervalo entre pulsos de LACs e LANCs não têm diferença significativa.

Tabela 5.1 – Médias de intervalo entre pulsos e amplitude da corrente elétrica.

LANC		N	MA	MG	M
Caso A - P2	intervalo entre pulsos (μs)	15	36,9	33,7	31,0
	amplitude da corrente (A)	16	54,1	43,7	37,5
Caso B -P1	intervalo entre pulsos (μs)	17	30,5	27,6	24,0
	amplitude da corrente (A)	18	76,1	66,3	71,0
Caso C - P2	intervalo entre pulsos (μs)	2	112,5	96,1	112,5
	amplitude da corrente (A)	3	54,3	51,2	52,0
Casos A, B e C	intervalo entre pulsos (μs)	34	32,7	29,9	29,0
	amplitude da corrente (A)	37	64,8	54,2	89,0
LAC		N	MA	MG	M
Caso B -P2	intervalo entre pulsos (μs)	15	25,8	24,0	23,0
	amplitude da corrente (A)	16	178,5	126,1	112,0

Fonte: Produção da autora.

A Tabela 5.2 apresenta os valores médios de intervalo entre pulsos de corrente de LANC encontrados na literatura. Para este trabalho a média foi de 33 μs , cerca de 1,5 vezes os valores encontrados por Schoene et al. (2008) e Nag et al. (2021), entre 12 e 21 μs e 20 μs , respectivamente; e metade do valor encontrado por Visacro et al. (2010), 69 μs .

Além dos trabalhos citados, é importante ressaltar que o intervalo entre pulsos encontrados neste trabalho é similar ao intervalo entre passos do líder escalonado, entre 20 e 50 μs (KRIDER, WEIDMAN, NOGGLE, 1977; RAKOV, UMAN, 2003).

Tabela 5.2 – Média do intervalo entre pulsos encontrados na literatura.

Literatura	N	MA (μs)
Schoene et al. (2008)	5	21
Visacro et al. (2010)	75	69
Nag et al. (2021)	216	20
Este trabalho	37	33

Fonte: Produção da autora.

Outra característica muito interessante nos dados analisados foi a interação entre os prédios, P1 e P2, durante os três casos. No decorrer do evento, aconteciam tentativas de conexões alternadas, conforme o líder escalonado se aproximava do solo. A aquisição de imagens por intermédio de câmera rápida permitiu a visualização dessas tentativas intercaladas entre os prédios (ver Figura 4.5 e Figura 4.12). Durante o caso B, tais imagens puderam ser comparadas ao revezamento do sinal de corrente produzido pelos prédios P1 e P2.

No Capítulo 4.2, a Figura 4.11 apresenta os dados de corrente e campo elétrico associados aos quadros das câmeras rápidas que registraram este evento. A partir da análise da figura, nota-se que além das imagens da câmera rápida, os pulsos de corrente e o sinal de campo elétrico comprovam essa “disputa”, entre os líderes do P1 e P2, pela conexão.

Foi feita separadamente uma análise do caso B, e elaborada a Tabela 5.3 contendo os valores de M, MA e MG deste evento. Observa-se, portanto que a média aritmética do intervalo entre pulsos encontrada no caso B é de 15,7 μ s. É possível verificar que durante a competição, pela conexão, entre líderes ascendentes, o intervalo entre pulsos de duas estruturas muito próximas acaba sendo metade do valor encontrado para a tentativa de apenas uma estrutura.

Entre o quadro *V12 1a* e *V12 19J* (Figura 4.12), os pulsos de corrente se intercalam, no decorrer do evento. A partir do quadro *V12 20Km* os pulsos do P1 e P2 começam a ocorrer simultaneamente, até que a amplitude dos pulsos do P2 se sobrepõe a do P1.

Tabela 5.3 – Médias de intervalo entre pulsos e amplitude da corrente elétrica para o Caso B.

CASO B		N	MA	MG	M
P1 e P2	intervalo entre pulsos (μ s)	33	15,7	10,4	13,0
	amplitude da corrente (A)	34	123,8	89,7	91,0

Fonte: Produção da autora.

5.1.2 Amplitude dos pulsos de corrente elétrica

A média aritmética de I_p para os pulsos de LAC foi de 178,5 A e LANC 64,8 A (Tabela 5.1). A Figura 5.2 apresenta a amplitude de corrente dos pulsos de LAC (caso B) e LANC

(casos A e B) em relação ao tempo de ocorrência dos eventos. Observa-se que a amplitude dos pulsos de corrente do LAC, anteriores aos primeiros 200 μs têm pouca variação (Figura 5.2a). O aumento da amplitude começa a partir do pulso de corrente *V12 16H* (413 A). Embora o pulso seguinte tenha amplitude baixa (*V12 17I* = 95 A), a partir deste momento a amplitude dos pulsos de LAC cresce continuamente, até o instante da conexão.

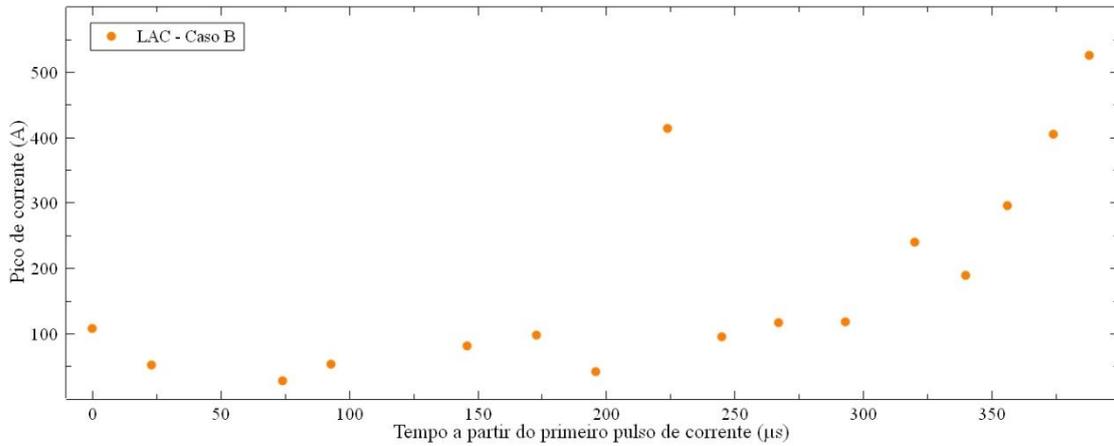
Observando os gráficos da Figura 5.2, nota-se que nos 200 μs que antecederam a conexão nos casos A e B, o LANC do caso A manteve a amplitude dos pulsos de corrente próxima a 40 A, enquanto a amplitude dos pulsos do LANC do caso B aumentava 2,5 vezes, até o momento da DR.

A principal causa da estabilidade ou do aumento no valor de I_p dos líderes ascendentes, é a variação da quantidade de carga introduzida no canal desses líderes. Toda a carga elétrica que compõe o canal de LACs e LANCs é induzida pela variação do campo elétrico produzido pela aproximação do líder descendente.

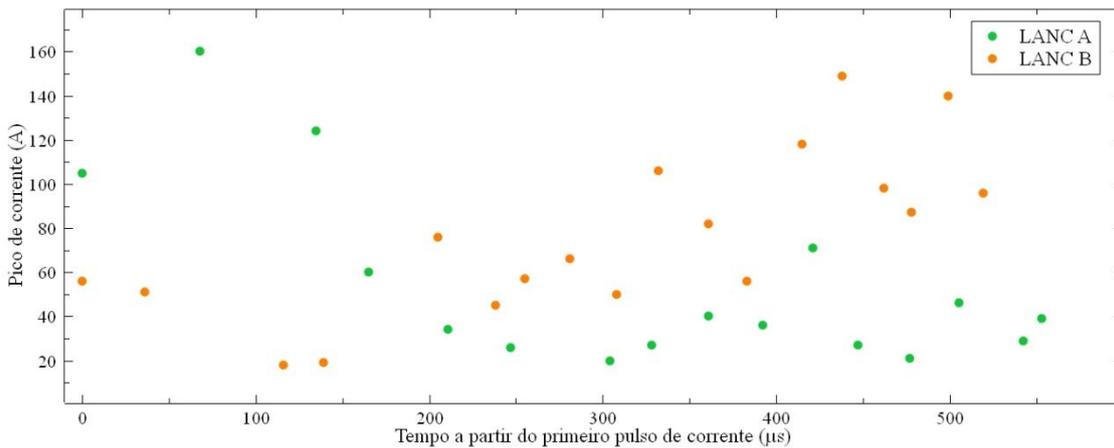
Quanto maior a carga no canal do líder escalonado maior a variação do campo elétrico na extremidade das estruturas no solo, bem como, sua aproximação intensifica o campo elétrico ambiente nas superfícies. Assim, quanto maior a quantidade de carga na extremidade do líder descendente e quanto mais próximo ele estiver do para-raios, maior será a quantidade de carga induzida no canal do líder ascendente.

Figura 5.2 – Gráfico da amplitude do sinal de corrente.

a) Dados do LAC.



b) Dados dos LANCs.



Fonte: Produção da autora.

O caso A, contém as maiores amplitudes do sinal de corrente no início do evento (primeiros 150 μs). Observando a Figura 4.1 é possível ver uma das ramificações do líder descendente acima do P1 P2. Acredita-se que os primeiros pulsos de corrente dos LANCs tenham sido induzidos por ramificações do líder descendente que, muito provavelmente, se encontravam mais próximas do P1 e P2 antes de se aproximarem do L1 onde acabou se conectando. Já no caso B, a aproximação do líder descendente que atinge o P2 aumenta cada vez mais a intensidade dos pulsos de LANC e LAC que se originam no P1 e P2 respectivamente.

O caso C contém apenas três pulsos de corrente. A DR deste evento ocorre a aproximadamente 1 km dos prédios P1 P2, com I_p de -30 kA (Tabela 5.4). Especula-se que as ramificações do líder escalonado estavam a uma longa distância do P2, por essa razão, apenas três pulsos de corrente foram induzidos.

Comparando as situações em que esses três eventos ocorreram (distância da DR em relação ao para-raios e o I_p produzido), os casos A e C são semelhantes em valor de I_p da DR, mas diferem na distância entre a DR e o para-raios de onde os LANCs iniciaram (prédio P2). Pelos dados obtidos, observa-se que durante o caso A, o canal no líder escalonado se encontrava mais próximo do P2 e, por consequência, induziu mais pulsos de corrente no para-raios.

5.1.3 Colapso da corrente

No instante em que o líder descendente se conecta ao solo, há uma inversão na polaridade da corrente no para-raios. Isto se deve ao fato de a direção do campo elétrico ambiente ser rapidamente invertida em razão da neutralização de cargas do líder negativo pela descarga de retorno. As cargas que se encontram no LANC deslocam-se em direção ao para-raios resultando em seu colapso (NAG et al., 2021). Esta fase do evento é chamada de “fase de colapso”.

O sinal de corrente dos LANCs, adquirido durante os três casos, apresenta a mesma característica da fase de colapso do trabalho de Schoene et al. (2008), Visacro et al. (2010) e Nag et al. (2021) (ver as figuras 6, 8 e 2, respectivamente, dos autores). Durante essa fase, foram observados “pulsos de colapso do LANC” nos casos A e B (Figura 4.4 e Figura 4.11).

As imagens adquiridas pela câmera rápida, durante o caso A, apresentam os canais de LANC dos prédios P1 e P2, ainda ativos, durante a fase de colapso (Figura 4.5 V711 28, 29 e 30). O sinal de corrente associado às imagens, reforçam a ideia de que esses pulsos são da corrente de colapso do LANC.

Assim como na fase de desenvolvimento existem pulsos de corrente de polaridade positiva, durante a fase de colapso ocorrem pulsos em menor quantidade e de polaridade

oposta (negativa). Não foi possível fazer a associação entre os valores de pico de corrente de colapso e o sinal de campo elétrico, pois este segundo saturou durante a DR.

Embora haja registros do sinal de corrente da fase de colapso na literatura, informações específicas sobre esses pulsos, ainda não foram dadas e esclarecimentos não foram feitos. Por isso não se sabe ao certo qual o processo físico por trás dos pulsos observados.

Na Tabela 5.4 são apresentados os valores da amplitude da corrente no instante do colapso, para os três casos além dos parâmetros: distância entre o para-raios e a DR; I_p da DR; máxima amplitude da corrente, durante as fases de desenvolvimento e colapso; máxima extensão e; máximo valor de carga durante o evento.

Tabela 5.4 – Dados gerais dos eventos ocorridos.

Evento	Distância da DR (m)	Ip da DR (kA)	Máxima amplitude de corrente (A)		Máxima extensão (m)	Máximo valor de carga (C)	
			Fase inicial	Fase final		Fase inicial	Fase final
LANC A	200	-36	160	-344	37	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-3}$
LANC B	26,5	-73	149	-704	35	$3,7 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-3}$
LANC C	1.000	-30	78	-37	20	$5,5 \times 10^{-4}$	$2,7 \times 10^{-4}$
LAC	0	-73	525	-	42	$1,3 \times 10^{-2}$	-

Fonte: Produção da autora.

