



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/11.27.22.12-TDI

## ESTUDO DOS PROCESSOS FÍSICOS DE RELÂMPAGOS COM A UTILIZAÇÃO DE IMAGENS EM 3D

Daniele da Silva Ferreira Medeiros

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba e Antonio Carlos Varela Saraiva, aprovada em 06 de novembro de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/43LUJT2>>

INPE  
São José dos Campos  
2020

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

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

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

**Membros:**

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

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

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

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

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

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

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

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

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

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

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

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

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

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



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/11.27.22.12-TDI

## ESTUDO DOS PROCESSOS FÍSICOS DE RELÂMPAGOS COM A UTILIZAÇÃO DE IMAGENS EM 3D

Daniele da Silva Ferreira Medeiros

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba e Antonio Carlos Varela Saraiva, aprovada em 06 de novembro de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/43LUJT2>>

INPE  
São José dos Campos  
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Medeiros, Daniele da Silva Ferreira.

M467e      Estudo dos processos físicos de relâmpagos com a utilização de imagens em 3D / Daniele da Silva Ferreira Medeiros. – São José dos Campos : INPE, 2020.  
xxiv + 112 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/11.27.22.12-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.

Orientadores : Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba e Antonio Carlos Varela Saraiva.

1. Relâmpagos. 2. Raios-X. 3. Para-raios. 4. Reconstrução do canal em 3D. 5. Velocidade média em 2D e 3D. I.Título.

CDU 551.594

---



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

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



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



## INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Serviço de Pós-graduação - SEPGR  
Curso de Pós-graduação em Geofísica Espacial

### ATA DE DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE DANIELE DA SILVA FERREIRA MEDEIROS

No dia 06 de novembro de 2020, as 14h00, por videoconferência, a aluna mencionada acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. A aluna foi APROVADA pela Banca Examinadora, por unanimidade ou maioria, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Geofísica Espacial. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca Examinadora e revisão final pelo(s) orientador(es).

Título: "ESTUDO DOS PROCESSOS FÍSICOS DE RELÂMPAGOS COM A UTILIZAÇÃO DE IMAGENS EM 3D"

Eu, Maria Virginia Alves, como Presidente da Banca Examinadora, assino esta ATA em nome de todos os membros.

#### Membros da Banca

Dra. Maria Virginia Alves – Presidente (INPE)

Dr. Marcelo Magalhães Fares Saba - Orientador (INPE)

Dr. Antonio Carlos Varela Saraiva - Orientador (Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNIP)

Dr. Kleber Pinheiro Naccarato - Convidado (INPE)

Dra. Amanda Romão de Paiva - Convidada (Universidade de Taubaté - INITAU)

Dr. Mauricio Grade Ballarotti - Convidado (Ballarotti Engenharia)



Documento assinado eletronicamente por **Maria Virgínia Alves, Pesquisadora**, em 11/11/2020, às 09:59 (horário oficial de Brasília), com fundamento no art. 6º, § 1º, 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 **6061216** e o código CRC **49415E56**.



*“A ciência trabalha na fronteira entre conhecimento e ignorância.  
Não temos medo de admitir o que não sabemos.  
Não precisamos ter vergonha disso.  
A única vergonha é fingir que temos todas as respostas.”*

NEIL DEGRASSE TYSON



*A meus pais **Francisco** e **Zilda**, a meus irmãos  
**Cristian** e **Leonardo** por me incentivarem a nunca  
desistir*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por traçar os meus caminhos e me guiar, sem nunca desistir de mim.

Agradeço a minha família por entender a distância durante esses anos. Obrigada por incentivar a sempre correr atrás dos meus sonhos e nunca me permitindo desistir, mesmo eles parecendo um pouco loucos. Agradeço principalmente aos meus pais, Francisco e Zilda pelo amor, companheirismo, por cultivarem valores e por esperarem com paciência os frutos. Com muito carinho, agradeço aos meus irmãos Leonardo e Cristian companheiros de toda a minha vida.

Agradeço aos meus orientadores os Drs. Marcelo Magalhães Fares Saba e Antonio Carlos Varela Saraiva, pela paciência e atenção dispensada a mim.

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela oportunidade de concluir mais uma etapa da minha vida, fornecendo um ambiente propício à evolução, crescimento pessoal e profissional.

Agradeço aos professores do Instituto, em especial: Alicia, Cristiano, Eurico, Eliah Fernanda, Lívia, Paulo, Plínio, Kleber, Takahashi, Kherani, Delano. Obrigada pelo conhecimento compartilhado.

Agradeço aos funcionários do Instituto pela paciência e auxílio durante esse período: a Filó, aos vigilantes, as meninas da limpeza, e principalmente ao pessoal da mecânica e da biblioteca.

Agradeço pela colaboração nos trabalhos iniciais e de coleta de dados: Lie Liong Bie (Benny), Ricardo Soares, Fernando Valadares, Amanda Paiva, Carina Schumann e a todos os integrantes do grupo.

Agradeço pelos amigos, que sempre estavam no lugar certo, na hora certa, sempre com uma palavra carinhosa e de consolo, quando a saudade de casa era maior que tudo. Um agradecimento especial: Edith Tueros, Ray Hidalgo, Júlia Guimarães, Hadassa Jácome, Adriany Barbosa, Paulo Lessa, Saúl Sánchez, Graziela Silva, David Pareja, Javier Sierra, Sony Chen e Giorgio Picanço.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo auxílio financeiro sem o qual teria sido impossível realização deste trabalho.

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

## RESUMO

Este trabalho consiste no estudo de alguns fenômenos físicos envolvidos durante a ocorrência de relâmpagos, a partir da reconstrução tridimensional do canal do relâmpago descendente, com o auxílio da modelagem computacional. As análises aqui realizadas, foram baseadas nos dados e imagens registradas durante as campanhas dos verões de 2017 a 2020. Depois de uma análise detalhada do banco de dados, dois eventos se mostraram compatíveis com o tipo de estudo pretendido. Eles ocorreram na cidade de São Paulo, o primeiro no dia 20 de março de 2018, e o segundo, 16 de dezembro de 2018. No primeiro evento, foi possível verificar o início de um Líder Ascendente Não Conectivo (LANC) partindo do para-raios de um prédio durante a aproximação de um líder de um relâmpago descendente. A reconstrução permitiu pela primeira vez no mundo identificar a real distância de atração necessária para o para-raios iniciar um LANC durante a propagação de um líder. Além disso, foi possível verificar a precisão do método utilizado para a reconstrução em 3D. Através do conhecimento do seu ponto de impacto no solo, obtido a partir da análise dos danos causados às moradias próximas, encontramos um erro de aproximadamente 13 metros entre o local real de impacto e o previsto pelo método. O segundo evento de relâmpago descendente observado e reconstruído pelo método, foi de um relâmpago descendente que provocou a emissão de raios-X. Neste trabalho foi possível apresentar a distância que o líder se encontrava do sensor de raios-X e mostrar, através da reconstrução do canal, que o líder se propagou por um período de tempo em direção ao sensor, o que confirma uma hipótese de que o líder produz raios-X de forma colimada e alinhada com a sua propagação. Além disso, este trabalho apresenta uma nova hipótese, a de que uma mudança abrupta na direção de propagação do líder do canal, gera uma aceleração que pode ser responsável pela emissão de raios-X. Para validar o método no segundo evento, utilizamos o tempo de propagação do trovão para calcular a menor distância do líder ao sensor de raios-X. Novamente, o erro do algoritmo de reconstrução se mostrou pequeno. Também analisamos a velocidade de propagação de relâmpagos 2D e 3D para os dois eventos estudados.

Palavras-chave: relâmpagos. raios-X. para-raios. reconstrução do canal em 3D. velocidade média em 2D e 3D.



# STUDY OF THE PHYSICAL PROCESSES OF LIGHTNING APPLYING 3D IMAGES

## ABSTRACT

This work consists of studying some physical phenomena involved during lightning strikes, with the aid of computational modeling for the three-dimensional reconstruction of the lightning channel. The analyzes performed here were based on the data and images produced during the summer campaigns from 2017 to 2020. After a detailed analysis of the database, two events were defined with the type of study intended. They took place in the city of São Paulo, the first on March 20, 2018, and the second, December 16, 2018. In the first event, it was possible to verify the beginning of a Unconnected Upward Connecting Leader (UUCL) starting from the lightning rod of a building during the approach of a downward lightning leader. For the first time in the world, the reconstruction made it possible to identify the real distance of attraction necessary for the arresters to initiate a UUCL during the propagation of a leader. Besides, it was possible to verify the accuracy of the method used for 3D reconstruction. Through the knowledge of its point of impact on the ground, obtained from the analysis of the damage caused to the nearby houses, an error of approximately 13 meters between the real impact site and the one predicted by the method was found. The second event observed and reconstructed by the method was a downward lightning that caused the emission of X-rays. In this work, it was possible to present the distance the leader was from the X-ray sensor. The reconstruction of the channel shows that the leader propagated for a while towards the sensor, which confirms the hypothesis that the leader produces X-rays in a collimated manner and aligned with their spread. Further, this work presents a new hypothesis, that an abrupt change in the direction of propagation of the channel leader generates an acceleration that may be responsible for the emission of X-rays. To validate the method in the second event, the propagation time of the thunder was used to calculate the shortest distance from the leader to the X-ray sensor. Again, the error of the reconstruction algorithm turned out to be small. We also analyzed the propagation speed of 2D and 3D lightning for the two events studied.