5.2 Carga transferida

A propagação do líder escalonado em direção ao solo, intensifica o campo elétrico nas extremidades das estruturas no solo. Como consequência, cargas de polaridade oposta são depositadas, por indução, nas extremidades dessas estruturas. Esse acúmulo de cargas cresce com a aproximação do líder descendente. A partir de um certo valor de campo elétrico, um líder se inicia na ponta dos para-raios e a partir de então a intensificação do campo resulta na inserção de cargas no canal ionizado do LAC ou LANC.

O deslocamento dessas cargas num intervalo qualquer de tempo, implica em corrente elétrica. Quanto maior a quantidade de carga em movimento em um intervalo de tempo, maior será a amplitude da corrente que passa pelo canal do LAC ou LANC.

Sabe-se que o valor da corrente é obtido a partir da variação da carga pelo tempo, Equação 5.1.

$$i = \frac{dQ}{dt} \quad (5.1)$$

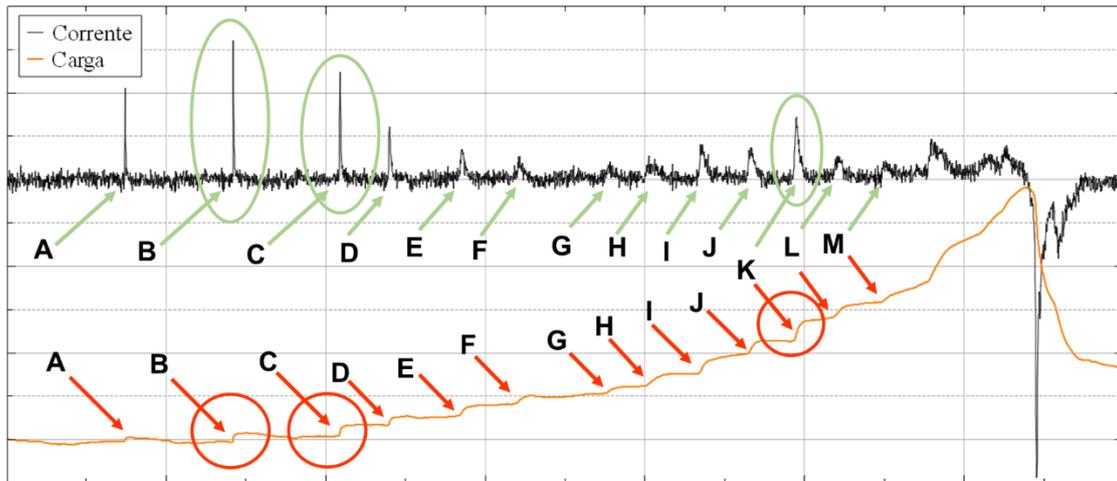
Dessa forma, para obter os valores da carga transferida para o canal do LANC, durante o evento, aplica-se a Equação 5.2.

$$Q = \int i dt \quad (5.2)$$

A curva em laranja na Figura 4.6, Figura 4.13 e Figura 4.19 apresentam respectivamente, a carga transferida durante os eventos A, B e C. Pulsos de corrente elétrica (indicados na figura pelas setas verdes) aparecem como degraus no gráfico da transferência de carga (Figura 5.3). Nota-se que nos pulsos B, C e K a variação de carga no tempo é superior aos pulsos próximos (círculo laranja), resultando em pulsos de corrente de maior amplitude (círculos verdes) se comparados aos outros pulsos.

Como visto anteriormente, a inversão da polaridade de corrente se deve ao colapso do LANC. Entretanto é possível verificar que após a conexão do líder escalonado, o valor da carga não retorna a zero em nenhum dos três casos. Segundo Cooray (2015) durante a fase de formação dos *streamers* elétrons livres são perdidos no momento da colisão com o oxigênio presente no ar. Além disso, uma grande quantidade de energia de campo elétrico adquirida pelos elétrons é utilizada na excitação molecular. Esses argumentos explicam a questão de a quantidade de carga no canal do LANC não retornar a zero após o colapso.

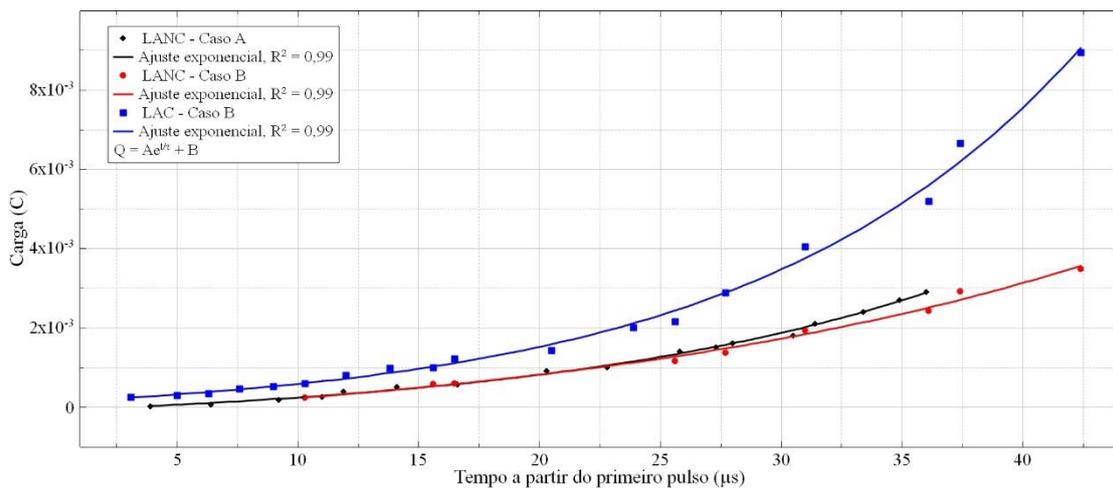
Figura 5.3 – Variação de carga no tempo associada aos pulsos de corrente.



Fonte: Produção da autora.

Para uma melhor visualização da evolução da quantidade de carga transferida para o canal do LAC e LANCs foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 5.4. Foi feito um ajuste exponencial para cada um dos eventos e os valores das variáveis da equação são apresentados na Tabela 5.5. O último valor de carga do LAC e LANC foram desconsiderados pois neste instante ocorreu o *final Jump*.

Figura 5.4 – Gráfico com o ajuste exponencial usado para a variação da carga com o tempo.



Fonte: Produção da autora.

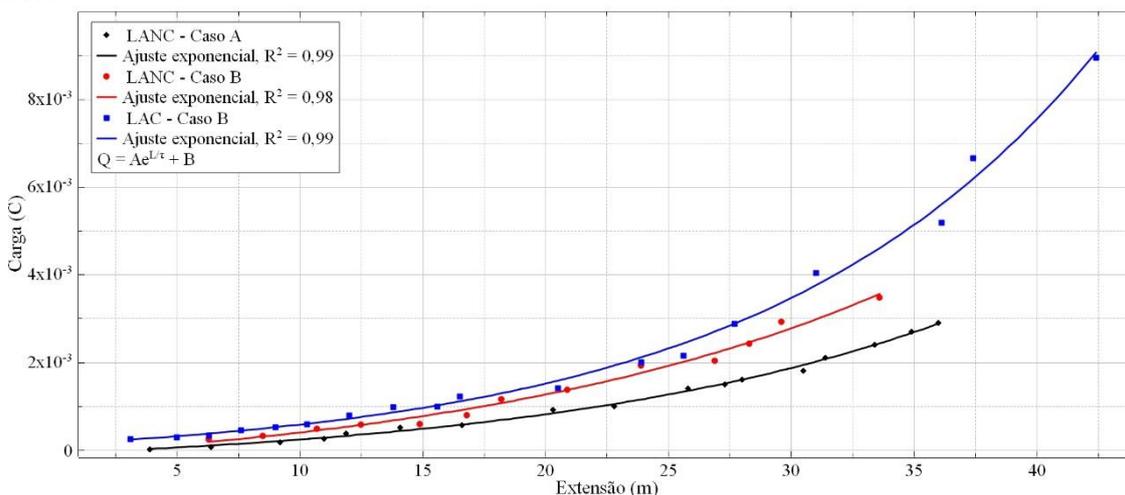
Tabela 5.5 – Tabela dos valores das variáveis da função exponencial ($Q = Ae^{t/\tau} + B$) da carga pelo tempo.

Registro	A ($\times 10^{-4}$)	B ($\times 10^{-4}$)	τ
LANC - Caso A	3,8	-4,6	16,6
LANC - Caso B	6,9	-8,5	22,9
LAC - Caso B	4,1	-2,8	13,6

Fonte: Produção da autora.

Os dados de carga transferida em relação a extensão dos líderes ascendentes, são apresentados no gráfico da Figura 5.5. Para verificar a correlação entre os dados, foi feito o ajuste exponencial que se mostrou excelente ($R^2 = 0,99$). A Tabela 5.6 contém os valores das variáveis que compõem a equação da curva de ajuste, para cada líder.

Figura 5.5 – Gráfico com o ajuste exponencial usado para a variação da carga com a extensão do líder.



Fonte: Produção da autora.

Tabela 5.6 – Tabela dos valores das variáveis da função exponencial ($Q = Ae^{L/\tau} + B$) da carga pela extensão.

Registro	A ($\times 10^{-4}$)	B ($\times 10^{-4}$)	τ
LANC - Caso A	3,8	-4,5	16,5
LANC - Caso B	6,7	-7,6	17,9
LAC - Caso B	4,0	-2,7	13,5

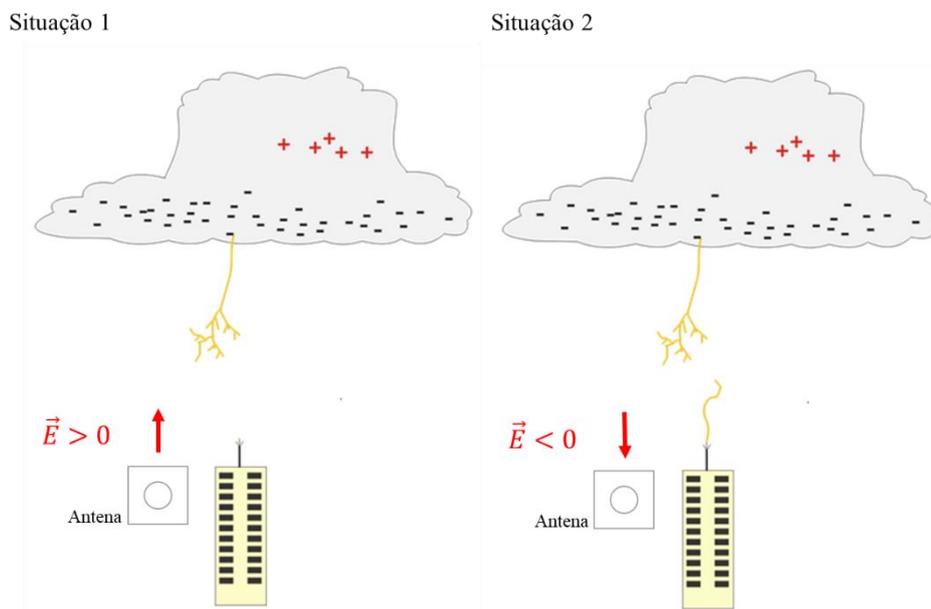
Fonte: Produção da autora.

A partir da análise dos ajustes feitos nos gráficos da Figura 5.4 e Figura 5.5, nota-se excelente correlação entre as variáveis ($R^2 > 0,98$), demonstrando que a quantidade de carga inserida no canal dos líderes ascendentes aumenta exponencialmente em relação ao tempo de ocorrência do evento e em relação a extensão destes líderes.

5.3 Sinal de campo elétrico

Durante a ocorrência dos três casos, observou-se o sinal de campo elétrico relativo à aproximação do líder escalonado e, à evolução do líder ascendente. Neste trabalho, foi utilizada a convenção da física para determinar a orientação do campo elétrico, isto é, o campo é positivo quando aponta para cima (Figura 5.6). No entanto o sinal de campo elétrico plotado nos gráficos deste trabalho encontram-se com a polaridade invertida para fins ilustrativos.

Figura 5.6 – Convenção física da direção do campo elétrico.



A direção do campo elétrico está representada pela seta em vermelho. A situação 1 ocorre quando o líder escalonado está se aproximando do para-raios. A situação 2 ocorre quando do para-raios, que se encontra próximo ao sensor de campo elétrico, parte o líder ascendente com carga contrária.

Fonte: Produção da autora.

Como a extremidade do líder escalonado é carregada negativamente, durante sua aproximação, o sinal do campo elétrico aumenta no sentido positivo ($\Delta E > 0$). No entanto, quando o líder ascendente surge no para-raios a poucos metros do sensor, a influência da carga positiva é grande. Como consequência, o sinal do campo elétrico inverterá abruptamente sua polaridade, tornando-se negativo ($\Delta E < 0$).

Por maior que seja a quantidade de cargas negativas na extremidade do líder descendente, o líder ascendente encontra-se muito mais próximo do sensor. Por isso sempre que ocorre um pulso de corrente do LAC ou LANC o campo inverte rapidamente o sentido. Esse processo se repete até o momento da conexão do líder descendente com o solo.

Para melhor visualização da situação, observa-se a Figura 4.11 do caso B. Neste evento, além do sinal de campo elétrico, foram adquiridas informações do sinal de corrente para o P1 e P2. Nota-se que o sinal de campo elétrico é invertido e intensificado a cada pulso de corrente elétrica. Ao analisarmos o sinal de campo elétrico durante a evolução dos líderes em ambos os prédios, nota-se que a intensificação deste sinal é mais acentuada quando os pulsos de corrente partem do para-raios do P2 que se encontra mais perto do sensor de campo elétrico.