Keywords: lightning. X-rays. lightning rod. 3D channel reconstruction. 2D and 3D average speed.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Disposição das cargas elétricas dentro da nuvem cumulonimbus. . . . .	6
2.2 Tipos de relâmpagos. . . . .	7
2.3 Relâmpagos descendentes segundo a sua polaridade. . . . .	8
2.4 Processo completo de um relâmpago descendente negativo. . . . .	10
2.5 Apresentação do líder escalonado até a conexão com o para-raios. . . . .	11
2.6 Foto de um relâmpago atingindo o para-raios do prédio P1 em São Paulo. . . . .	12
2.7 Correspondência entre os pontos. . . . .	13
2.8 Representação da localização das câmeras e ângulos nos eixos x,y,z. . . . .	14
2.9 Apresentamos a geometria da correspondência pontual. . . . .	15
2.10 Sensor de Raios-X. . . . .	17
2.11 Imagem obtida no dia 16 de dezembro de 2018. . . . .	17
2.12 Líderes conectivos partindo dos para-raios. . . . .	18
2.13 Representação da Distância de atração e do Método Eletrogeométrico . . . . .	20
3.1 Os prédios P1P2 e ao fundo o Pico do Jaraguá. . . . .	21
3.2 A Torre da Antena e a Caixa d'água. . . . .	22
3.3 Edifício residencial escolhido inicialmente para estudo P1 e P2 (esquerda) e a situação atual com os prédios P3, P4 e P5 (direita). . . . .	23
3.4 A imagem de satélite apresenta os pontos e as distâncias entre os prédios estudados e as câmeras. . . . .	23
3.5 As fotos apresentam as imagens dos prédios na posição 1 e 2 das câmeras. . . . .	24
3.6 Torre da Antena e a Caixa d'água, estruturas próximas onde foram ins- talados os sensores de raios-X, campo elétrico e corrente. . . . .	25
3.7 A imagem de satélite apresenta os pontos de instalação das câmeras com suas respectivas indicações de quantidades. . . . .	26
3.8 Vista real das Estruturas em cada posição. . . . .	27
3.9 Representação da câmera Phantom v9.1. . . . .	29
3.10 Representação da câmera Phantom v711. . . . .	29
3.11 Representação da câmera Phantom v2012. . . . .	30
3.12 Representação da câmera MV1. . . . .	31
3.13 Representação das câmeras de vigilância Sony e Panasonic. . . . .	31
3.14 Representação da câmera D800. . . . .	32
3.15 Representação da câmera H8R. . . . .	33
3.16 Representação das lentes. . . . .	33
3.17 Representação da distância focal e do ângulo de visão. . . . .	34

3.18	Módulo para acionamento remoto. . . . .	35
3.19	Dispositivo que permite selecionar as câmeras que serão disparadas durante as tempestades. . . . .	35
3.20	Sensores de campo elétrico. . . . .	36
3.21	Posição dos detectores da rede BrasilDAT. . . . .	37
4.1	Representação do sistema de coordenadas. . . . .	40
4.2	Representação do sistema de coordenadas. . . . .	42
4.3	Representação do relâmpago visto pelas câmeras v711 e D800. . . . .	44
4.4	Na Figura apresentamos o método de coleta dos pontos. . . . .	44
4.5	Representação dos pontos do centro da imagem e de referência para a câmera v711. . . . .	45
4.6	Representação do programa Matlab. . . . .	48
5.1	Representação dos relâmpagos dos Eventos 01 e 02. . . . .	49
5.2	Representação do relâmpago ocorrido no dia 20 de Março de 2018. . . . .	50
5.3	Representação das disposições dos prédios e o início do LANC no P3. . . . .	51
5.4	Imagem do poste que sofreu o impacto. . . . .	52
5.5	Imagem de satélite com as posições dos prédios, das câmeras (Câmera 1 - v711 e Câmera 2 - D800) e do ponto de impacto. . . . .	53
5.6	Reconstrução do canal do relâmpago em 3D. . . . .	54
5.7	Representação das projeções dos eixos para a reconstrução do canal em 3D. . . . .	55
5.8	O gráfico apresenta a distância da extremidade do líder escalonado à cada um dos para-raios dos prédios P1, P2 e P3 em função do tempo. . . . .	56
5.9	Representação do relâmpago visto por outro ângulo. . . . .	57
5.10	Representação das velocidades médias 2D e 3D em função do tempo. . . . .	58
5.11	Vista superior da trajetória do relâmpago até o ponto de impacto. . . . .	60
5.12	Representação do ângulo onde observamos uma mudança de trajetória da Figura 5.12 . . . . .	61
5.13	As fotos apresentam o relâmpago ocorrido no dia 16 de dezembro de 2018. . . . .	62
5.14	As fotos apresentam o relâmpago ocorrido no dia 16 de dezembro de 2018 (observado pela câmera v711) e o posicionamento do sensor de raios-X. . . . .	63
5.15	Sequência das descargas de retorno. . . . .	64
5.16	Reconstrução do canal do relâmpago em 3D. . . . .	65
5.17	Representação das projeções nos eixos para a reconstrução do canal em 3D. . . . .	66
5.18	Vista superior da trajetória do relâmpago. . . . .	67
5.19	Distância da extremidade do líder ao prédio P2. . . . .	68
5.20	Medições de campo elétrico e raios-X para o Evento 02. . . . .	68

5.21	Representação das distâncias entre os prédios e o relâmpago calculadas a partir dos resultados da reconstrução do canal. . . . .	69
5.22	Representação das velocidades 2D e 3D em função do tempo. . . . .	71
5.23	Os quadros apresentam a luminosidade do líder durante a quinta descarga de retorno. . . . .	72
A.1	Posição das câmeras 1 (Benny). . . . .	87
A.2	Posição das câmeras 2 (Banfruty). . . . .	88
A.3	Instalação das câmeras MV1 e v9.1, no terraço do prédio do CEA 2, posicionada para as duas estruturas. . . . .	89
A.4	Instalação da câmera v9.1, no terraço do prédio do LIT, posicionada para o topo da caixa d'água. . . . .	90
A.5	Instalação da câmera MV2, no terraço da casinha de iluminação, próximo ao campo da ADC, posicionada para as duas estruturas. . . . .	91
B.1	Distância da Caixa d'água até a Torre/DCTA (825,53 m). . . . .	93
B.2	Distância da Caixa d'água até o LIT (115,41 m). . . . .	93
B.3	Distância do CCST até a Antena (220,40 m). . . . .	94
B.4	Distância do CCST até a Caixa d'água (149,36 m). . . . .	94
B.5	Distância do CEA até a Antena (288,87 m). . . . .	95
B.6	Distância do CEA até a Caixa d'água (334,44 m). . . . .	95
B.7	Distância da ADC até a Antena (165,20 m). . . . .	96
B.8	Distância da ADC até a Caixa d'água (236,60 m). . . . .	96
C.1	Imagem do poste que sofreu o impacto. . . . .	97



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Constantes $a$ e $b$ da distância de atração. . . . .	20
3.1 Descrição básica das configurações das câmeras localizadas em São Paulo e a distância focal das lentes utilizadas. . . . .	24
3.2 Descrição básica das configurações das câmeras localizadas no INPE e a distância focal das lentes utilizadas. . . . .	27
4.1 Coordenadas geográficas e de localização do posicionamento das câmeras.	40
4.2 Coordenadas geográficas e de localização do posicionamento dos prédios.	41
4.3 Coordenadas geográficas e de localização do posicionamento das câmeras.	42
4.4 Coordenadas geográficas e de localização (m) do posicionamento das estruturas. . . . .	43
4.5 Sequência dos dados para a variável INFO (CR - câmeras v711 e CA - câmera D800). . . . .	46
4.6 Sequência dos dados para a variável INFO (CR - câmeras H8R e CA - câmera Sony). . . . .	46
5.1 Os primeiros eventos selecionados para a reconstrução em 3D. . . . .	49
5.2 Dados separados após análise das imagens. . . . .	53
5.3 Características do relâmpago em 2D e 3D. . . . .	59
5.4 Dados separados após análise das imagens. . . . .	63
5.5 Características do relâmpago em 2D e 3D. . . . .	72
D.1 Dados gerados pelo algoritmo do raio (dia 20 de março de 2018). . . . .	99
D.2 Dados gerados pelo algoritmo do raio (dia 16 de dezembro de 2018). . . . .	102
E.1 Velocidade 2D e 3D calculadas a partir do seu deslocamento e dos seus respectivos intervalos de tempo para o Evento 01. . . . .	107
E.2 Velocidade 2D e 3D calculadas a partir do seu deslocamento e dos seus respectivos intervalos de tempo para o Evento 02. . . . .	108



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ELAT	–	Grupo de Eletricidade Atmosférica
Cb	–	Cumulonimbus
NS	–	Nuvem-solo
SN	–	Solo-nuvem
IN	–	Intranuvem
LA	–	Líder Ascendente
LAC	–	Líder Ascendente Conectivo
LANC	–	Líder Ascendente Não Conectivo
EMG	–	Método Eletrogeométrico
2D	–	Bidimensional
3D	–	Tridimensional
MEADAI	–	Modelo de Reconstrução
SPDAs	–	Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas
fps	–	Frames por segundo
qps	–	Quadros por segundo
pixels	–	Picture elements
UTC	–	Tempo Universal Coordenado
CCST	–	Centro de Ciência do Sistema Terrestre
CEA	–	Ciências Espaciais e Atmosféricas
LIT	–	Laboratório de Integração e Testes
ADC	–	Associação Desportiva Classista
DCTA	–	Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial
S26	–	Sala 26
BrasilDAT	–	Sistema Brasileiro de Detecção de Descargas atmosféricas
RINDAT	–	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
GPS	–	Sistema de Posicionamento Global
PCC	–	Phantom Camera Control
P1/P2/P3	–	Prédios residenciais no bairro Jardim Cidade Pirituba (SP)
PR	–	Ponto de referência
$X_{PR}$	–	Coordenada X do ponto de referência
$Y_{PR}$	–	Coordenada Y do ponto de referência



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	3
1.1.1 Objetivos gerais . . . . .	3
1.1.2 Objetivos específicos . . . . .	3
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> . . . . .	<b>5</b>
2.1 Relâmpagos . . . . .	5
2.1.1 Relâmpagos descendentes . . . . .	7
2.1.2 Líderes conectivos . . . . .	10
2.2 Reconstrução do canal do relâmpago em 3D . . . . .	11
2.3 Raios-X . . . . .	15
2.4 Sistema de Proteção de Descargas Atmosféricas (SPDAs) . . . . .	18
<b>3 INSTRUMENTAÇÃO</b> . . . . .	<b>21</b>
3.1 Processo de instalação . . . . .	22
3.1.1 São Paulo (2012 - 2019) . . . . .	22
3.1.2 São José dos Campos . . . . .	25
3.2 Câmeras . . . . .	28
3.2.1 Câmeras de alta velocidade . . . . .	28
3.2.2 Câmeras auxiliares . . . . .	30
3.2.3 Lentes . . . . .	33
3.3 Módulo para acionamento remoto das câmeras . . . . .	34
3.4 Sensores de campo elétrico . . . . .	36
3.5 Rede de detecção de descargas atmosféricas . . . . .	36
3.5.1 BrasilDAT . . . . .	36
<b>4 METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>39</b>
4.1 Reconstrução do canal do relâmpago em 3D . . . . .	39
4.1.1 São Paulo . . . . .	39
4.1.2 São José dos Campos . . . . .	41
4.2 Algoritmo de reconstrução . . . . .	43
<b>5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS</b> . . . . .	<b>49</b>