No caso A (Figura 4.4), o sinal de corrente foi adquirido apenas para o P2, entretanto ao analisar a curva de campo elétrico nota-se que ocorre a intensificação da inversão não apenas para os pulsos de corrente no P2, mas também para os pulsos de corrente no P1 (vistos por intermédio da câmera rápida).

O sinal de campo elétrico apresentado por Schoene et al. (2008), mesmo distante 250 m do condutor vertical (autor não especificou a taxa de aquisição em seu trabalho), exhibe as mesmas características da curva de campo elétrico apresentadas neste trabalho (ver Figura 2.11).

Os dados de campo elétrico apresentados por Visacro et al. (2010) e Visacro; Guimaraes; Murta Vale (2017) (distante 50 m da estrutura, com taxa de aquisição de 100 kS/s), não contêm as assinaturas dos pulsos de LANC encontradas neste trabalho (Figura 2.12).

Confrontando os dados deste trabalho com os de Visacro; Guimaraes; Murta Vale (2017), acredita-se que além da proximidade da antena de campo elétrico ao local do evento, a taxa de aquisição utilizada também influencia na obtenção de detalhes do sinal. Em nosso

caso, uma frequência de aquisição maior, permite uma melhor distinção dos pulsos, e menor distância do local do evento fornece mais clareza na amplitude desses pulsos.

5.4 Extensão e velocidade dos líderes ascendentes

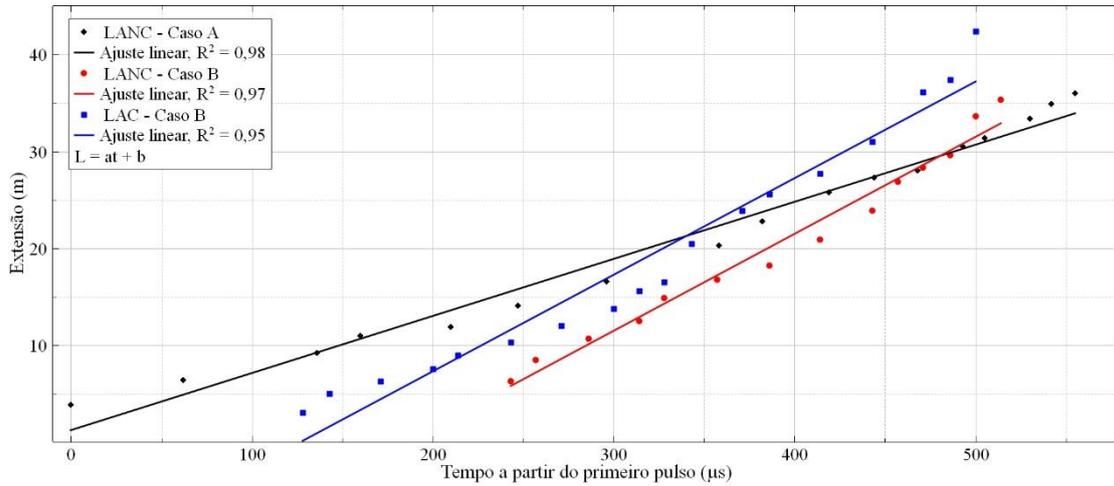
Para calcular a extensão e velocidade dos líderes ascendentes conectivos e não conectivos, apenas as imagens da câmera rápida foram utilizadas. Dessa forma, esses valores puderam ser calculados para os dois prédios, durante a ocorrência dos três eventos.

Para cada caso, foi feita uma estimativa do tamanho, em metros, do pixel a partir de dimensões conhecidas, p. ex. altura dos andares do edifício ou, da haste do para-raios. As tabelas contendo os valores destes parâmetros (quadro a quadro) encontram-se nos Apêndices A, B e C respectivamente, para os três casos.

A Figura 5.7 apresenta o gráfico de extensão dos líderes ascendentes em relação ao tempo de ocorrência. Um ajuste linear foi feito para cada um dos eventos, e a correlação entre as variáveis foi alta, como mostra o valor de R^2 no gráfico. Os valores de máxima extensão e velocidade e dos parâmetros da equação da reta, são apresentados na Tabela 5.7.

A velocidade média do LANC A foi $5,9 \times 10^4$ m/s e a extensão ~ 37 m. O LANC B teve velocidade média de $1,0 \times 10^5$ e extensão de ~ 35 m. O LAC teve maior velocidade média e extensão $1,2 \times 10^5$ m/s e ~ 42 m. Estes resultados são compatíveis com os encontrados no trabalho de Gao et al. (2014) e Visacro; Guimaraes; Murta Vale (2017).

Figura 5.7 – Extensão dos líderes ascendentes em relação ao tempo.



Fonte: Produção da autora.

Os primeiros dois pontos do LANC no caso B foram desconsiderados neste gráfico. Embora tenha ocorrido uma tentativa de líder em $t = 0$, este líder só começou a se propagar após $t = 200 \mu\text{s}$.

Tabela 5.7 – Extensão e velocidade dos líderes ascendentes.

Registro	Extensão (m)	Velocidade (m/s)	$a (\times 10^{-2})$	b
LANC - Caso A	37,0	$5,9 \times 10^4$	5,9	1,3
LANC - Caso B	35,3	$1,0 \times 10^5$	0,1	-18
LAC - Caso B	42,4	$1,2 \times 10^5$	0,1	-12

Fonte: Produção da autora.

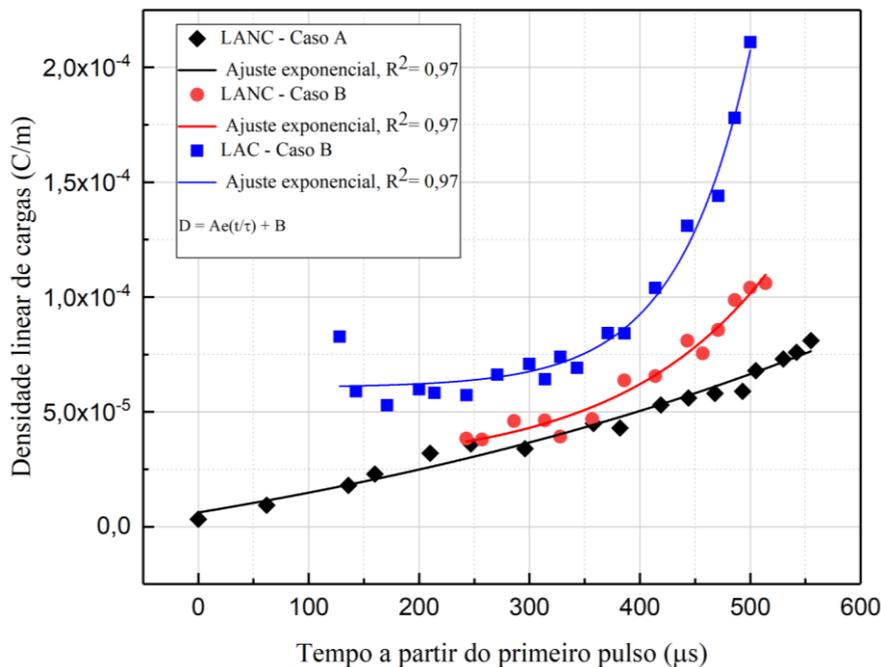
Análises estatísticas de imagens em 3D de LANCs, realizadas por Gao et al. (2014), comprovam que a velocidade real desses líderes é de 1,3 vezes maior que os valores obtidos nas imagens em 2D, como as utilizadas neste trabalho. Para uma possível comparativa, futuramente dados em 3D de estruturas baixas serão adquiridos.

5.5 Densidade linear de cargas

A densidade linear de cargas foi calculada para os casos nos quais houve registro de sinal de corrente. O gráfico que relaciona a densidade de carga com o tempo de ocorrência do

evento, para os casos A e B é apresentado na Figura 5.8. Nesta análise o caso C foi desconsiderado pois foram obtidas apenas três medidas.

Figura 5.8 – Densidade linear de cargas.



Fonte: Produção da autora.

O ajuste utilizado para os pontos, foi o exponencial. O valor de $R^2 = 0,97$ indica que a correlação entre as variáveis é alta. Os valores dos parâmetros da equação exponencial, são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Tabela dos valores das variáveis da função exponencial da variação da densidade de carga com o tempo.

Registro	A	B ($\times 10^{-5}$)	τ
LANC - Caso A	$5,1 \times 10^{-5}$	4,5	643
LANC - Caso B	$1,9 \times 10^{-6}$	2,5	136
LAC - Caso B	$6,9 \times 10^{-8}$	6,0	65

Fonte: Produção da autora.

Nota-se que densidade de cargas aumenta exponencialmente com o alongamento do líder ascendente, como consequência da aproximação do líder escalonado. O LANC do caso A, tem densidade de cargas menor que o LANC do caso B e ambos, possuem densidade de carga inferior ao LAC.

A Tabela 5.9 apresenta os valores de I_p da DR, a distância do ponto de contato com o solo em relação aos para-raios, a extensão do líder ascendente e a densidade linear de cargas. A menor densidade observada pertence ao caso A. O líder descendente se conectou a 200 m do local do para-raios que gerou o LANC, com I_p da DR de -36 kA. O líder descendente que induziu o LANC do caso B, se conectou a apenas 26,5 m de distância do para-raios do P1 e o I_p da DR (-73 kA) foi aproximadamente o dobro da gerada no caso A.

Tabela 5.9 – Dados gerais dos eventos ocorridos.

Registro	I_p DR (kA)	Distância (m)	Extensão (m)	Densidade linear (C/m)
LANC - Caso A	-36	200	37	$8,1 \times 10^{-5}$
LANC - Caso B	-73	26,5	35	$1,1 \times 10^{-4}$
LAC - Caso B	-73	0	42	$2,1 \times 10^{-4}$

Fonte: Produção da autora.

A densidade de carga observada no LAC foi duas vezes maior que o valor do LANC no mesmo evento. Durante as análises deste trabalho, notou-se que tanto em extensão quanto em densidade, o LAC diferenciava-se do LANC, durante toda a ocorrência do evento.

O valor médio da densidade de carga dos LANCs encontrado neste trabalho foi $9,5 \times 10^{-5}$ C/m, aproximadamente 1×10^{-4} C/m. Em seu trabalho, Miki et al. (2009) obteve o valor de 2×10^{-4} C/m para a densidade linear de carga dos LANCs. Já Cooray; Becerra (2012) por intermédio do modelo SLIM encontraram uma densidade linear de carga de $6,5 \times 10^{-7}$ C/m. Esses valores encontram-se na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Densidade linear de cargas encontradas na literatura.

Literatura	Densidade linear de carga (C/m)
Miki et al. (2009)	$2,0 \times 10^{-4}$
Cooray e Becerra (2012)	$6,5 \times 10^{-7}$
Este trabalho	$9,5 \times 10^{-5}$

Fonte: Produção da autora.

6 CONCLUSÕES

A importância deste trabalho está na originalidade dos dados adquiridos pelos sensores utilizados durante o período em que a campanha P1 P2 foi realizada. Diferentemente de artigos encontrados na literatura, este trabalho obteve e analisou dados de líderes ascendentes produzidos naturalmente por estruturas consideradas baixas, menores que 60 m.

Os principais objetivos deste trabalho foram: 1) conhecer as características físicas de LACs e LANCs e a partir da análise e correlação das informações adquiridas, compreender os processos físicos envolvidos na conexão do raio com estruturas; e 2) analisar a intensidade dessas respostas (extensão, corrente e carga elétrica) e a partir desses valores dar subsídios para a avaliação do impacto causado em estruturas, equipamentos e pessoas.

1) Características físicas de LACs e LANCs.

a) Extensão e velocidade: O aumento da extensão do LAC e dos LANCs é linear. Verificou-se que os LANCs do caso A e B alcançaram uma extensão de 37 e 35 m, respectivamente e o LAC, no quadro registrado antes do salto final, 42 m. A velocidade média dos LANCs é de $\sim 7,9 \times 10^4$ m/s, para o LAC esse valor foi $\sim 1,2 \times 10^5$ m/s. Observou-se que o LAC tem maior extensão e velocidade que os LANCs analisados neste trabalho.

b) Corrente e carga elétrica: Observou-se que durante a aproximação do líder descendente, estruturas vizinhas se intercalam na tentativa de conexão. As medidas de corrente do caso B mostraram que ~ 100 μ s antes da DR, essas tentativas ocorrem simultaneamente.

O intervalo médio entre pulsos de LAC e LANC encontrado para os três casos foi de 26 e 33 μ s, respectivamente, similar ao intervalo entre passos do líder escalonado que é entre 20 e 50 μ s. Com a aproximação do líder descendente, o intervalo entre pulsos diminui.

Quanto maior a proximidade do líder descendente, maior a amplitude dos pulsos de corrente dos LACs e LANCs, sendo que a amplitude dos pulsos de LAC são maiores do que as de LANCs.