5.1	Evento 01: Dia 20 de março de 2018 . . . . .	50
5.1.1	Resultados do evento 01 . . . . .	54
5.2	Evento 02: Dia 16 de dezembro de 2018 . . . . .	62
5.2.1	Resultados do Evento 02 . . . . .	65
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>75</b>
	<b>APÊNDICE A - LOCAL DE INSTALAÇÃO DAS CÂMERAS . . . . .</b>	<b>87</b>
	<b>APÊNDICE B - DISTÂNCIA ENTRE OS PONTOS DE OBSER- VAÇÃO E AS ESTRUTURAS. . . . .</b>	<b>93</b>
	<b>APÊNDICE C - PREJUÍZOS CAUSADOS PELA DESCARGA ATMOSFÉRICA QUE ATINGIU O POSTE DE ENERGIA ELÉ- TRICA. . . . .</b>	<b>97</b>
	<b>APÊNDICE D - DADOS GERADOS PELO ALGORITMO . . . . .</b>	<b>99</b>
	<b>APÊNDICE E - VELOCIDADES 2D E 3D EM FUNÇÃO DO TEMPO.. . . . .</b>	<b>107</b>
	<b>ANEXO A - CÓDIGO DO ALGORITMO DE RECONSTRUÇÃO . . . . .</b>	<b>109</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Os relâmpagos sempre foram fonte de temor e curiosidade para os seres humanos. Embora grande parte dos relâmpagos ocorra no céu (RAKOV; UMAN, 2003), quando se propagam em direção ao solo têm energia suficiente para provocar danos em estruturas e edificações, desligamentos das linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica, danos em torres de telecomunicações, queima de equipamentos eletrônicos, dentre outros, causando prejuízos à sociedade (PINTO, 2005; SANTOS, 2017).

Ao longo da história da civilização, existem relatos de prejuízos causados por relâmpagos, principalmente em estruturas altas, como por exemplo as igrejas. O campanário de São Marcos em Veneza, que possui cerca de 100 m de altura, foi atingido diversas vezes por relâmpagos (RAKOV; UMAN, 2003). Apenas em 1752, após Benjamin Franklin desenvolver o primeiro sistema de defesa contra descargas atmosféricas, que locais como esse passaram a ser protegidos, reduzindo os danos causados por esse fenômeno natural (RAKOV; UMAN, 2003). É importante ressaltar que os experimentos de Benjamin Franklin marcam o início dos estudos sobre o relâmpago como um fenômeno físico.

Além de danos materiais, os relâmpagos são apontados como a segunda causa de morte por fenômenos meteorológicos no planeta. No Brasil, a Região Sudeste apresenta o maior número de fatalidades (CARDOSO et al., 2014). Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), entre os anos de 2000 a 2019, 2.194 pessoas morreram atingidas por relâmpagos no Brasil (ELAT, 2019e).

Com base nos dados de monitoramento, o Brasil é o país com maior incidência de relâmpagos no mundo, com cerca de 78 milhões por ano (ELAT, 2019e). Parcialmente, isso se deve pela sua grande extensão territorial e por estar entre as regiões tropicais e subtropicais do continente.

Na tentativa de minimizar os danos causados pelos relâmpagos à sociedade, diversas pesquisas foram desenvolvidas no Brasil e no mundo buscando compreender como os relâmpagos ocorrem, suas características e processos físicos (PINTO, 2005; SABA et al., 2006; PINTO; PINTO, 2008; FERRO et al., 2009; BALLAROTTI et al., 2012; HEIDLER et al., 2012; DWYER; UMAN, 2014), como se comportam próximos às estruturas (LU et al., 2015; RAKOV, 2012; COORAY, 2015), sua emissão de raios-X (MOORE et al., 2001; DWYER et al., 2003; DWYER et al., 2004; DWYER et al., 2005; SALEH et al., 2009; HOWARD et al., 2010; DWYER et al., 2011; MALLICK et al., 2012; SCHAAL et al., 2014; DWYER; UMAN, 2014; HETTIARACHCHI et al., 2018; SABA et al., 2019).

Esses estudos foram possíveis a partir da captura de dados observacionais, inicialmente com a utilização de câmeras fotográficas e posteriormente, com a utilização de câmeras de alta velocidade o que possibilitou o desenvolvimento das pesquisas envolvendo a reconstrução do canal de relâmpagos em 3D (HEBER et al., 2008; LU et al., 2012; LIU, 2012; GAO et al., 2014; GIN et al., 2014).

Portanto, o progresso das pesquisas de relâmpagos e da reconstrução do canal de relâmpagos em 3D, possibilitou o desenvolvimento dos nossos estudos e a conclusão deste trabalho que apresentou: (a) a real distância de atração entre o líder descendente e o para-raios para iniciar um líder conectivo, (b) a direção e a distância do líder descendente ao sensor de raios-X no momento da detecção de raios-X e (c) as velocidades 2D e 3D para os casos analisados.

Diante disso, este trabalho está organizado em seis Capítulos. O Capítulo 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre os relâmpagos e suas características, a evolução dos estudos sobre a reconstrução do canal de relâmpagos em 3D, os estudos envolvidos sobre as partículas de alta energia, no nosso caso os raios-X e dos Sistemas de Proteção de Descargas Atmosféricas (SPDAs).

O Capítulo 3 apresenta a instrumentação das câmeras de alta velocidade e auxiliares, dos módulos de acionamento remoto e de controle das câmeras que são acionadas durante as tempestades, os locais de instalação das câmeras e a rede de detecção de descargas atmosféricas BrasilDAT.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia utilizada para a reconstrução do canal de relâmpagos em 3D, as coordenadas geográficas e de localização das câmeras e das estruturas em estudo.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados encontrados para os Eventos 01, ocorrido no dia 20 de março de 2018 e, para o Evento 02, ocorrido no dia 16 de dezembro de 2018.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões, como também algumas sugestões para trabalhos futuros.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivos gerais**

O objetivo deste trabalho é estudar alguns dos processos físicos de relâmpagos, usando os resultados da reconstrução tridimensional de imagens de relâmpagos, para dois casos observados na cidade de São Paulo.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Os casos selecionados para a reconstrução 3D permitiram:

- O estudo de relâmpagos descendentes e como eles se comportam próximos às estruturas;
- A análise da física envolvida durante a propagação de um relâmpago até ele se conectar;
- A obtenção da distância em que ocorre a produção do LANC entre as estruturas e o líder escalonado.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo, apresentamos uma breve introdução sobre os relâmpagos, os estudos relacionados ao método desenvolvido para a reconstrução do canal do relâmpago em 3D, além de uma breve introdução sobre os estudos realizados na área de partículas de alta energia, mais especificamente sobre o processo de formação de raios-X a partir de relâmpagos e finalmente, uma breve apresentação sobre a distância de atração e o método eletrogeométrico (EMG).

### 2.1 Relâmpagos

Os relâmpagos são descargas elétricas que ocorrem na atmosfera, geralmente acontecem em menos de um segundo e possuem uma corrente elétrica bastante elevada, da ordem de quiloampères. Sua ocorrência está associada mais comumente às nuvens de tempestade, conhecidas como cumulonimbus (Cb) (WILLIAMS, 1989; RAKOV; UMAN, 2003; PINTO; PINTO, 2008).

No sudeste do Brasil, as tempestades ocorrem com maior frequência no verão, um período em que os altos índices de radiação solar e, conseqüentemente, um aumento da temperatura faz com que o processo de formação das nuvens se intensifique. As nuvens de tempestades necessitam da presença de umidade no ar, instabilidade vertical na troposfera e de mecanismos dinâmicos forçantes (como a chegada de uma frente fria) (PINTO; PINTO, 2000; PINTO; PINTO, 2008).

As nuvens cumulonimbus (Cb) se caracterizam por apresentar grande extensão vertical (cerca de uma dezena de quilômetros de altura) e uma longa extensão horizontal, em seu topo, devido à tropopausa (camada de transição entre a troposfera e a estratosfera), onde ocorrem os ventos superiores. Essas nuvens geram chuvas fortes, relâmpagos e pode ocorrer a formação de granizo (COTTON; ANTHES, 1992; HOUZE et al., 1989; HOUZE, 2004; PINTO; PINTO, 2008).

No interior das nuvens de tempestades existem água em todos os estados da matéria: vapor de água, gotículas de água, cristais de gelo, gotas superesfriadas, flocos de neve e granizo. Devido ao movimento das correntes de ar, ascendentes e descendentes, dentro das nuvens, há colisão entre gelo e granizo que possibilita a transferência de cargas elétricas entre eles, eletrificando a nuvem (KREHBIEL, 1986; WILLIAMS, 1989; RAKOV; UMAN, 2003; PINTO; PINTO, 2008; COORAY, 2015).

A eletrificação da nuvem não é um processo simples e, ao longo dos anos, diversos

estudos tentaram explicar os processos que ocorriam dentro da nuvem durante a eletrificação. A partir da década de 1980, os pesquisadores conseguiram obter uma interpretação mais coerente sobre a estrutura elétrica das nuvens. A partir de estudos observacionais, foi constatado que dentro da nuvem de tempestade ocorre a separação das cargas em três grandes centros de cargas principais, esse modelo foi denominado como modelo tripolar (KREHBIEL, 1986; WILLIAMS, 1989; RAKOV; UMAN, 2003; COORAY, 2015; RAKOV, 2016). Nesse modelo, as cargas líquidas se apresentam distribuídas em três grandes regiões, uma região de carga líquida positiva mais próxima ao topo da nuvem, uma região de carga líquida negativa no centro e uma região pequena de carga líquida positiva na base da nuvem (KREHBIEL, 1986; WILLIAMS, 1989; RAKOV; UMAN, 2003; COORAY, 2015; RAKOV, 2016). Uma imagem ilustrativa da distribuição das cargas dentro das nuvens está apresentada na Figura 2.1.

Figura 2.1 - Disposição das cargas elétricas dentro da nuvem cumulonimbus.



Fonte: Adaptado de Krehbiel (1986).

As cargas elétricas geradas pelas colisões são abundantes e produzem campos elétricos muito fortes, fora e dentro das nuvens, induzindo cargas elétricas no solo. Quando esse campo elétrico na nuvem é intenso o suficiente, ocorre a quebra da rigidez dielétrica do ar e o início da formação dos relâmpagos (RAKOV; UMAN, 2003; RAKOV, 2016).