O aumento de carga transferida para o canal dos líderes ascendentes com o tempo é exponencial. Já a extensão do LAC/LANC aumenta linearmente com o tempo. Assim sendo a densidade de cargas dos LACs e LANCs se comporta também de forma exponencial.

c) Campo elétrico: Os casos analisados mostram que a variação do sinal de campo elétrico inverte sempre que ocorrem pulsos de corrente elétrica de LAC ou LANC p. ex. Figura 4.4. Essa inversão na variação do campo elétrico produzida pelos pulsos de LAC e LANC tem o mesmo sentido que a variação produzida pela DR. Observou-se, ainda que a inversão na variação do campo elétrico é tanto mais acentuada quanto mais próximo o sensor está do líder ascendente.

2) Subsídios para a avaliação do impacto.

Foi observado como os LACs e LANCs se comportam. Os pontos de origem, qual sua velocidade e extensão, corrente elétrica, intervalo de tempo entre os pulsos e o que governa esses intervalos. Medidas como estas são raras, ainda mais com o auxílio de câmera rápida.

O mapeamento dos LANCs em edifícios convencionais permitirá que as normas de proteção contra descargas atmosféricas sejam adaptadas à real ocorrência de possíveis pontos de conexão dos raios. Estruturas sem a devida proteção podem emitir LANCs de suas bordas. Caso essa área não esteja protegida, um LANC se converterá em LAC resultando na DR que danifica as estruturas.

Foram apresentados valores fundamentais que poderão contribuir com as normas de proteção oferecendo subsídios para proteger locais onde ocorrem LANCs, além de conscientizar pessoas da intensidade da corrente elétrica que pode atravessar o corpo de uma vítima no momento em que um LANC ocorre.

Para dar continuidade na pesquisa, um projeto de observação de edifícios residenciais, semelhante ao P1 P2, será desenvolvido na cidade de São José dos Campos, no estado de São Paulo. Câmeras de alta velocidade e sensores de corrente serão operados em conjunto para o estudo de como os LACs e LANCs são induzidos por diferentes ramificações de uma única descarga descendente. Para uma melhor análise da resposta dos para-raios à

ramificação do líder descendente será de grande importância uma observação 3D do evento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-3**: proteção contra descargas atmosféricas parte 3: danos físicos a estruturas e perigos à vida. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BALLAROTTI, M. G.; MEDEIROS, C.; SABA, M. M. F.; SCHULZ, W.; PINTO, O. Frequency distributions of some parameters of negative downward lightning flashes based on accurate-stroke-count studies. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 117, n. D06112, p. 8, 2012.

BECERRA, M.; COORAY, V. On the interaction of lightning upward connecting positive leaders with humans. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 51, n. 4, p. 1001–1008, 2009.

COMANDO DA AERONÁUTICA. **Códigos meteorológicos METAR e SPECI**. 2017. Disponível em: <<http://edmcasereports.com/articles/endocrinology-diabetes-and-metabolism-case-reports/10.1530/EDM-18-0018>>.

COOPER, M. A.; HOLLE, R. L. **Reducing lightning injuries worldwide**. [S.l.]: Springer, 2019. 153–160 p. ISBN 978-3-319-77561-6.

COOPER, M. A.; HOLLE, R. L.; ANDREWS, C. J. Distribution of lightning injury mechanisms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 30., 2010. **Proceedings...** 2010. p. 1325-1-1325–4.

COORAY, V. **The lightning flash**. 2. ed. London: The Institution of Engineering and Technology, 2014. ISBN 9781849196918.

COORAY, V. **An introduction to lightning**. [S.l.]: The Institution of Engineering and Technology, 2015. 386 p. ISBN 9789401789387.

COORAY, V.; BECERRA, M. Attractive radii of vertical and horizontal conductors evaluated using a self consistent leader inception and propagation model-SLIM.

Atmospheric Research, v. 117, p. 64–70, 2012.

CUMMINS, K. L.; KRIDER, E. P.; OLBINSKI, M.; HOLLE, R. L. A case study of lightning attachment to flat ground showing multiple unconnected upward leaders.

Atmospheric Research, v. 202, p. 169–174, 2018.

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**, v. 149, p. 193–203, 2014.

HECKMAN, S. **Why does a lightning flash have multiple strokes?** [S.l.]:

Massachusetts Institute of Technology, 1992.

HILL, J. D.; MATA, C. T. High-speed video observations of downward negative lightning attachment to tall structures at the Kennedy Space Center. In:

INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 34., 2018, Rzeszow. **Proceedings...** Rzeszow: ICLP, 2018.

HUNT, H. G. P.; BLUMENTHAL, R.; NIXON, K. J.; GOMES, C. A multidisciplinary forensic analysis of two lightning deaths observed in South Africa. **International**

Journal of Disaster Risk Reduction, v. 51, p. 101814, 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Glossário**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=glossario#R>> . Acesso em: 1 fev. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS - INPE/CPTEC. **Glossário**. Disponível em: <<https://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml#r>>. Acesso em: 1 fev. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA - INPE/ELAT. **Official webpage providing Ng data for the new Brazilian standard on lightning protection**. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/ABNT_NBR5419_Ng/>. Acesso em: 2 jan. 2017.

JIANG, R.; QIE, X.; WANG, Z.; ZHANG, H.; LU, G.; SUN, Z.; LIU, M.; LI, X. Characteristics of lightning leader propagation and ground attachment. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 120, p. 775–791, 2015.

JOHNSON, L. B. **NASA facts**. Disponível em: <http://www.nasa.gov/centers/glenn/pdf/84790main_fs03grc.pdf>. Acesso em: 7 maio. 2020.

KRIDER, E. P.; WEIDMAN, C. D.; NOGGLE, R. C. The electric fields produced by lightning stepped leaders. **Journal of Geophysical Research**, v.82, n.6, p.951-960, 1977.

LU, W.; CHEN, L.; MA, Y.; RAKOV, V. A.; 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**, v. 40, p. 5531–5535, 2013.

LU, W.; CHEN, L.; ZHANG, Y.; MA, Y.; GAO, Y.; YIN, Q.; CHEN, S.; HUANG, Z.; ZHANG, Y. Characteristics of unconnected upward leaders initiated from tall structures observed in Guangzhou. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, n. D19211, p. 1–12, 2012.

LU, W.; ZHANG, Y.; CHEN, L.; ZHOU, E.; ZHENG, D.; ZHANG, Y.; WANG, D. Attachment processes of two natural downward lightning flashes striking on high structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 30., 2010, Cagliari. **Proceedings...** Cagliari, 2010

MARINHA DO BRASIL. **Manual do observador meteorológico**. 2015. Disponível em: <<https://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/noticias/Manual-Observador-Completo.pdf>>.

MIKI, M.; MIKI, T.; ASAKAWA, A.; SHINDO, T. Measurement of line charge density of lightning leader. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ELECTROMAGNETIC RADIATION FROM LIGHTNING TO TALL STRUCTURES, 4., 2009. **Proceedings...** 2009. p. 3715.

NACCARATO, K. P.; SARAIVA, A. C. V.; SABA, M. M. F.; SCHUMANN, C. First performance analysis of BrasilDAT total lightning network in southeastern Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING; INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS, 5., 2012, Bonito. **Proceedings...** Bonito, 2012

NAG, A.; CUMMINS, K. L.; PLAISIR, M. N.; WILSON, J. G.; CRAWFORD, D. E.; BROWN, R. G.; NOGGLE, R. C.; RASSOUL, H. K. Inferences on upward leader characteristics from measured currents. **Atmospheric Research**, v. 251, p. 105420,

2021.

NAG, A.; MURPHY, M. J.; SCHULZ, W.; CUMMINS, K. L. Lightning locating systems: insights on characteristics and validation techniques. **Journal of Geophysical Research: Earth and Space Science**, v. 2, p. 65–93, 2015.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning physics and effects**. 3. ed. New York: Cambridge University Press, 2003. 687 p. ISBN 9781107340886.

RIZK, F. A. M. Modeling of lightning exposure of buildings and massive structures. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 24, n. 4, p. 1987–1998, 2009.

SABA, M. M. F.; BALLAROTTI, M. G.; PINTO JÚNIOR, O. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, n. D03101, p. 1–9, 2006.

SABA, M. M. F.; FERRO, M. A. S.; CUADROS, E. T.; CUSTÓDIO, D. M.; NAG, A.; SCHUMANN, C.; COORAY, V.; PAIVA, A. R.; LAURIA, P. B.; MEDEIROS, D. S. F.; HETTIARACHCHI, P.; RASSOUL, H. K. High-speed video observation of a dart leader producing X-rays. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 124, n. 12, p. 10564–10570, 2019.

SABA, M. M. F.; PAIVA, A. R.; SCHUMANN, C.; FERRO, M. A. S.; NACCARATO, K. P.; SILVA, J. C. O.; SIQUEIRA, F. V. C.; CUSTODIO, D. M. Lightning attachment process to common buildings. **Geophysical Research Letters**, v. 44, p. 4368–4375, 2017.

SABA, M. M. F.; SCHUMANN, C.; WARNER, T. A.; FERRO, M. A. S.; PAIVA, A. R.; HELSDON, J.; ORVILLE, R. E. Upward lightning flashes characteristics from high-speed videos. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 121, p. 8493–8505, 27 jul. 2016.

SCHOENE, J.; UMAN, M. A.; RAKOV, V. A.; JERAULD, J.; HANLEY, B. D.; RAMBO, K. J.; HOWARD, J.; DECARLO, B. Experimental study of lightning-induced currents in a buried loop conductor and a grounded vertical conductor. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 50, p. 110–117, 2008.

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

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

VISACRO, S.; GUIMARAES, M.; MURTA VALE, M. H. 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**, v. 122, p. 12,786-12,800, 2017.

VISACRO, S.; MURTA VALE, M. H.; CORREA, G.; TEIXEIRA, A. Early phase of lightning currents measured in a short tower associated with direct and nearby lightning strikes. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. D16104, p. 1–11, 2010.

WALDTEUFEL, P.; METZGER, P. Triggered lightning strokes originating in clear air.

Journal of Geophysical Research, v. 85, n. C5, p. 2861–2868, 1980.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric science**: an introductory survey. 2. ed.

[S.I]: Academic Press, 2006. 488 p. ISBN 9780127329512.

WARNER, T. A. Upward leader development from tall towers in response to downward

stepped leaders. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING

PROTECTION (ICLP), 30., 2010. **Proceedings...** 2010. p. 51–54.

WATERS, C. Current transformers provide accurate, isolate measurements.

Powerconversion and Intellgent Motion, dez.1986.

WILLETT, J. C.; DAVIS, D. A.; LAROCHE, P. An experimental study of positive

leaders initiating rocket-triggered lightning. **Atmospheric Research**, v. 51, n. 3, 1999.

WILLIAMS, E. R. Problems in lightning physics: the role of polarity asymmetry. In:

PLASMA SOURCES SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2006. **Proceedings...** 2006

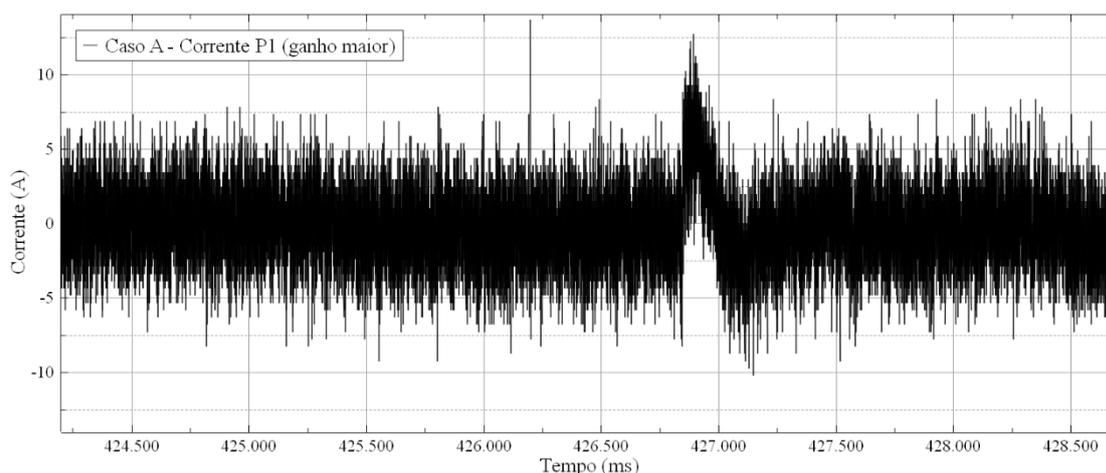
APÊNDICE A – INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES DO CASO A

A.1 – Medidas de corrente elétrica

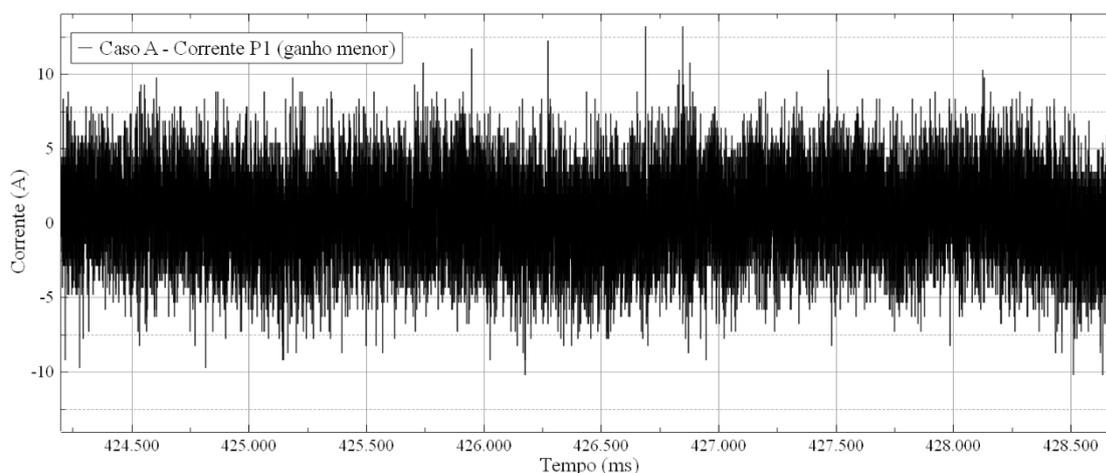
Durante a ocorrência do caso A os transformadores de corrente instalados na base dos para-raios do P1 e P2 adquiriram simultaneamente informações do sinal de corrente produzido pelos LANCs, contudo apenas a informação do ganho maior no P2 pôde ser analisada. A Figura A 1 apresenta o sinal de corrente registrado no P1 (ganho menor e ganho maior) e no P2 (ganho menor). Os dados não puderam ser utilizados pois houve falha no sensor, durante a ocorrência dos eventos.