O processo de formação de descargas elétricas dentro das nuvens se inicia entre dois centros de cargas, e o canal de plasma formado se propaga dentro das nuvens, de

forma bidirecional (MAZUR, 1989; RAKOV; UMAN, 2003; RAKOV, 2016). Esse canal de plasma pode se propagar em direção ao solo com uma velocidade na ordem de  $10^5$  m/s, sua trajetória é tortuosa e muito rápida, sendo impossível a sua visualização a olho nu (SABA, 2001). Possuem um diâmetro do canal de aproximadamente 2 a 5 cm, sendo capaz de aquecer o ar em até 30.000 °C em alguns milissegundos (ms) (COORAY, 2015).

Os relâmpagos podem ser classificados de duas maneiras: os que não tocam o solo e os que tocam o solo. Os que não tocam o solo, chamados de relâmpagos intranuvem (IN), ocorrem com maior frequência, aproximadamente 80 a 90% dos casos (PINTO; PINTO, 2000), e os que tocam o solo, que também podem ser chamados de raios, ocorrem com uma frequência de 10% a 20%. Estes, podem ser identificados como descendentes (podendo ser chamados de nuvem-solo, NS) ou ascendentes (conhecido também como solo-nuvem, SN).

Os relâmpagos também são classificados segundo a sua polaridade. Os relâmpagos negativos transferem carga líquida negativa para o solo, enquanto os positivos transferem carga líquida positiva. Na Figura 2.2 podemos observar os relâmpagos intranuvem, os relâmpagos descendentes e os relâmpagos ascendentes.

Figura 2.2 - Tipos de relâmpagos.



(a) Relâmpagos intranuvens. (b) Relâmpagos descendentes. (c) Relâmpagos Ascendentes.  
Fonte: ELAT (2019d).

### 2.1.1 Relâmpagos descendentes

Os relâmpagos que vêm em direção ao solo, chamados de relâmpagos descendentes, podem ser registrados por câmeras fotográficas e câmeras de alta velocidade, o que tornou possível a realização de diversos estudos envolvendo a geometria do canal, a multiplicidade (números de descargas que ocorrem num mesmo relâmpago) que também podem ser estudadas através dos dados coletados pelos sensores campo elétrico, a determinação do ponto de impacto no solo, entre outras características

dos relâmpagos (SCHONLAND, 1964; SABA et al., 2006; SABA et al., 2010; RAKOV, 2016).

O relâmpago descendente com polaridade negativa (NS-) geralmente tem origem entre os centros de cargas negativo e positivo próximo à base da nuvem (WILLIAMS, 1989; WILLIAMS, 2006; RAKOV, 2016), apresenta um líder escalonado ramificado. No entanto, um relâmpago descendente com polaridade positiva (NS+) não apresenta ramificações visíveis (SABA et al., 2010). Na Figura 2.3, podemos observar os relâmpagos nuvem-solo negativo e positivo.

Figura 2.3 - Relâmpagos descendentes segundo a sua polaridade.



(a) Relâmpago nuvem-solo negativo. (b) Relâmpago nuvem-solo positivo.

Fonte: (a) ELAT (2020). (b) ELAT (2019c).

Na Figura 2.4a, podemos visualizar a separação das cargas em três grandes centros principais, gerados pela eletrificação da nuvem. O início do relâmpago se dá através da quebra da rigidez dielétrica do ar. A partir dessa quebra, uma descarga bidirecional, bipolar e de carga líquida nula, se desenvolve. A essa descarga auto-propagante, se dá o nome de líder. Como sua propagação é bidirecional, o líder negativo se propaga em direção ao solo, enquanto o líder positivo se propaga no interior da nuvem, Figura 2.4b e 2.4c.

O líder escalonado (nome dado devido à característica da propagação) inicia a sua propagação da nuvem em direção ao solo, seguindo um caminho tortuoso transportando cargas negativas. Sua propagação ocorre em etapas e possui muitas ramificações, com comprimentos que podem variar de 3 a 200 metros, com um intervalo de tempo que resulta em uma velocidade média de propagação da ordem de  $10^5$  m/s (SCHONLAND, 1938; ORVILLE; IDONE, 1982; CAMPOS et al., 2014; CAMPOS, 2016; RAKOV, 2016), como é possível observar na Figura 2.4d e 2.4e..

Conforme o líder escalonado se propaga em direção ao solo, há o aumento do campo

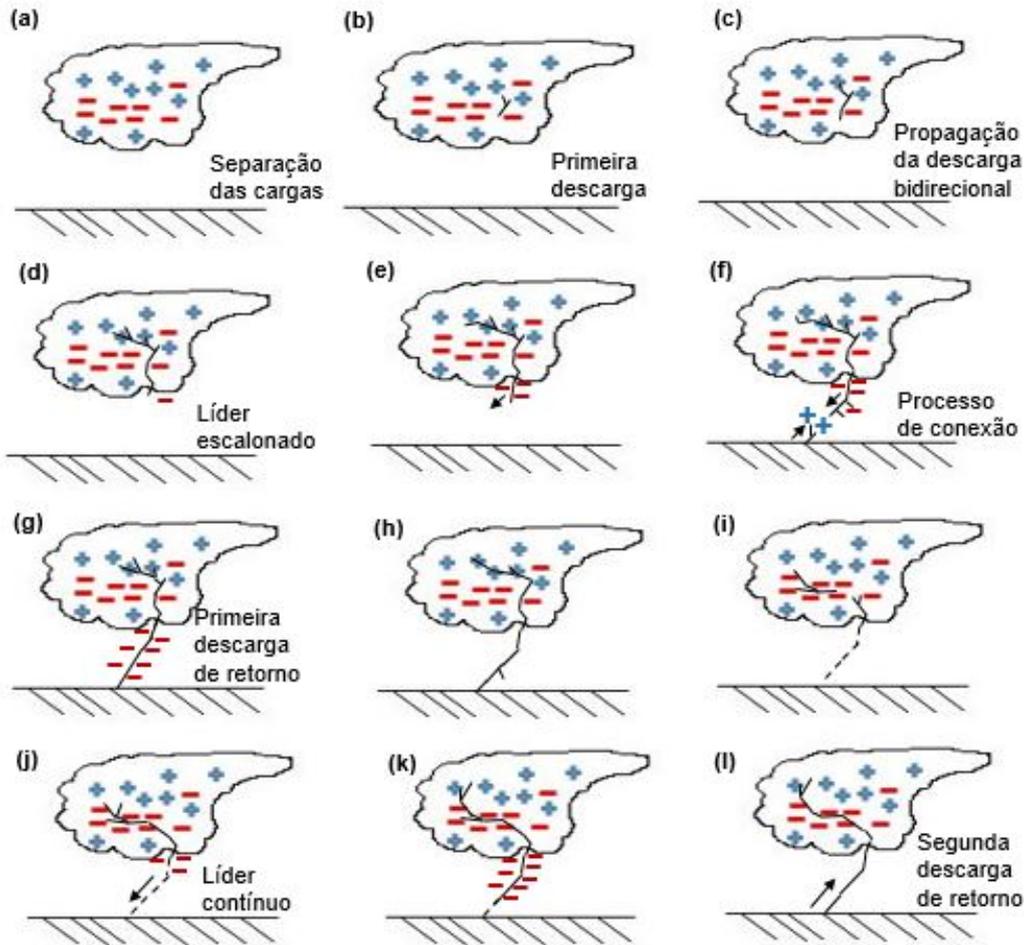
elétrico na região próxima a ponta do líder, induzindo o início de um ou mais líderes conectivos, Figura 2.4f. A intensificação do campo elétrico ocorre em estruturas pontiagudas, consequência direta do que chamamos de poder das pontas, onde há o acúmulo de cargas (SCHONLAND, 1938; RAKOV; UMAN, 2003; CAMPOS, 2016; RAKOV, 2016). Qualquer ponto no solo que possua alguma elevação (edifícios, para-raios, árvores, etc.), cria um campo elétrico maior do que outros objetos ao seu redor, tornando mais provável que a capacidade dielétrica do ar seja superada exatamente em sua direção, podendo produzir líderes conectivos (SILVA et al., 2016; RAKOV, 2016).

O encontro entre os líderes escalonado e conectivo, faz com que as cargas acumuladas no canal se movam em direção ao solo provocando uma descarga intensa, seguido de um pulso de luminosidade, que preenche todo o canal, alcançando a nuvem em cerca de  $50 - 100 \mu\text{s}$  (microssegundos). Uma corrente da ordem de 30 kA (kiloampère) é transportada e, se propaga a velocidades de  $10^7 - 10^8$  m/s. Este processo é denominado como descarga de retorno (RAKOV; UMAN, 2003; RAKOV, 2016), Figura 2.4g.

A primeira descarga de retorno transportam novas cargas para dentro da nuvem, quando estas atingem a região do canal formado anteriormente, um novo líder ocorre, chamado de líder contínuo, Figura 2.4j. O líder contínuo tem início no interior da nuvem e se propaga de maneira contínua. E por fim, após o líder contínuo completar o processo de reionização do canal, poderá ocorrer outra descarga de retorno, sendo denominada de descarga de retorno subsequente ou segunda descarga de retorno (Figuras 2.4k e 2.5l). Nos relâmpagos descendentes negativos podem ser observadas múltiplas descargas de retorno, podendo variar de 1 a mais de 10 descargas (RAKOV, 2016).

A Figura 2.4, apresenta um diagrama esquemático completo do processo de formação de uma descarga descendente negativa, e a formação de uma descarga subsequente como descrito ao longo deste trabalho. É importante ressaltar que esse processo de formação da segunda descarga de retorno pode se repetir por até dezenas de vezes (KITAGAWA et al., 1962; RAKOV; UMAN, 2003; RAKOV, 2016).

Figura 2.4 - Processo completo de um relâmpago descendente negativo.



(a) Separação das cargas. (b) Primeira descarga. (c) Propagação da descarga bidirecional. (d) e (e) Propagação do líder escalonado. (f) Processo de conexão. (g) Primeira descarga de retorno. (h) Propagação das cargas da nuvem pro solo e do solo pra nuvem. (i) Dissipação do canal. (j) Líder contínuo. (k) Segundo processo de conexão. (l) Segunda descarga de retorno.

Fonte: Adaptado de Rakov e Uman (2003).

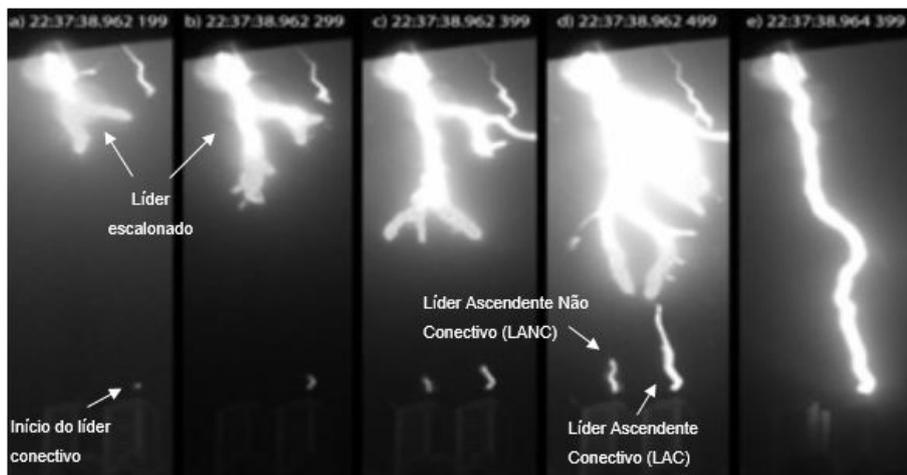
### 2.1.2 Líderes conectivos

Os líderes conectivos podem partir de várias estruturas simultaneamente, porém, apenas um deles irá se conectar ao líder escalonado, e este é chamado de Líder Ascendente Conectivo (LAC). Os outros líderes conectivos, que estavam se propagando em direção ao líder se retrai, estes são chamados de Líderes Ascendentes Não Conectivo (LANCs). Quando ocorre a conexão, há um pico de corrente que se propaga em direção à nuvem, esse pico pode ser medido por sensores de corrente elétrica instalados nos para-raios. A física envolvida na conexão do líder em estruturas é de

suma importância para o entendimento e desenvolvimento de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDAs) mais efetivos.

Na Figura 2.5, podemos observar uma sequência de imagens, a partir de uma filmagem real, feita com uma câmera de alta velocidade, que apresenta os passos da formação de um relâmpago descendente negativo. No primeiro quadro podemos visualizar a propagação do líder escalonado e pequenas descarga saindo das estruturas, Líderes Ascendentes Conectivos (LACs) e Líderes Ascendentes Não Conectivos (LANCs). Conforme avançamos os quadros, podemos perceber que o LAC segue um caminho de encontro ao líder escalonado. No último quadro, ocorre a conexão entre o líder escalonado e o LAC.

Figura 2.5 - Apresentação do líder escalonado até a conexão com o para-raios.



Essa sequência foi obtida durante a campanha em São Paulo. O líder conectivo parte dos para-raios localizados nos prédios P1 e P2.

Fonte: Próprio autor.

## 2.2 Reconstrução do canal do relâmpago em 3D

Os pesquisadores Hoffert (1889), Weber (1889), Walter (1902, 1903, 1909, 1912, 1918) e Larsen (1905) foram os pioneiros nas pesquisas realizadas sobre o estudo de relâmpagos, utilizando papel fotográfico ou câmeras fotográficas em movimento (RAKOV; UMAN, 2003).

Para estudarmos as características de relâmpagos, precisamos de câmeras que ofereçam imagens em alta resolução. Isso começou a se tornar uma realidade a partir da evolução da câmera Boys (1926). Esta era composta por uma placa fotográfica fixa e duas lentes rotativas e opostas (SCHONLAND; COLLENS, 1934; RAKOV; UMAN,

2003).

Com o melhoramento das câmeras Boys a partir de 1929, tornou-se possível a visualização do canal do relâmpago em etapas. Isso permitiu que os pesquisadores [Schonland e Collens \(1934\)](#) estudassem os primeiros avanços dos líderes descendentes negativos, as suas velocidades de propagação e as suas ramificações.

Quando observamos a [Figura 2.6](#), não é possível dizer a que distância dos prédios estava o líder descendente ao percorrer o canal do relâmpago até o para-raios atingido. Para obter a distância, é necessário ter a imagem do relâmpago capturada por duas, ou mais câmeras, em diferentes posições. A partir da reconstrução do canal em 3D poderemos dizer, com certeza, a que distância o canal se encontra das estruturas estudadas.

Figura 2.6 - Foto de um relâmpago atingindo o para-raios do prédio P1 em São Paulo.



Fonte: [ELAT \(2015\)](#).

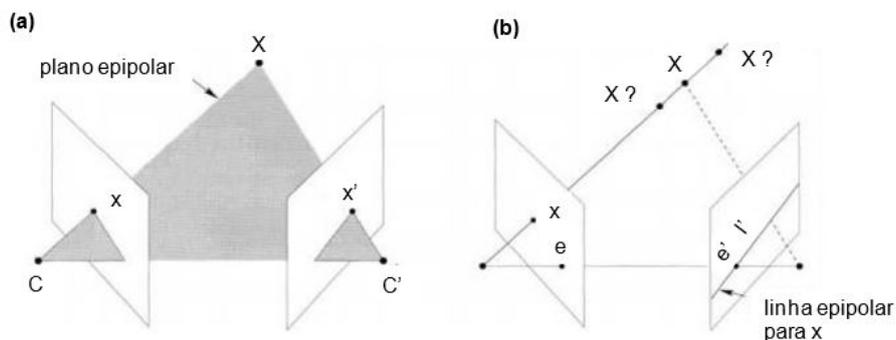
Estas questões são difíceis de serem respondidas analisando as imagens registradas apenas em 2D. Então, os pesquisadores perceberam a necessidade de obter imagens com câmeras instaladas em pontos distintos para reproduzir uma visualização do canal em 3D. Estudos da reconstrução do canal de relâmpagos em 3D foram apresentados pelos pesquisadores [Heber et al. \(2008\)](#), [Lu et al. \(2012\)](#), [Liu \(2012\)](#), [Gao et al. \(2014\)](#) e [Gin et al. \(2014\)](#). Essas pesquisas serviram de inspiração para o desenvolvimento deste trabalho.

As pesquisas já desenvolvidas para a reconstrução do canal aconteceram a partir de observações ópticas de relâmpagos atingindo prédios superiores a 70 metros de altura. [Gao et al. \(2014\)](#), apresentaram em seu trabalho o desenvolvimento de um sistema de observação computacional para a detecção automatizada e reconstrução

em 3D de múltiplas observações de relâmpagos, isso se dá com a ajuda da geometria epipolar.

A geometria epipolar é a geometria projetiva, que tem como objetivo obter uma imagem em 3D com o auxílio de duas ou mais câmeras, em pontos distintos. Não depende da estrutura que se deseja reconstruir, porém, depende dos parâmetros internos das câmeras e do ângulo de observação. Após a captura das imagens, busca-se por pontos correspondentes em ambas as imagens afim de reconstruir o objeto em estudo (HARTLEY; ZISSERMAN, 2003).

Figura 2.7 - Correspondência entre os pontos.



(a) As duas câmeras são indicadas por seus centros  $C$  e  $C'$  e planos de imagem. Os centros da câmera, o ponto  $X$ , e suas imagens projetadas em  $x$  e  $x'$  estão no plano epipolar. (b) O ponto  $X$  está projetado em  $x$ , então a imagem  $X$  na segunda vista deve estar em  $l'$ .

Fonte: Adaptado de Hartley e Zisserman (2003).

Independente da trajetória do relâmpago, quando colocamos duas câmeras ou mais, é possível identificar com mais clareza os pontos e com isso se torna possível a reconstrução do canal (GIN et al., 2014).

Liu (2012) e Gao et al. (2014) estabeleceram um método interessante de reconstrução gráfica do canal de um relâmpago em 3D dentro de um ambiente virtual interativo, o que tornou a reconstrução simplificada a partir do desenvolvimento de um “algoritmo de reconstrução em 3D” com base em imagens geradas pelas câmeras e suas configurações previamente estabelecidas (GAO et al., 2014).

Em seu trabalho, Gao et al. (2014) apresentam o passo a passo, em quatro etapas, para dar início ao método de reconstrução do canal:

- a. identificação dos pontos  $(x,y)$  do canal, a partir das imagens em 2D obtidas pelas câmeras;

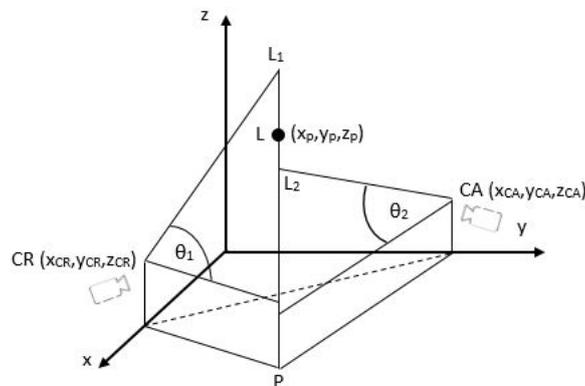
- b. conversão dos pontos encontrados em ângulos de direção e calibração dos ângulos, usando pelo menos dois pontos de referência;
- c. combinação dos ângulos de direção observados nas duas posições;
- d. reconstrução das coordenadas do canal em 3D.

A identificação dos pontos é realizada através da coleta de pontos, ao longo do canal, com base nas imagens obtidas pelas câmeras, em pixel (do inglês, *picture element*), o pixel é o menor ponto que forma uma imagem digital. Os pontos coletados das imagens, medidas em pixel, são armazenados em um programa como o Bloco de Notas, esses pontos são os dados de entrada da câmera 1 e câmera 2.

Como a câmera é posicionada com um ângulo para melhor visualização do canal de relâmpagos, é necessário a realização da conversão dos pontos com base nos ângulos de elevação e azimutal da câmera e a conversão dos dados de pixel para metros, armazenados em um bloco de notas. São também considerados a distância focal da câmera e os pontos de referências (a ponta do para-raios localizado no prédio em estudo).

A combinação dos pontos é realizada através da relação entre as imagens capturadas pelas câmeras e câmera 2. Selecionado o ponto de referência, coletamos os pontos, em pixel, de cada imagem capturada e utilizando geometria analítica, é possível encontrar a equação da reta para cada projeção em  $X_p$ ,  $Y_p$  e  $Z_p$  no espaço. Na Figura 2.8 é possível verificar a posição dos ângulos em relação as câmeras e dos eixos de projeção.