Figura A 1 – Sinal de corrente elétrica durante a propagação dos LANCs no P1 e P2.

a) Corrente P1 (ganho maior).



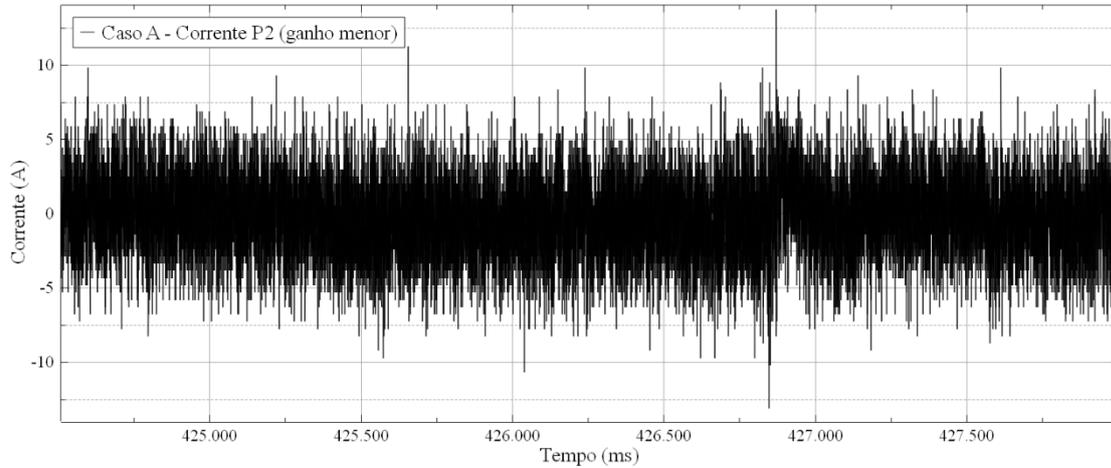
b) Corrente P1 (ganho menor).



continua

Figura A.1 – Conclusão.

c) Corrente P2 (ganho menor).



Fonte: Produção da autora.

A.2 – Câmera rápida e TC Pearson

Durante o tratamento dos dados foram avaliados os valores e o tempo correspondentes a cada pulso de corrente adquirido pelo TC, além da análise feita quadro a quadro do canal visível dos LANCs pela câmera rápida V711. Na câmera rápida, foram anotados os valores de início e término do quadro onde os canais dos LANCs eram visíveis e com isso, identificada uma falta de sincronização entre o instante em que os pulsos de corrente ocorreram (GPS TC Pearson) e o momento do registro da câmera rápida (GPS da câmera).

A DR no vídeo ocorreu entre 798 e 810 μs (o tempo para a câmera gravar um quadro do vídeo é 12 μs). Contudo, o sistema de localização de descargas registrou a DR em 843 μs . Dessa forma, foi verificada uma diferença entre o tempo do vídeo e o sistema de localização, de aproximadamente 39 μs . Os dados gerais do evento (câmera rápida e TC Pearson) são apresentados na Tabela A 1. Para o TC os valores de pico de corrente foram ajustados conforme o atenuador (ganho) utilizado.

Para melhor ilustrar os dados da Tabela A 1, foi elaborada a Figura A 2 que contém os quadros da câmera rápida correspondentes ao desenvolvimento dos canais de LANC no P1 e P2, nomeados a partir dos pulsos de corrente elétrica adquiridos pelo TC no P2. Nota-se que para cada pulso de corrente adquirido pelo TC, existe um único quadro da

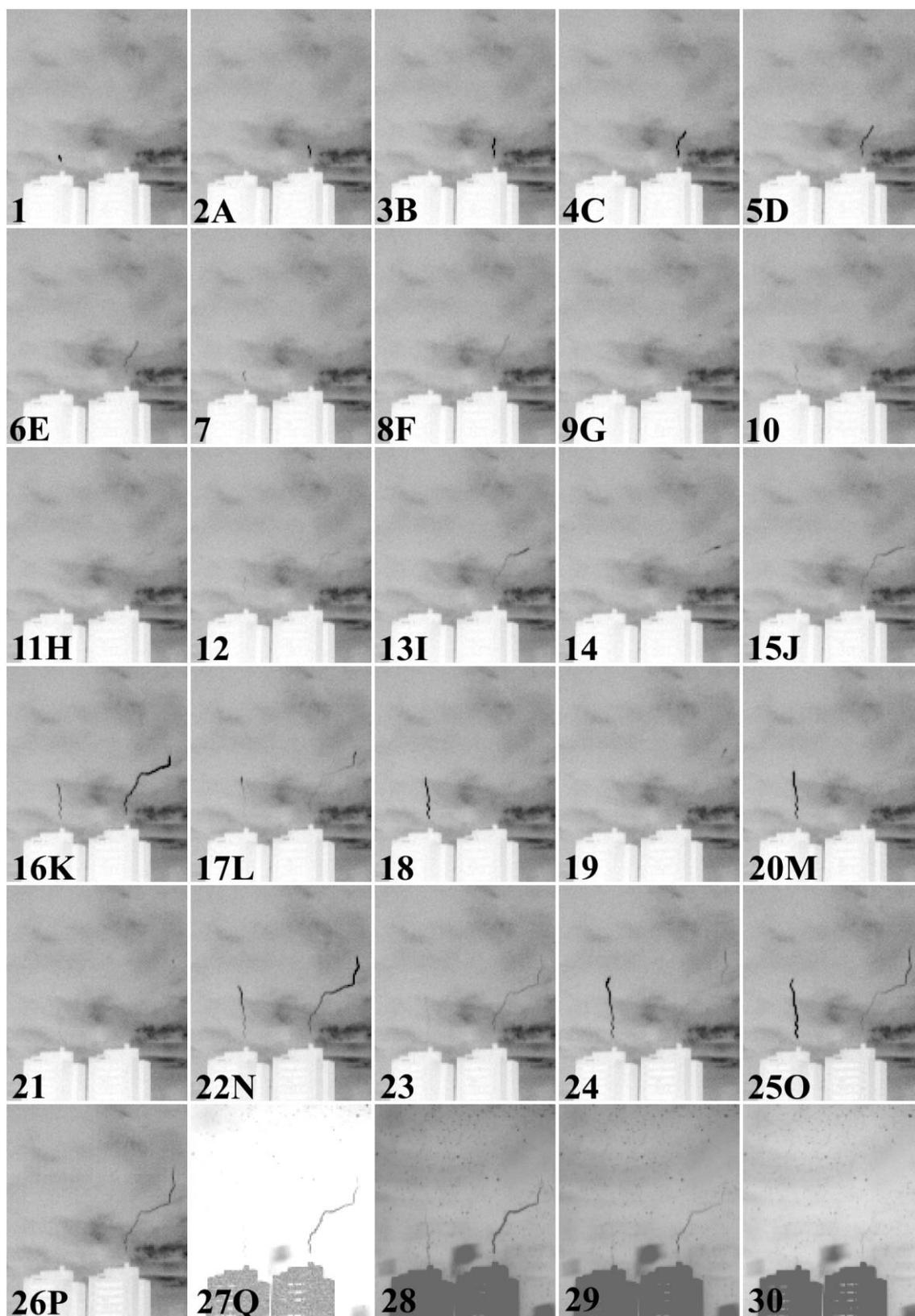
câmera rápida. Isso demonstra que o intervalo entre quadros (IEQ) no qual a câmera foi operada (12 μ s) é o ideal para a aquisição simultânea de dados de corrente de LANC.

Tabela A 1 – Quadros da câmera rápida V711 correspondentes ao alongamento dos canais de LANC no P1 e P2 e valores de pulsos de corrente adquiridos pelo TC (ganho maior) no P2.

Caso A - 24Fev2016 - 18:48:16 426,843 (hh:mm:ss ms, μ s)					
Câmera V711			TC Pearson P2		
Quadro	Início (μ s)	Final (μ s)	Pulso	Tempo (μ s)	Ip (A)
1	197	209			
2	271	283	A	274	105
3	332	344	B	342	160
4	406	418	C	409	124
5	431	443	D	440	60
6	480	492	E	485	34
7	492	505			
8	517	529	F	521	26
9	566	578	G	578	20
10	578	591			
11	591	603	H	602	27
12	603	615			
13	628	640	I	635	40
14	652	665			
15	665	677	J	666	36
16	689	702	K	695	71
17	714	726	L	721	27
18	726	739			
19	739	751			
20	751	763	M	751	21
21	763	775			
22	775	788	N	779	46
23	788	800			
24	800	812			
25	812	825	O	816	29
26	825	837	P	827	39
27	837	849	Q	845	-344
28	849	862			
29	862	874			
30	874	886			

Fonte: Produção da autora.

Figura A 2 – Imagens dos quadros da câmera rápida associados aos pulsos adquiridos no P2.



Fonte: Produção da autora.

A primeira parte da Tabela A 2 apresenta os quadros registrados pela câmera rápida durante o desenvolvimento dos LANCs no P1 e P2 e os IEQ. Para estimar o momento de ocorrência da luminosidade do pulso, foi estipulado o valor médio entre início e final do quadro. A segunda parte da Tabela A 2 apresenta o tempo correspondente aos pulsos adquiridos pelo TC no P2 bem como o intervalo entre picos de corrente (IEP).

Tabela A 2 – IEQ da câmera V711 correspondentes ao desenvolvimento dos canais de LANC no P1 e P2 e valores de IEP no P2.

Caso A - 24Fev2016 - 18:48:16 426,843 (hh:mm:ss ms,µs)							
Quadro	Câmera V711 P1		Câmera V711 P2		Corrente P2 (ganho maior)		
	Tempo (µs)	IEQ (µs)	Tempo (µs)	IEQ (µs)	Pulso	Tempo (µs)	IEP (µs)
1	203				A	274	
2			277		B	342	68
3			338	61	C	409	67
4			412	74	D	439	30
5			437	25	E	485	46
6			486	49	F	521	36
7	498	295			G	578	57
8			523	37	H	602	24
9			572	49	I	635	33
10	584	86			J	666	31
11			597	25	K	695	29
12	609	25	609	12	L	721	26
13			634	25	M	751	30
14	658	49	658	24	N	779	28
15	671	13	671	13	O	816	37
16	695	24	695	24	P	827	11
17	720	25	720	25	Q	845	18
18	732	12					
19			745	25			
20	757	25					
21			769	24			
22	781	24	781	12			
23	794	13	794	13			
24	806	12	806	12			
25	818	12	818	12			
26			831	13			
27	843	25	843	12			

Fonte: Produção da autora.

A.3 – Extensão e velocidade dos LANCs

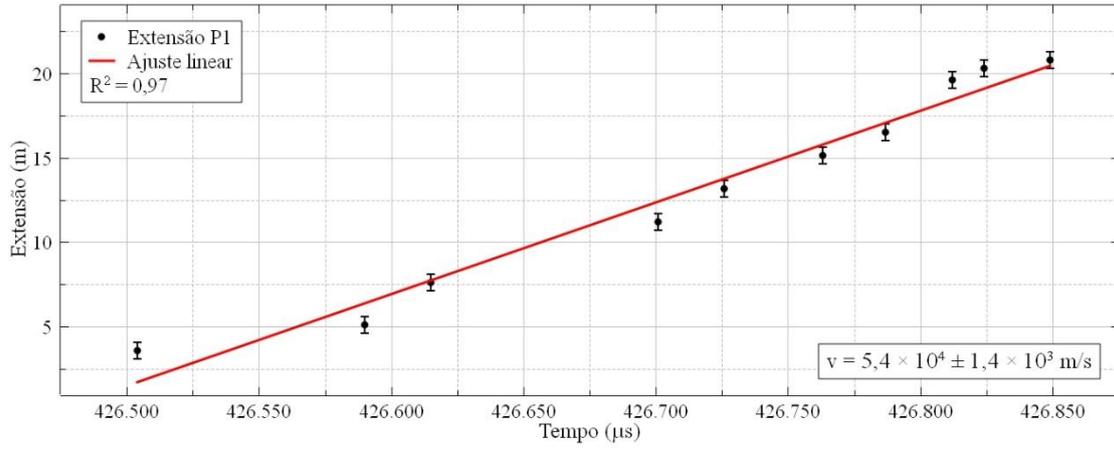
Os valores referentes a extensão e velocidade dos LANCs no P1 e P2 foram calculados a partir da estimativa do valor do pixel, em metros. Como ponto de referência, foram adotadas as coordenadas dos pixels correspondentes à altura equivalente a quatro andares do prédio. Sabendo-se que a distância entre andares é de 2,7 m e que 4 andares correspondem a um total de 22 pixels, a altura de cada pixel foi calculada em 0,49 m. Os dados para gerar os gráficos de extensão e velocidade do LANC no P1 e P2 estão contidos na Tabela A 3. A Figura A3 apresenta os valores de extensão e curva de velocidade para o LANC no P1.