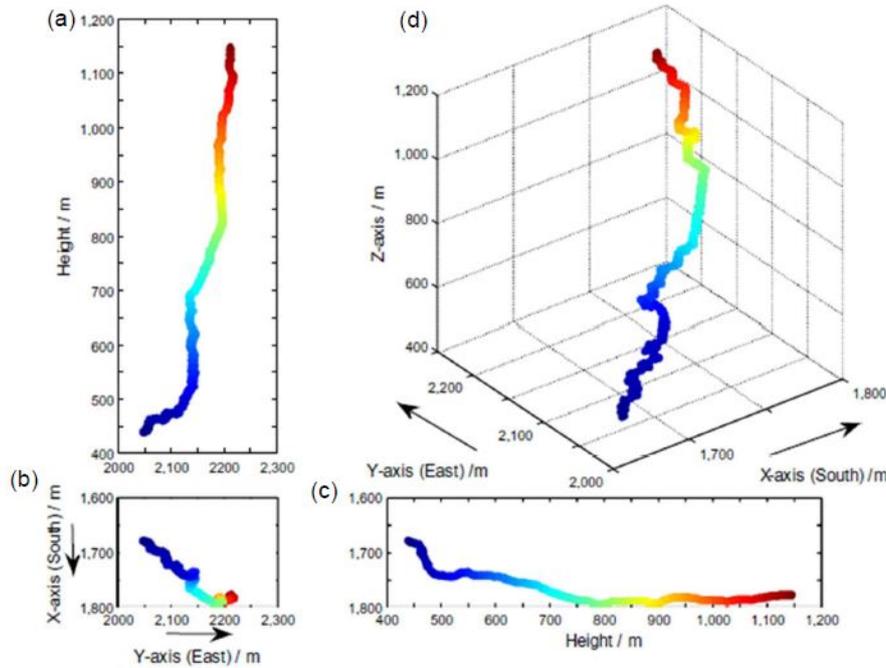
Figura 2.8 - Representação da localização das câmeras e ângulos nos eixos x,y,z.



Câmera Rápida (CR), Câmera Auxiliar (CA) e L (ponto final da reconstrução em 3D).  
 Fonte: Adaptado de Gao et al. (2014).

Após todas as informações obtidas e separadas, Gao et al. (2014) conseguiram apresentar em seus resultados uma reconstrução do canal em 3D. A Figura 2.9 apresenta uma reconstrução feita a partir desse método de reconstrução que recebeu o nome de “MEADAI”. É possível observar o resultado final com todas as componentes em X, Y e Z no mesmo gráfico.

Figura 2.9 - Apresentamos a geometria da correspondência pontual.



(a) Imagem da projeção no eixo XZ. (b) Imagem da projeção no eixo XY. (c) Imagem da projeção no eixo XZ. (d) Imagem da reconstrução do canal do relâmpago em 3D projetados nos eixos XYZ.

Fonte: Adaptado de Gao et al. (2014).

### 2.3 Raios-X

Os raios-X são partículas de alta energia emitidas por átomos em estados excitados, produzindo uma energia de espectro discreto. Podem, também ocorrer durante o processo de desaceleração de um elétron energético no interior de um material, o que acaba resultando em um espectro contínuo de energia. Por não possuírem cargas, os raios-X não podem sofrer desvios por campos elétricos nem magnéticos (STARK, 2020).

O estudo da física de alta energia na atmosférica teve início em 1925. Em seu trabalho Wilson (1925) apresentou que existe produção de elétrons em nossa atmosfera.

A partir deste trabalho, outros pesquisadores tentaram estabelecer se as nuvens de tempestades, ou os relâmpagos, produzem tal radiação eletromagnética.

Em 1981, a geração de raios-X nas nuvens foi detectada pela primeira vez durante uma tempestade (PARKS et al., 1981; MCCARTHY; PARKS, 1985). Porém, verificou-se que foram produzidos raios-X da ordem de 100 kV mas não se conhecia o mecanismo, nem a fonte da radiação (HILL, 1968). Entretanto, até o ano 2000, a existência de radiações energéticas oriundas de tempestades e de relâmpagos não era aceita no meio científico. O que se sabe sobre a radiação de alta energia é que, normalmente, ela é produzida na atmosfera e ao nível do mar (DWYER et al., 2012).

Estudos relacionados às partículas de raios-X ocorridos a partir de relâmpagos tiveram início nos anos 2000, tendo como os principais trabalhos publicados Moore et al. (2001), Dwyer et al. (2003), Dwyer et al. (2004), Dwyer et al. (2005), Saleh et al. (2009), Howard et al. (2010), Dwyer et al. (2011), Mallick et al. (2012), Schaal et al. (2014), Hettiarachchi et al. (2018) e Saba et al. (2019).

Muitos estudos e observações foram apresentados por estes pesquisadores na tentativa de explicar como ocorrem as emissões de raios-X produzidos por relâmpagos. Howard et al. (2010), propuseram que a propagação do raios-X ocorre ao longo da propagação dos líderes escalonados. Mallick et al. (2012), sugerem que os equipamentos devem estar muito próximos ao líder escalonado para que seja possível a detecção de raios-X.

Entretanto, Schaal et al. (2014), apresentam a primeira análise de raios-X utilizando uma câmera que capturou as regiões originárias de raios-X. A conclusão deste estudo apresenta que a fonte de raios-X se encontra próxima à ponta do líder escalonado e essa emissão pode ser compacta e difusa.

Saba et al. (2019), apresentam os resultados da pesquisa que registrou o primeiro evento de raios-X provenientes de relâmpagos no Brasil. Este relâmpago ocorreu no dia 16 de dezembro de 2018, sendo detectado pelos sensores de raios-X, pelo campo elétrico e por duas câmeras em diferentes posições, tornando possível a tentativa de reconstrução do canal em 3D.

Os autores sugerem que as condições para que ocorra o registro de raios-X produzidos por relâmpagos seriam: a proximidade ao sensor e a ponta do líder escalonado deve estar se propagando na direção do sensor. Na Figura 2.10 podemos visualizar o sensor de raios-X (com chumbo e sem chumbo).

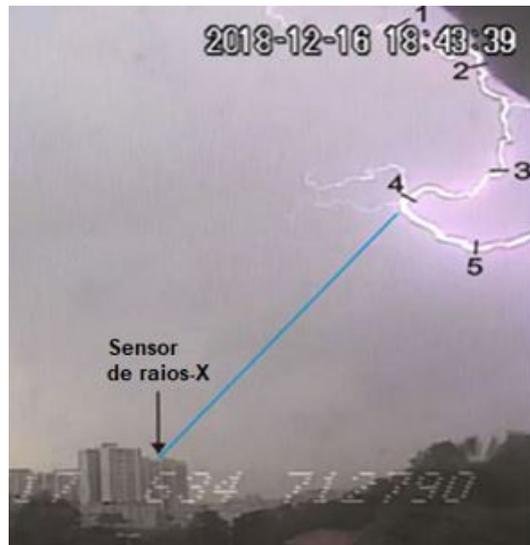
Figura 2.10 - Sensor de Raios-X.



Fonte: Cuadros (2019).

Observando a Figura 2.11 podemos ter uma noção do quão próximo o relâmpago passou próximo aos prédios estudados e do sensor de raios-X, porém, somente a partir da reconstrução do canal em 3D poderemos afirmar, com toda certeza, se o líder escalonado estava direcionado para o sensor quando houve o registro de raios-X.

Figura 2.11 - Imagem obtida no dia 16 de dezembro de 2018.



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

Com base nos dados e nas imagens capturadas para o evento de 16 de dezembro

de 2018 que registrou o raios-X, pretendemos explicar algumas questões que se encontram em aberto dentro da comunidade como: A produção de raios-X originados de relâmpagos deve ser direcionada para os equipamentos de medição e a que distância dos equipamentos o líder deve estar para que ocorra a detecção de raios-X?

## 2.4 Sistema de Proteção de Descargas Atmosféricas (SPDAs)

Os relâmpagos são responsáveis pela perda de vidas e prejuízos para muitas pessoas, além de causar interrupções no fornecimento de energia elétrica por atingirem os sistemas de distribuição e transmissão. Segundo [ELAT \(2019e\)](#), no Brasil ocorrem 78 milhões de relâmpagos descendentes por ano, tendo sido registradas 2.194 vítimas fatais entre 2000-2019 ([ELAT, 2019e](#)).

Como podemos observar na Figura 2.12, a principal função dos para-raios é interceptar o relâmpago e conduzir a descarga para o solo. Segundo a [ABNT \(2015\)](#) NBR 5419-1, as descargas atmosféricas podem gerar danos como fogo e/ou explosões e podem causar danos aos moradores por choque elétrico ([ABNT, 2015](#)).

Figura 2.12 - Líderes conectivos partindo dos para-raios.



Fonte: [Saba et al. \(2017\)](#).

Ao longo dos anos, foram desenvolvidos diversos métodos de proteção para as estruturas residenciais e para as estruturas de linhas de transmissão e distribuição de energia. Neste trabalho apresentamos apenas dois métodos, sendo:

- Distância de atração - definição de Golde

Na literatura existem numerosas pesquisas que tratam deste tema,

porém a mais aceita foi definida por Golde (1973), que afirma existir uma distância de atração que depende do pico de corrente elétrica da descarga de retorno. Essa distância de atração é a distância entre a ponta do líder descendente e o para-raios no momento em que inicia-se um líder conectivo. Portanto, quando a ponta do líder descendente se aproxima dos edifícios, aumenta de tal forma o campo elétrico nessa região que pode iniciar um líder conectivo nas regiões pontiagudas na tentativa de interceptar o relâmpago, como podemos observar na Figura 2.13a.

- Método Eletrogeométrico (EGM)

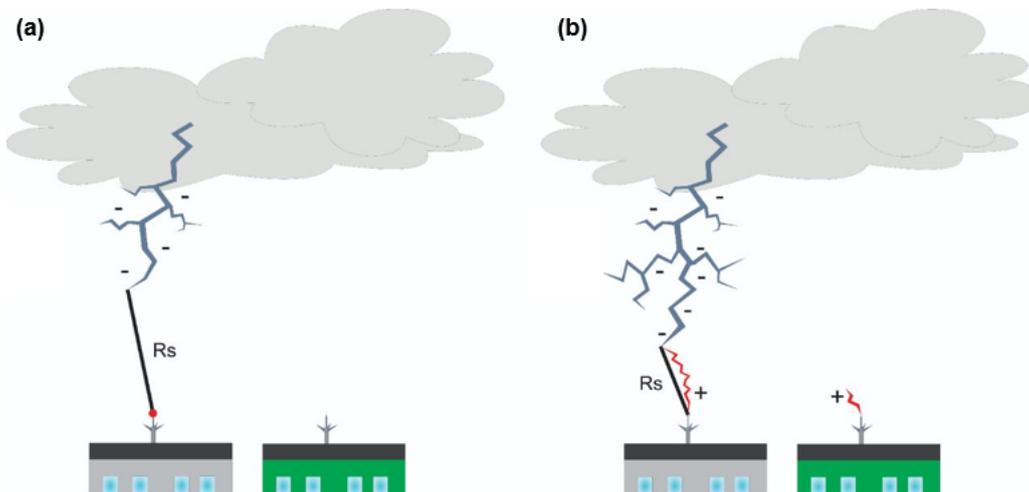
O primeiro sistema de proteção conhecido como método eletrogeométrico foi desenvolvido por Golde, em 1945. Começou a ser utilizado somente a partir de 1950, devido às constantes interrupções no fornecimento de energia elétrica nos Estados Unidos (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS - IEEE., 1996).

Este método supõe que existe uma distância de atração entre a ponta do líder e as estruturas aterradas. Segundo Cooray (2015), existe uma distância crítica que separa a ponta do líder escalonado e a ponta de uma estrutura aterrada para que ocorra o início de um Líder Ascendente Conectivo (LAC). Quanto menor for a distância entre a estrutura e o líder descendente, maior será o campo elétrico entre eles e o LAC gerado poderá se propagar e conectar ao líder descendente (SCHROEDER, 2001; VISACRO, 2005; COORAY, 2015).

A Figura 2.13b,  $R_s$  é chamado de distância de atração e corresponde à distância estimada entre o líder descendente e a estrutura a ser atingida pela descarga antes da conexão entre eles (COORAY, 2009).

Na Figura 2.13 é possível visualizar a distinção do método da distância de atração, definida por Golde (1973) e, da definição do método eletrogeométrico (EMG).

Figura 2.13 - Representação da Distância de atração e do Método Eletrogeométrico



(a) Definição de Golde. (b) Definição do Método Eletrogeométrico.

Fonte: Adaptado de Paiva (2020).

Para calcular a distância de atração  $R_s$ , pela definição de Golde (1973), utilizamos a equação empírica de Love (1973), Equação 2.1. Sendo assim, podemos observar a relação que define a distância de atração e o pico de corrente do relâmpago.

$$R_s = a \cdot I^b \quad (2.1)$$

onde  $R_s$  é a distância de atração,  $I$  é o pico de corrente elétrica e  $a$  e  $b$  são constantes arbitrárias. Na Tabela 2.1, apresentamos alguns autores que determinaram as constantes arbitrárias.

Tabela 2.1 - Constantes  $a$  e  $b$  da distância de atração.

<b>Autor</b>	<b><math>a</math></b>	<b><math>b</math></b>
Love (1973)	10,0	0,66
Armstrong and Whitehead	6,0	0,80
Brown and Whitehead	6,4	0,75
IEEE standard 1243 (1997)	8,0	0,65
IEC standard 62305 (2009)	10,0	0,65

### 3 INSTRUMENTAÇÃO

A introdução do uso de câmeras de alta velocidade no estudo de relâmpagos foi iniciado no Brasil em 2003. A partir dos dados adquiridos, estudaram-se diversas características dos relâmpagos ascendentes e descendentes de polaridade positiva e negativa.

Entre o período de 2012 a 2019 o grupo adquiriu dados de relâmpagos na cidade de São Paulo (SP). Os prédios escolhidos para observação, e para instalação dos equipamentos, se encontram no bairro Jardim Cidade Pirituba, que foram chamados de P1 e P2. No Apêndice A, apresentamos o local de instalação das câmeras. Na Figura 3.1, apresentamos os prédios P1 e P2 e ao fundo o Pico do Jaraguá.

Figura 3.1 - Os prédios P1P2 e ao fundo o Pico do Jaraguá.



Fonte: ELAT (2018g).

Em meados de 2019, os equipamentos foram desmontados e trazidos para o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), localizado em São José dos Campos (SP). A instalação dos equipamentos ocorreu até o final de outubro de 2019 visando a aquisição dos dados entre os meses: novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março.

Apesar dos dados utilizados neste trabalho tenham sido obtidos na campanha realizada em São Paulo, a realocação dos equipamentos para as dependências do INPE, em 2019, se mostrou uma excelente oportunidade para complementar o conhecimento técnico e teórico a respeito dos mesmos. Este capítulo mostrará uma descrição das câmeras utilizadas para filmar os relâmpagos, o detalhamento de ambas instala-

ções, além de uma visão geral sobre as redes de detecção, cujos dados auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

A proposta de estudo no INPE é verificar o aparecimento de LACs e LANCs em duas estruturas altas, a Caixa d'água e a Torre da Antena, cada uma delas com cerca de 40 metros de altura. A Caixa d'água se localiza próximo ao prédio LAMBDA, onde foi instalado o equipamento para medição de corrente elétrica e, a Torre da Antena está localizada próximo ao prédio SIGMA, onde foram instalados o medidor de campo elétrico e o sensor de raios-X. Na Figura 3.2, podemos visualizar as estruturas.

Figura 3.2 - A Torre da Antena e a Caixa d'água.



Fonte: Próprio autor.

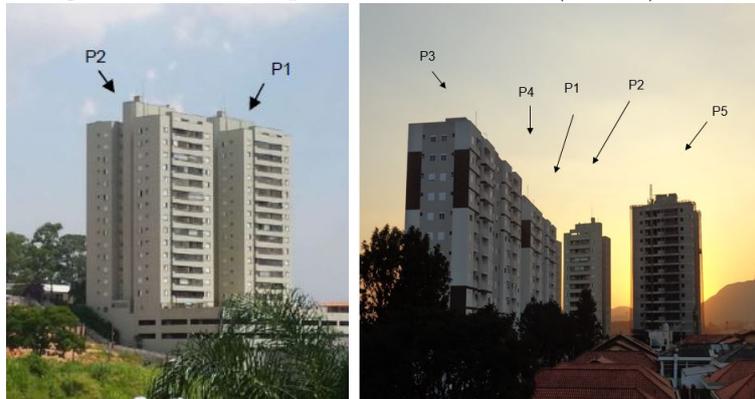
### 3.1 Processo de instalação

#### 3.1.1 São Paulo (2012 - 2019)

Para a instalação dos equipamentos na cidade de São Paulo, foi realizado um estudo da densidade de relâmpagos na região. Com base neste estudo, observou-se que o bairro de Pirituba seria um local estratégico para a instalação dos equipamentos por possuir uma densidade consideravelmente alta (cerca de 11 relâmpagos/km<sup>2</sup>) (SABA et al., 2017).

Quando iniciou o processo de instalação dos equipamentos nos prédios P1 e P2, nome dado para simplificar a identificação, a área possuía várias torres de celulares e apenas dois prédios, que são idênticos e possuem o mesmo sistema de SPDA instalado (SABA et al., 2017). Apresentamos os prédios na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Edifício residencial escolhido inicialmente para estudo P1 e P2 (esquerda) e a situação atual com os prédios P3, P4 e P5 (direita).



Fonte: ELAT (2018b).

Com o intuito de estudar raios-X produzido por descargas atmosféricas, os equipamentos foram instalados em cima dos prédios P1 e P2. As câmeras foram instaladas em pontos distintos para filmar relâmpagos sob diferentes ângulos. O posicionamento das câmeras está disposto na Figura 3.4.

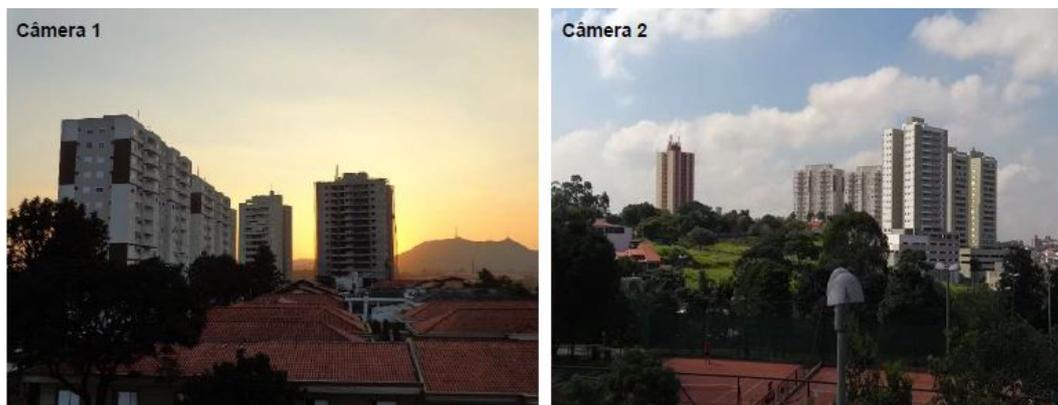
Figura 3.4 - A imagem de satélite apresenta os pontos e as distâncias entre os prédios estudados e as câmeras.



Fonte: Adaptado do Google Maps (2019a).

Como podemos visualizar na imagem de satélite, Figura 3.4, as câmeras estão a uma distância de 200 metros e 445 metros dos prédios P1 e P2. A Figura 3.5 apresenta a imagem dos prédios (câmera 1 - vista frontal e câmera 2 - vista lateral).

Figura 3.5 - As fotos apresentam as imagens dos prédios na posição 1 e 2 das câmeras.



Fonte: (a) ELAT (2018a). (b) Próprio autor.

Definidos os locais das instalações, a próxima etapa foi definir quais lentes seriam utilizadas por cada câmera. Na Seção 3.2, apresentamos as características e o *software* utilizado pelas câmeras onde são selecionadas as configurações como resolução, a taxa de amostragem (qps) e o tempo de exposição.

As configurações dependem da proximidade das estruturas e da área de observação que se deseja cobrir. Por isso, a escolha correta do tipo de lente é tão importante para garantir a qualidade das imagens geradas. Na Tabela 3.1, apresentamos as configurações das câmeras e as suas respectivas lentes.

Tabela 3.1 - Descrição básica das configurações das câmeras localizadas em São Paulo e a distância focal das lentes utilizadas.

<b>Câmeras</b>	<b>Resolução</b>	<b>qps</b>	<b>Pixel (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Distância focal da lente (mm)</b>
v711	368 x 416	37800	20	6,5
H8R	1980 x 1080	30	1,55	1,4
D800	7360 x 4912	-	4,88	24
Sony	768 x 494	30	5	4

Durante o período que os equipamentos permaneceram em São Paulo (2012 a 2019), foi possível montar um grande banco de dados. Com o aumento dos prédios em torno dos prédios estudados, começou a ocorrer uma interferência dos outros para-raios, interceptando os líderes escalonados, tornando inviável continuar as pesquisas no local. Em consequência disso, em meados de 2019, todos os equipamentos foram trazidos para o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em São José dos Campos (SP).