Tabela A 3 – Valores de extensão e curva de velocidade do LANC no P1.

P1		P2	
Velocidade (m/s)	Extensão (m)	Velocidade (m/s)	Extensão (m)
-	2,5	-	3,9
$3,7 \times 10^3$	3,6	$4,0 \times 10^4$	6,4
$1,8 \times 10^4$	5,1	$3,7 \times 10^4$	9,2
$1,0 \times 10^5$	7,6	$7,3 \times 10^4$	11,0
$4,1 \times 10^4$	11,2	$2,0 \times 10^4$	11,9
$7,8 \times 10^4$	13,1	$5,9 \times 10^4$	14,1
$5,3 \times 10^4$	15,1	$5,0 \times 10^4$	16,6
$5,8 \times 10^4$	16,5	$6,0 \times 10^4$	20,3
$1,2 \times 10^5$	19,6	$1,0 \times 10^5$	22,8
$5,8 \times 10^4$	20,3	$8,0 \times 10^4$	25,8
$2,0 \times 10^4$	20,8	$6,2 \times 10^4$	27,3
		$2,9 \times 10^4$	28,0
		$9,8 \times 10^4$	30,5
		$8,2 \times 10^4$	31,4
		$7,8 \times 10^4$	33,4
		$1,3 \times 10^5$	34,9
		$8,4 \times 10^4$	36,0
		$8,2 \times 10^4$	37,0

Fonte: Produção da autora.

Figura A 3 – Plote do ajuste linear para os dados do P1.



Fonte: Produção da autora.

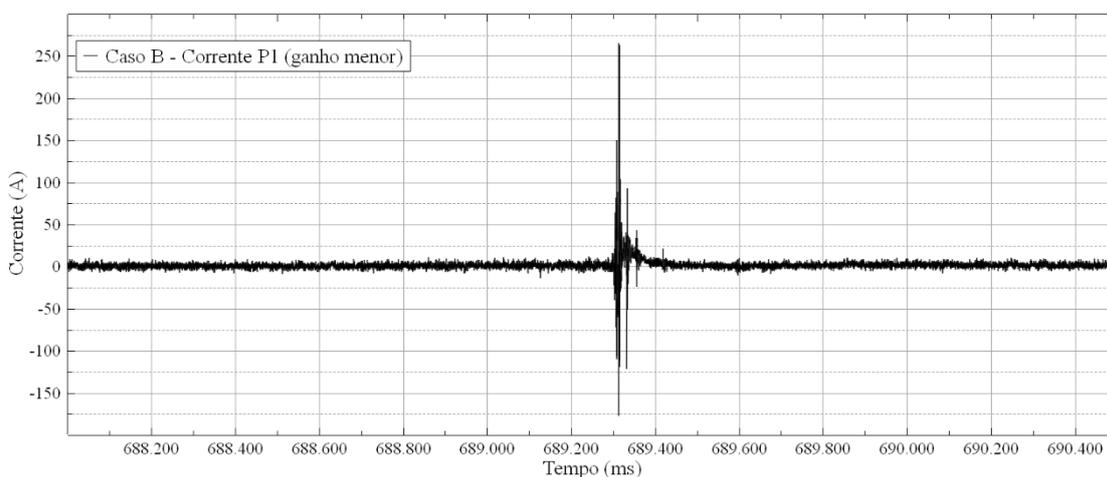
APÊNDICE B – INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES DO CASO B

B.1 – Medidas de corrente elétrica

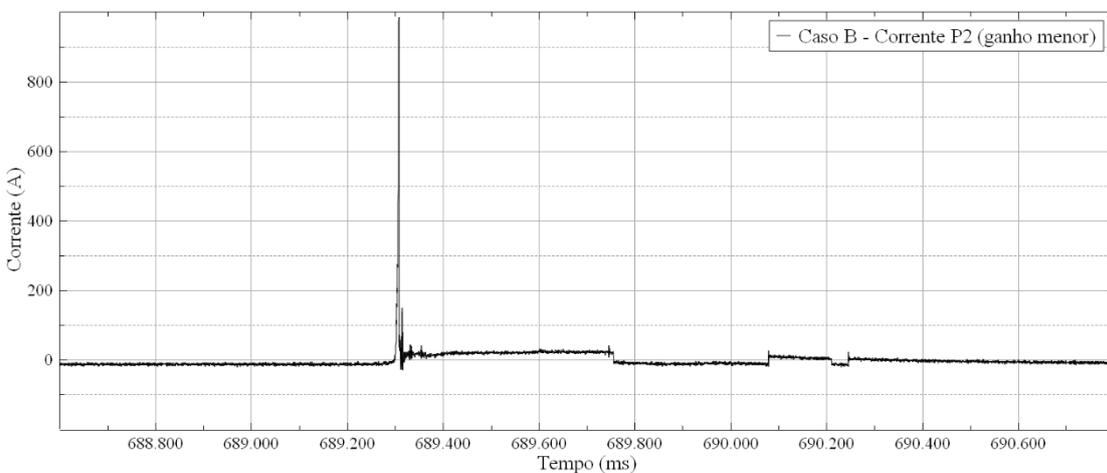
Durante a ocorrência do caso B os transformadores de corrente instalados na base dos para-raios do P1 e P2 adquiriram simultaneamente informações do sinal de corrente produzido pelo LAC e LANC, contudo apenas as informações do ganho maior (no P1 e P2) puderam ser analisadas, como apresentado no Capítulo 4.2. Os sinais de corrente (ganho menor) correspondentes ao P1 e P2 são apresentados na Figura B 1. Os dados não puderam ser utilizados pois houve falha no sensor, durante a ocorrência dos eventos.

Figura B 1 – Sinal de corrente elétrica durante a propagação do LANC no P1 e LAC no P2.

a) Corrente P1 (ganho menor)



b) Corrente P2 (ganho menor).



Fonte: Produção da autora.

B.2 – Câmeras rápidas e TC Pearson

Para análise dos vídeos foram adotados os mesmos procedimentos utilizados no caso A (Apêndice A). Os GPS das câmeras rápidas não estavam sincronizados, por isso foram feitas correções no tempo de ocorrência dos quadros de 32 e 34 μs no horário das câmeras V711 e V12, respectivamente. Para o TC os valores de pico de corrente foram ajustados conforme o atenuador (ganho) utilizado. Essas informações gerais, estão contidas na Tabela B 1 (câmera V12) e Tabela B 2 (câmera V711).

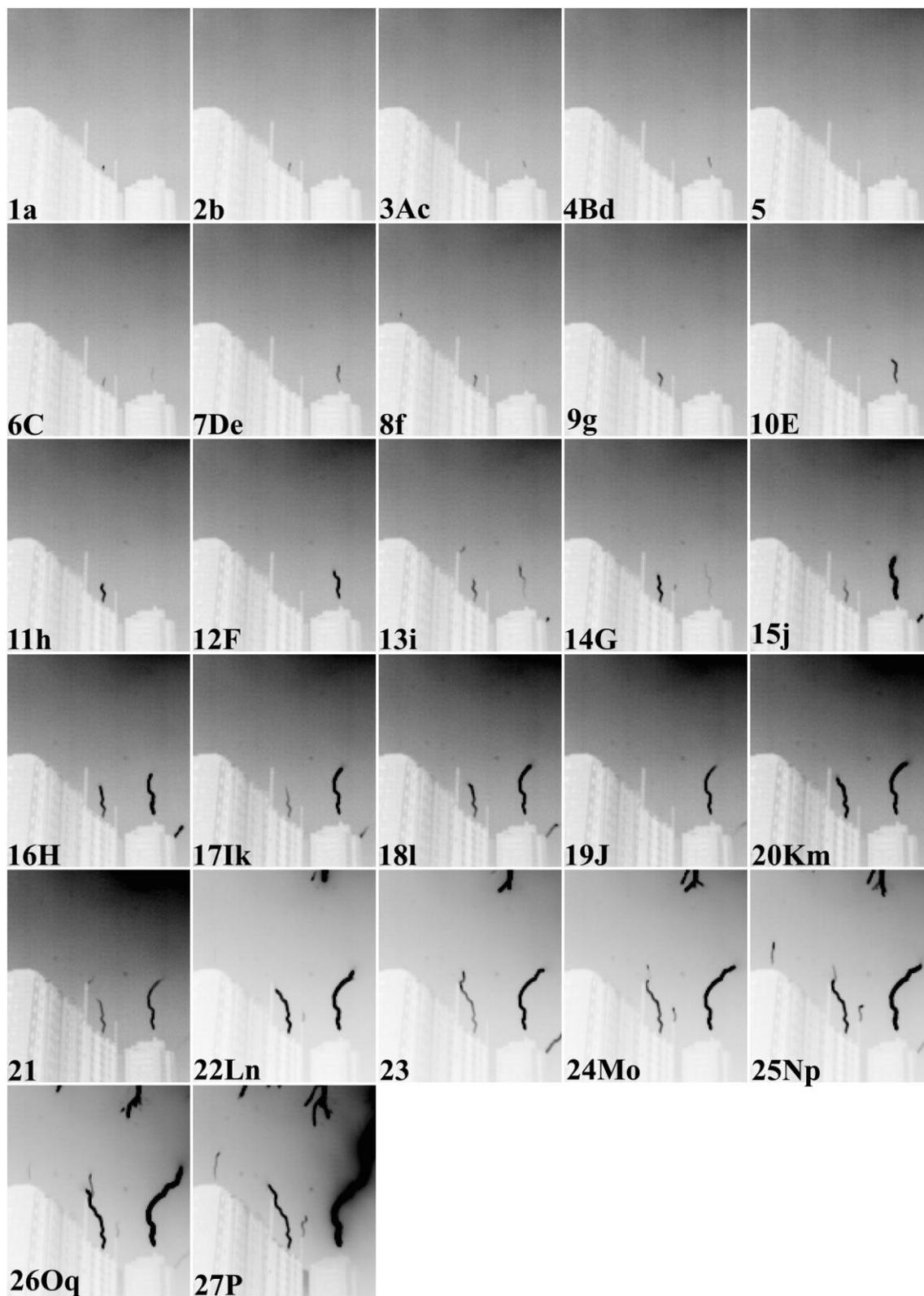
As imagens do desenvolvimento dos canais de LAC e LANC adquiridas pela câmera V12 são apresentadas na Figura B 2. Nota-se que cada quadro registrado pela câmera rápida corresponde a um pulso registrado pelo TC nos prédios (p. ex., 1a, 3Ac, 6C). Pode-se concluir que o IEQ da câmera utilizado durante a aquisição (14 μs) é satisfatório para este tipo de análise.

Tabela B 1 – Quadros da câmera rápida V12, correspondentes ao alongamento dos canais de LANC e LAC no P1 e P2, associados aos instantes e valores de picos de corrente adquiridos pelo TC (ganho maior) no P1 e P2.

Caso B - 01Fev2017 - 19:01:10 689,305 (hh:mm:ss ms,µs)								
Câmera V12			TC Pearson P1			TC Pearson P2		
Quadro	Início (µs)	Final (µs)	Pulso	Tempo (µs)	Ip (A)	Pulso	Tempo (µs)	Ip (A)
1	688769	688784	a	688782	56			
2	688812	688826	b	688818	51			
3	688898	688912	c	688898	18	A	688903	108
4	688912	688926	d	688921	19	B	688926	52
5	688941	688955						
6	688969	688984				C	688977	28
7	688984	688998	e	688987	76	D	688996	53
8	689012	689026	f	689020	45			
9	689026	689041	g	689037	57			
10	689041	689055				E	689049	81
11	689055	689069	h	689063	66			
12	689069	689084				F	689076	97
13	689084	689098	i	689090	50			
14	689098	689112				G	689099	41
15	689112	689126	j	689114	106			
16	689126	689141				H	689127	413
17	689141	689155	k	689143	82	I	689148	95
18	689155	689169	l	689165	56			
19	689169	689184				J	689170	116
20	689184	689198	m	689197	118	K	689196	118
21	689198	689212						
22	689212	689226	n	689220	149	L	689223	240
23	689226	689241						
24	689241	689255	o	689244	98	M	689243	189
25	689255	689269	p	689260	87	N	689259	295
26	689269	689284	q	689281	140	O	689277	405
27	689284	689298				P	689291	507
	689298	689312	r	689301	96			
			s	689308	-704			

Fonte: Produção da autora.

Figura B 2 – Quadros da câmera V12 associados aos pulsos de corrente adquiridos pelo TC no caso B.



Fonte: Produção da autora.

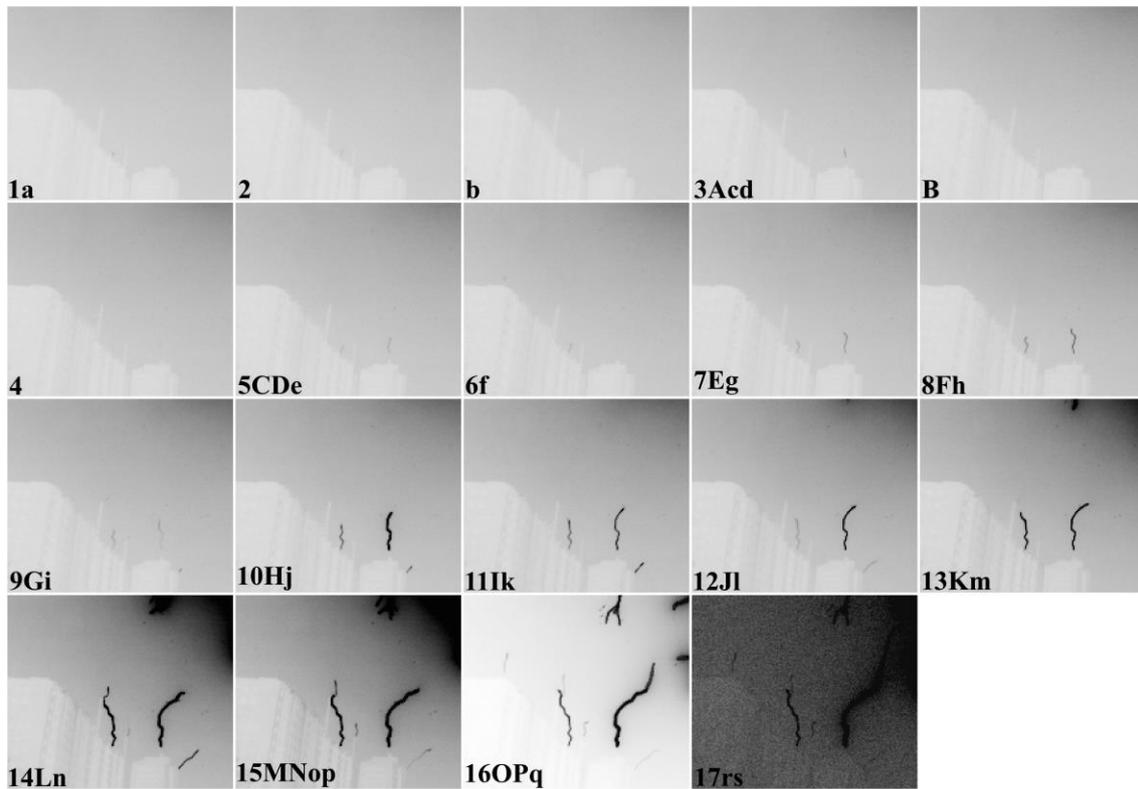
Tabela B 2 – Quadros da câmera rápida V711, correspondentes ao alongamento dos canais de LANC e LAC no P1 e P2, associados aos instantes e valores de picos de corrente adquiridos pelo TC no P1 e P2.

Caso B - 01Fev2017 - 19:01:10 689,305 (hh:mm:ss ms,µs)								
Câmera V711			TC Pearson P1 (ganho maior)			TC Pearson P2 (ganho maior)		
Quadro	Início (µs)	Final (µs)	Pulso	Tempo (µs)	Ip (A)	Pulso	Tempo (µs)	Ip (A)
1	688763	688789	a	688782	56			
2	688789	688816						
	688816	688842	b	688818	51			
3	688895	688921	c	688898	18	A	688903	108
			d	688921	19			
	688921	688948				B	688926	52
4	688948	688974						
5	688974	689001	e	688987	76	C	688977	28
						D	688996	53
6	689001	689027	f	689020	45			
7	689027	689054	g	689037	57	E	689049	81
8	689054	689080	h	689063	66	F	689076	97
9	689080	689107	i	689090	50	G	689099	41
10	689107	689133	j	689114	106	H	689127	413
11	689133	689159	k	689143	82	I	689148	95
12	689160	689186	l	689165	56	J	689170	116
13	689186	689212	m	689197	118	K	689196	118
14	689212	689239	n	689220	149	L	689223	240
15	689239	689265				M	689243	189
						N	689259	295
16	689265	689292	q	689281	140	O	689277	405
						P	689291	507
17	689292	689318	r	689301	96			
			s	689308	-704			

Fonte: Produção da autora.

A Figura B 3 apresenta os quadros da câmera rápida V711. Nota-se que, diferentemente da câmera V12 que teve seus quadros compatíveis com os pulsos de corrente adquiridos pelo TC, esta câmera apresentou diversos quadros com 2 ou mais pulsos (p. ex., 3AcD, 5CDe, 15MNop). Isso demonstra que o intervalo entre quadros com o qual essa câmera era operada (26 µs), não satisfaz a captura do desenvolvimento do canal do LANC, de acordo com os pulsos de corrente produzidos durante o evento.

Figura B 3 – Quadros da câmera V711 associados aos pulsos de corrente adquiridos pelo TC no caso B.



Fonte: Produção da autora.

A primeira parte da Tabela B 3 apresenta os IEQ registrados pela câmera rápida V711 durante o desenvolvimento do LANC e LAC no P1 e P2. A segunda parte desta tabela apresenta os IEQ registrados pela câmera rápida V12 durante o desenvolvimento do LANC e LAC no P1 e P2. Para estimar o momento de ocorrência da luminosidade do pulso, foi estipulado o valor médio entre início e final do quadro.

Tabela B 3 – IEQ das câmeras rápidas V711 e V12 correspondentes ao alongamento dos canais de LANC no P1 e LAC no P2.

Caso B - 01Fev2017 - 19:01:10 689,305 (hh:mm:ss ms,µs)									
Quadro	Câmera V711 P1		Câmera V711 P2		Quadro	Câmera V12 P1		Câmera V12 P2	
	Tempo (µs)	IEQ (µs)	Tempo (µs)	IEQ (µs)		Tempo (µs)	IEQ (µs)	Tempo (µs)	IEQ (µs)
1	688776				1	688777			
2	688802	26			2	688820	43		
3	688908	106	688908		3	688905	86	688905	
4			688961	53	4	688920	14	688920	15
5	688987	79	688987	26	5			688949	29
6	689014	27			6			688977	28
7	689040	26	689040	53	7	688991	72	688991	14
8	689067	27	689067	27	8	689020	29		
9	689093	26	689093	26	9	689034	14		
10	689120	27	689120	27	10			689048	57
11	689146	26	689146	26	11	689063	29		
12	689173	27	689173	27	12			689077	29
13	689199	27	689199	27	13	689091	29		
14	689225	26	689225	26	14			689105	29
15	689252	27	689252	27	15	689120	29		
16	689278	26	689278	26	16			689134	29
17	689305	27	689305	27	17	689148	29	689148	14
					18	689163	14		
					19			689177	29
					20	689191	29	689191	14
					21				
					22	689220	29	689220	29
					23				
					24	689248	29	689248	28
					25	689263	14	689263	14
					26	689277	14	689277	14
					27			689291	14

Fonte: Produção da autora.

A Tabela B 4 apresenta o tempo correspondente aos pulsos adquiridos pelo TC no P2 bem como o intervalo entre eles.

Tabela B 4 – IEP adquiridos pelo TC no P1 e P2.

Caso B - 01Fev2017 - 19:01:10 689,305 (hh:mm:ss ms,µs)					
Corrente P1 (ganho maior)			Corrente P2 (ganho maior)		
Pulso	Tempo (µs)	IEP (µs)	Pulso	Tempo (µs)	IEP (µs)
a	688782		A	688903	
b	688818	36	B	688926	23
c	688898	80	C	688977	51
d	688921	23	D	688996	19
e	688987	66	E	689049	53
f	689020	33	F	689076	26
g	689037	17	G	689099	23
h	689063	26	H	689127	28
i	689090	27	I	689148	22
j	689114	24	J	689170	22
k	689143	29	K	689196	26
l	689165	22	L	689223	26
m	689197	32	M	689243	20
n	689220	23	N	689259	16
o	689244	24	O	689277	19
p	689260	16	P	689291	13
q	689281	21			
r	689301	20			
s	689308	7			

Fonte: Produção da autora.

B.3 – Extensão e velocidade do LAC e LANC

Os valores referentes a extensão e velocidade do LANC no P1 e LAC no P2 foram calculados a partir da estimativa do valor do pixel, em metros. Como ponto de referência, foram adotadas as coordenadas dos pixels correspondentes à altura do para-raios no topo do prédio. Sabe-se que a altura do para-raios é de 2,4 m e que correspondem a 4 pixels, a altura de cada pixel foi calculada em 0,60 m.

Os valores de extensão e velocidade dos canais de LANC no P1 e LAC no P2 são apresentados na Tabela B5.

Tabela B 5 – Valores de extensão e velocidade dos canais de LAC e LANC do Caso B.

P1		P2	
Velocidade (m/s)	Extensão (m)	Velocidade (m/s)	Extensão (m)
-	3,6	-	3,1
$3,1 \times 10^4$	5,0	$1,3 \times 10^5$	5,0
$6,7 \times 10^3$	6,3	$4,8 \times 10^4$	6,3
$1,5 \times 10^5$	8,5	$4,6 \times 10^4$	7,6
$7,5 \times 10^4$	10,7	$9,6 \times 10^4$	9,0
$6,4 \times 10^4$	12,5	$4,6 \times 10^4$	10,3
$1,8 \times 10^5$	14,9	$6,1 \times 10^4$	12,0
$6,5 \times 10^4$	16,8	$6,2 \times 10^4$	13,8
$4,6 \times 10^4$	18,2	$1,3 \times 10^5$	15,6
$9,6 \times 10^4$	20,9	$6,1 \times 10^4$	16,5
$1,0 \times 10^5$	23,9	$2,7 \times 10^5$	20,5
$2,2 \times 10^5$	26,9	$1,2 \times 10^5$	23,9
$9,6 \times 10^4$	28,3	$1,1 \times 10^5$	25,6
$8,9 \times 10^4$	29,6	$7,7 \times 10^4$	27,7
$2,9 \times 10^5$	33,6	$1,1 \times 10^5$	31,0
$1,2 \times 10^5$	35,3	$1,8 \times 10^5$	36,1
		$8,9 \times 10^4$	37,4
		$3,5 \times 10^5$	42,4
		$1,6 \times 10^6$	64,3

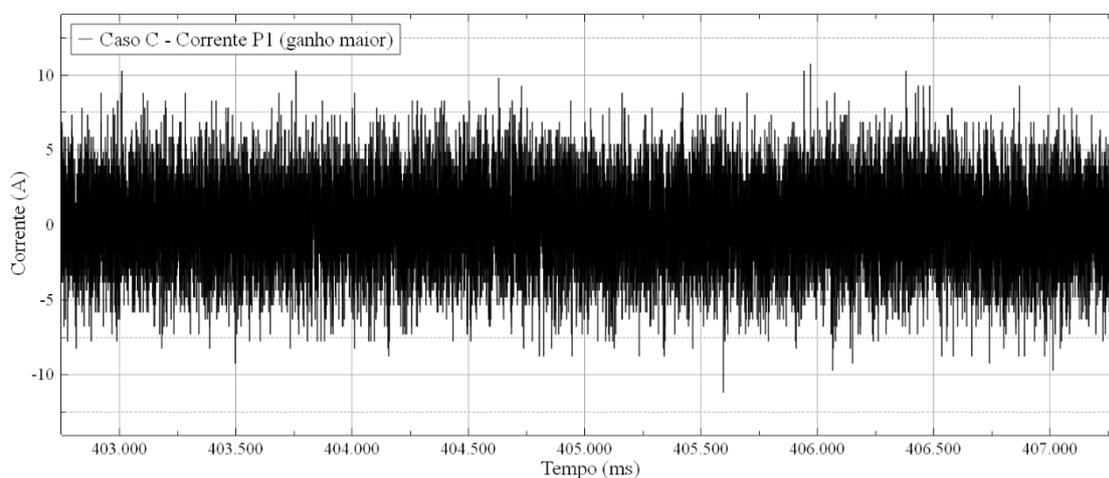
Fonte: Proteção da autora.

APÊNDICE C – INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES DO CASO C

C.1 – Medidas de corrente elétrica

Durante a ocorrência do caso C o TC (ganho menor) não funcionou neste dia. O ganho maior adquiriu informações do P1 e P2, contudo apenas o sinal de corrente produzido pelo LANC no P2 pôde ser analisado, como apresentado no Capítulo 4.3. O sinal de corrente adquirido no P1 é apresentado na Figura C 1, como apresentado no Apêndice C. Os dados não puderam ser utilizados pois houve falha no sensor do P1 durante a ocorrência dos eventos.

Figura C 1 – Sinal de corrente elétrica durante a propagação do LANC no P1 (ganho maior).



Fonte: Produção da autora.

C.2 – Câmeras rápidas e TC Pearson

Para análise dos vídeos foram adotados os mesmos procedimentos utilizados nos casos anteriores. Os GPS das câmeras rápidas não estavam sincronizados, por isso foram feitas correções no tempo de ocorrência dos quadros de 42 e 40 μ s no horário das câmeras V711 e V12, respectivamente. Para o TC os valores de pico de corrente foram ajustados conforme o atenuador (ganho) utilizado. Informações contidas na Tabela C 1 (câmera V12) e Tabela C 2 (câmera V711).

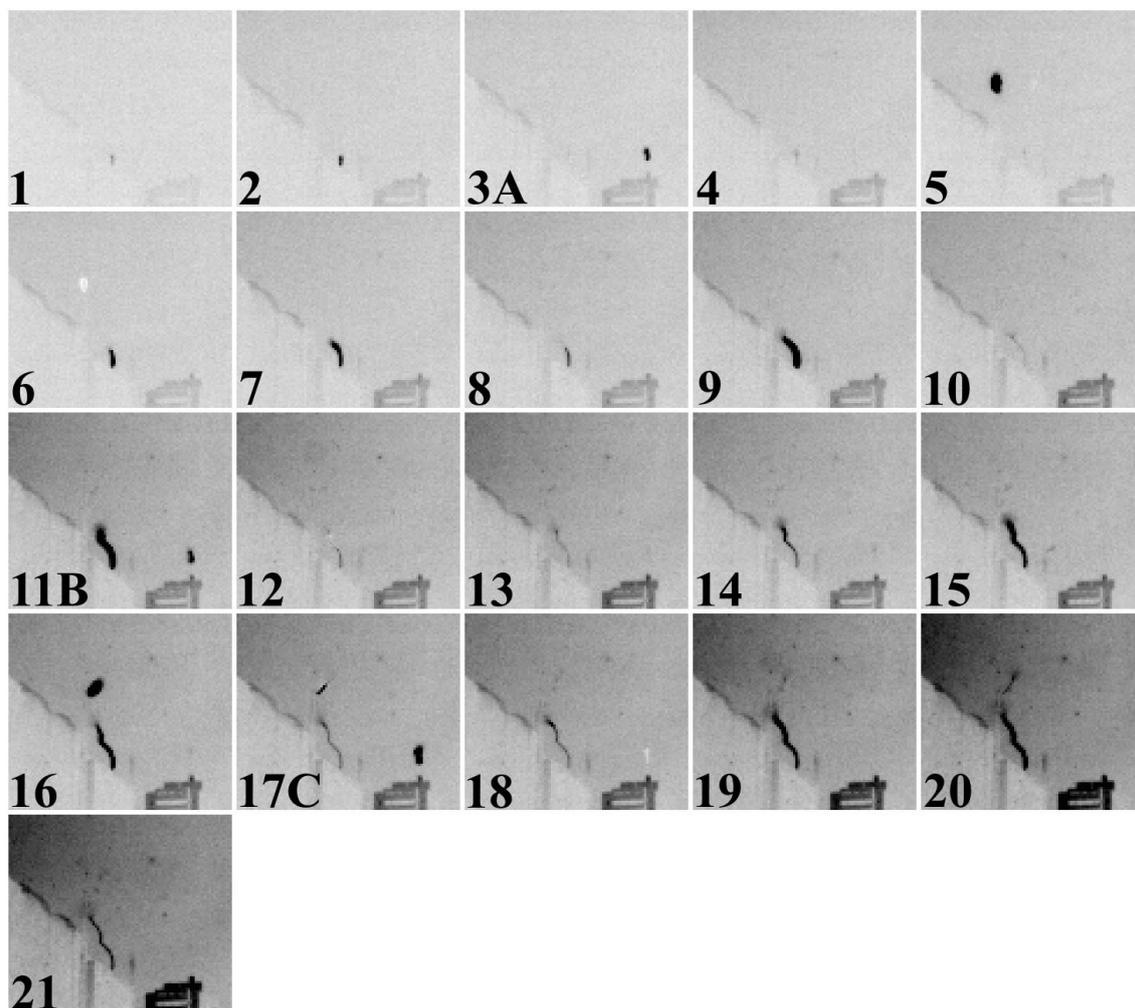
Tabela C 1 – Quadros da câmera rápida V12, correspondentes ao alongamento dos canais de LANC no P1 e P2, associados aos instantes e valores de picos de corrente adquiridos pelo TC no P2.

Caso C - 03Fev2017 - 22:47:09 404,908 (hh:mm:ss ms,µs)					
Câmera V12			TC Pearson P2 (ganho maior)		
Quadro	Início (ms)	Final (ms)	Pulso	Tempo (µs)	Ip (A)
1	422	431			
2	592	601			
3	602	610	A	605	33
4	619	628			
5	646	655			
6	655	664			
7	709	718			
8	718	727			
9	745	754			
10	763	772			
11	772	781	B	775	52
12	781	790			
13	790	799			
14	799	808			
15	808	817			
16	817	826			
17	826	835	C	829	78
18	835	843			
19	844	852			
20	853	861			
21	862	870			
	870	879	D	880	-37

Fonte: Produção da autora.

A Figura C2 apresenta os quadros da câmera V12.

Figura C 2 – Imagens dos quadros da câmera rápida V12 associados aos pulsos de corrente no P2.



Fonte: Produção da autora.

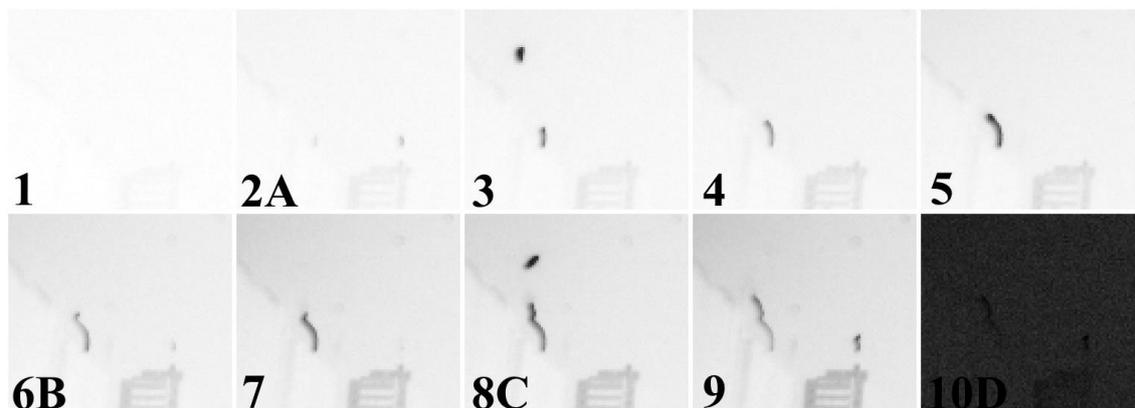
Tabela C 2 – Quadros da câmera rápida V711, correspondentes ao alongamento dos canais de LANC no P1 e P2, associados aos instantes e valores de picos de corrente adquiridos pelo TC no P2.

Caso C - 03Fev2017 - 22:47:09 404,908 (hh:mm:ss ms,μs)					
Câmera V711			TC Pearson P2 (ganho maior)		
Quadro	Início (μs)	Final (μs)	Pulso	Tempo (μs)	Ip (A)
1	407	434			
2	592	619	A	605	33
3	645	672			
4	698	725			
5	725	751			
6	751	777	B	775	52
7	778	804			
8	804	830	C	829	78
9	830	857			
10	857	883	D	880	-37

Fonte: Produção da autora.

A Figura C3 apresenta os pulsos de corrente elétrica no P2 associados aos IEQ da câmera V711. O quadro 1 da câmera contém o primeiro canal visível do LANC no P1, entretanto não é possível vê-lo nesta configuração de luminosidade da câmera, que evidencia o desenvolvimento dos outros quadros. Nota-se que para os pulsos de corrente A, B e D os quadros adquiridos pela câmera rápida (2, 6 e 10) apresentam o canal do LANC visível no mesmo intervalo de tempo. Analisando o pulso de corrente C, associado ao quadro 8, este não é visível durante o intervalo de tempo da câmera. Entretanto, ao examinar o quadro 9, nota-se um canal de LANC visível no P2. Pode-se deduzir que o pulso de corrente adquirido pelo TC, nomeado D, não é visível no intervalo de tempo do quadro 8 da câmera rápida, mas sim no quadro 9.

Figura C 3 – Imagens dos quadros da câmera rápida V711 associados aos pulsos de corrente no P2.



Fonte: Produção da autora.

Outros dados relevantes para o trabalho foram referentes aos IEQ e IEP adquiridos pela câmera rápida V12 (Tabela C 3) e Câmera rápida V711 (Tabela C 4).

Tabela C 3 – IEQ da câmera rápida V12 correspondentes ao desenvolvimento dos canais de LANC no P1 e P2 e, IEP adquiridos pelo TC no P2.

Caso C - 03Fev2017 - 22:47:09 404,908 (hh:mm:ss ms,µs)							
Quadro	Câmera V12P1		Câmera V12 P2		Corrente P2 (ganho maior)		
	Tempo (µs)	IEQ (µs)	Tempo (µs)	IEQ (µs)	Pulso	Tempo (µs)	IEP (µs)
1	427				A	605	
2	597	170			B	776	171
3			606		C	830	54
4	624	27			D	881	51
5	651	27					
6	660	9					
7	714	54					
8	723	9					
9	749	27					
10	767	18					
11	776	9	776	170			
12	785	9					
13	794	9					
14			803	27			
15	812	18					
16	821	9	821	18			
17	830	9	830	9			
18	839	9					
19	848	9					
20	857	9					
21	866	9					

Fonte: Produção da autora.

Tabela C 4 – IEQ da câmera rápida V711 correspondentes ao desenvolvimento dos canais de LANC no P1 e P2 e, IEP adquiridos pelo TC no P2.

Caso C - 03Fev2017 - 22:47:09 404,908 (hh:mm:ss ms,µs)							
Quadro	Câmera V711 P1		Câmera V711 P2		Corrente P2 (ganho maior)		
	Tempo (µs)	IEQ (µs)	Tempo (µs)	IEQ (µs)	Pulso	Tempo (µs)	IEP (µs)
1	421				A	605	
2	606	185	606		B	776	171
3	659	53			C	830	54
4	712	53			D	881	51
5	738	27					
6	765	26	765	159			
7	791	27	791	27			
8	817	26					
9	844	27	844	53			
10	870	26	870	26			

Fonte: Produção da autora.

C.3 – Extensão e velocidade dos LANCs

Os valores referentes a extensão e velocidade dos LANCs no P1 e P2 foram calculados a partir da estimativa do valor do pixel, em metros. Como ponto de referência, foram adotadas as coordenadas dos pixels correspondentes à altura do para-raios no topo do prédio. Sabe-se que a altura do para-raios é de 2,4 m e que correspondem a 4 pixels, a altura de cada pixel foi calculada em 0,60 m. Os valores de extensão dos canais de LANC no P1 P2, são apresentados na Tabela C5.

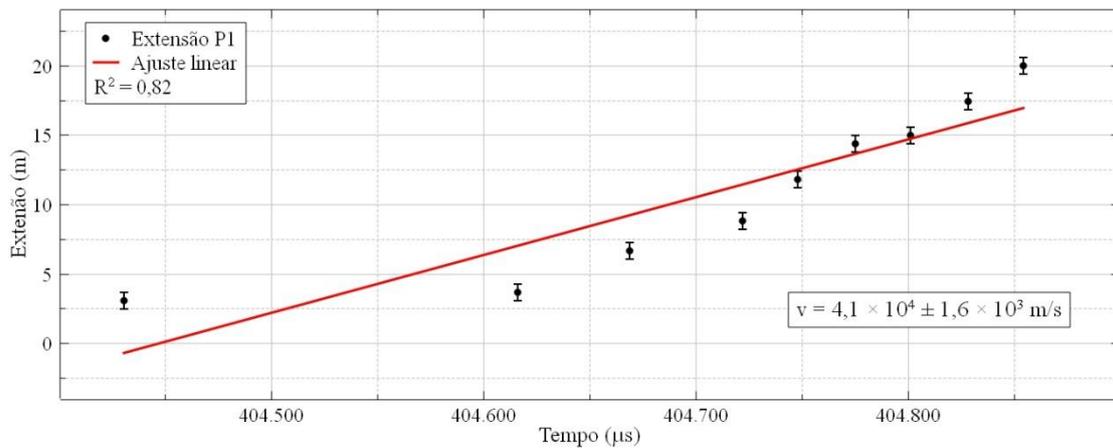
Tabela C 5 – Valores de extensão e velocidade dos canais de LANC no P1 e P2, Caso C.

P1		P2	
Velocidade (m/s)	Extensão (m)	Velocidade (m/s)	Extensão (m)
	3,1		3,6
$3,2 \times 10^3$	3,7	$3,8 \times 10^3$	4,2
$5,7 \times 10^4$	6,7	$1,7 \times 10^4$	5,5
$4,1 \times 10^4$	8,8		
$1,2 \times 10^5$	11,8		
$9,4 \times 10^4$	14,4		
$2,3 \times 10^4$	15,0		
$9,2 \times 10^4$	17,4		
$9,8 \times 10^4$	20,0		

Fonte: Produção da autora.

O gráfico de extensão e curva de velocidade do LANC no P1 é apresentado na Figura C 4.

Figura C 4 – Gráficos da extensão e curva de velocidade do LANC no P1.



Fonte: Produção da autora.