### 3.1.2 São José dos Campos

Para estudar os relâmpagos que ocorrem dentro do Instituto, foram instalados todos os equipamentos que estavam em São Paulo, os sensores de campo elétrico, de raios-X, de corrente, além das câmeras de alta velocidade. Todas as câmeras foram direcionadas para as duas estruturas mais altas que são a Caixa d'água e a Torre da Antena. Na Figura 3.6, apresentamos as duas estruturas.

Figura 3.6 - Torre da Antena e a Caixa d'água, estruturas próximas onde foram instalados os sensores de raios-X, campo elétrico e corrente.



Fonte: Próprio autor.

As câmeras de alta velocidade encontram-se distribuídas em diversos pontos dentro do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com o intuito de cobrir um maior raio de observação, conforme podemos observar no Apêndice B. A Figura 3.7 apresenta os prédios onde encontram-se as câmeras e as quantidades instaladas. Os prédios são:

- Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST);
- Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA 2);
- Laboratório de Integração e Testes (LIT);
- Associação Desportiva Classista (ADC);
- Torre do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA).

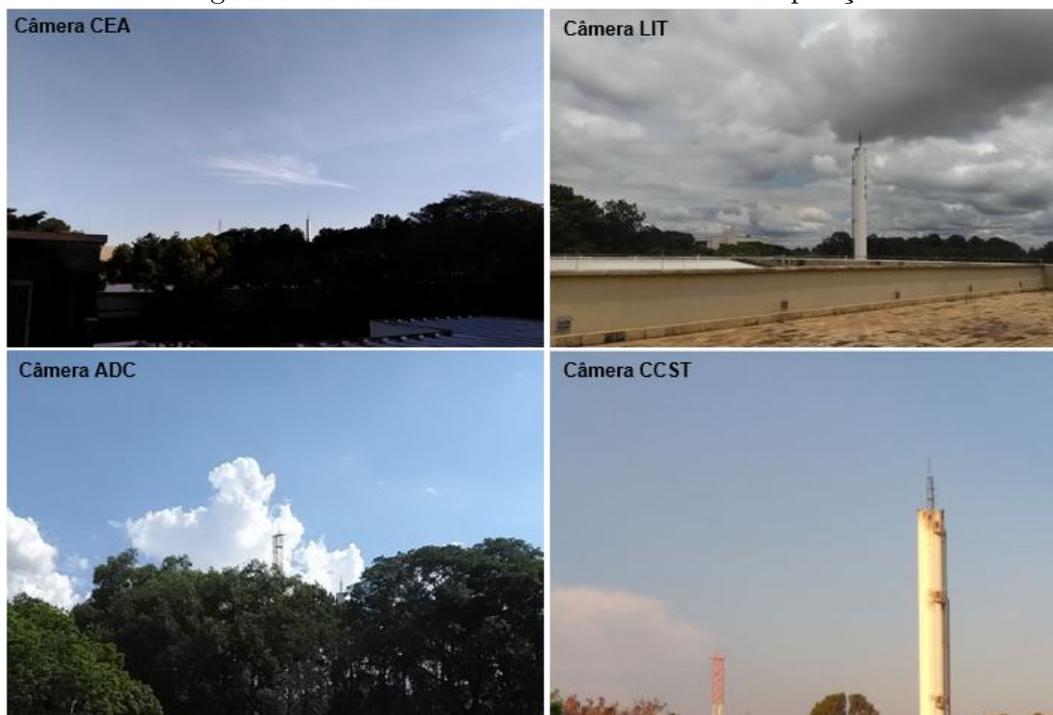
Figura 3.7 - A imagem de satélite apresenta os pontos de instalação das câmeras com suas respectivas indicações de quantidades.



Fonte: Adaptado do Google Earth (2020a).

Na Figura 3.8, apresentamos a vista das câmeras em cada ponto de instalação, direcionadas para as estruturas em estudo.

Figura 3.8 - Vista real das Estruturas em cada posição.



Fonte: Próprio autor.

Assim como realizado em São Paulo, após definido os locais das instalações, a próxima etapa foi definir quais lentes seriam utilizadas em cada câmera. Na Tabela 3.2, apresentamos as configurações das câmeras e as suas respectivas lentes.

Tabela 3.2 - Descrição básica das configurações das câmeras localizadas no INPE e a distância focal das lentes utilizadas.

<b>Câmeras</b>	<b>Resolução</b>	<b>qps</b>	<b>Pixel (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Distância focal da lente (mm)</b>
v9.1-CCST	1008 x 400	4000	20	18
v711-CCST	512 x 256	49000	20	6,5
V2012-CCST	384 x 320	120000	20	8
v9.1-CEA2	768 x 576	3200	20	18
MV1-CEA2	1280 x 1024	81	4,8	5
MV2-ADC	1280 x 1024	81	4,8	5
v9.1-LIT	960 x 720	2500	20	18
Sony-DCTA	768 x 494	30	5	4

## 3.2 Câmeras

Para o desenvolvimento nosso trabalho, foi necessário o posicionamento das câmeras em diferentes locais para estudar os relâmpagos. Esse posicionamento das câmeras com um ângulo de aproximadamente  $90^\circ$  entre elas, permitiu a captura de imagens para a reconstrução do canal de relâmpagos em 3D. Foram utilizadas câmeras de alta velocidade que permitem a visualização de cada etapa do relâmpago em *slow motion*, facilitando os estudos. As câmeras de vigilância e fotográfica, auxiliam na identificação e validação do relâmpago e, conseqüentemente, pode ser utilizada para a coleta de dados.

### 3.2.1 Câmeras de alta velocidade

As câmeras de alta velocidade utilizadas neste trabalho são da marca Phantom, da empresa Vision Research. Apesar das diferenças entre elas, alguns parâmetros são iguais para todas. Antes do início das gravações podem ser ajustados na configuração do *software* a resolução, a taxa de aquisição e o tempo de exposição. Quanto menor for a resolução selecionada, maior será a taxa de aquisição (qps) produzida. Os dois parâmetros devem ser configurados juntos.

A câmera está continuamente gravando e salvando as imagens na memória, apagando as imagens mais antigas, e substituindo por novas. Dependendo da configuração, ao disparar a câmera, ela salva um trecho do vídeo antes do disparo e outro trecho depois do disparo. Com o intuito de não perder nenhum instante do relâmpago, decidiu-se que o melhor ajuste seria um pré-disparo grande e um pós-disparo pequeno, essa duração depende da resolução configurada em cada câmera. O *software* ainda permite a análise detalhada dos relâmpagos, permitindo visualizar as imagens gravadas quadro a quadro.

- Câmera Phantom v9.1

A câmera v9.1 é a mais antiga das utilizadas nas instalações, segundo o fabricante, possui resolução de 1632 x 1200 pixels (*picture element*) - 14bit, e faz gravações a 1000 qps (na maior resolução) até 153,846 qps (a 96 x 8 pixels). Durante as observações em São Paulo foi utilizada uma câmera monocromática. Após a realocação dos equipamentos para São José dos Campos foram utilizadas uma câmera colorida e duas monocromáticas. Na Figura 3.9, apresentamos uma imagem da câmera v9.1.

Figura 3.9 - Representação da câmera Phantom v9.1.

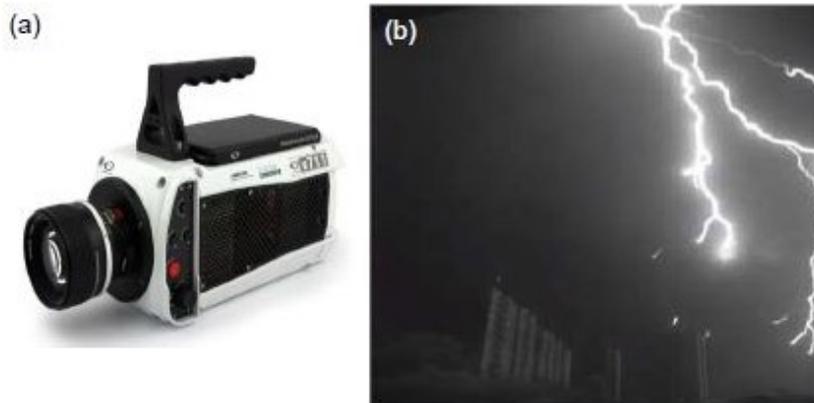


(a) Câmera Phantom v9.1. (b) Imagem produzida pela câmera.  
Fonte: Próprio autor.

- Câmera Phantom v711

A câmera v711, segundo o fabricante, possui resolução de 1280 x 800 pixels - 12bit, e faz gravações a 7530 qps (na maior resolução) até 1.400.000 qps (a 128 x 8 pixels). A câmera foi utilizada para observações em São Paulo e em São José dos Campos. Na Figura 3.10, apresentamos uma imagem da câmera v9.1.

Figura 3.10 - Representação da câmera Phantom v711.

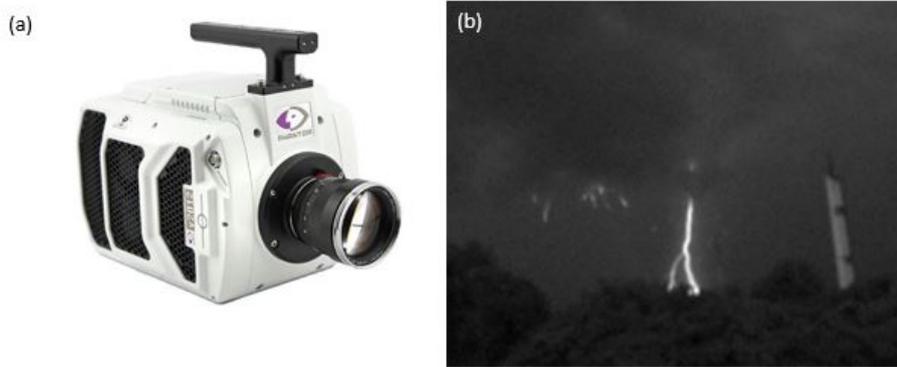


(a) Imagem da câmera v711. (b) Imagem gerada pela câmera  
Fonte: (a) Phantom (2018). (b) ELAT (2018f).

- Câmera Phantom v2012

A câmera v2012 apresentada na Figura 3.11, segundo o fabricante, possui resolução de 1280 x 800 pixels - 12bit, e faz gravações a 22,60 qps (na maior resolução) até 1.000.000 qps (a 128 x 16 pixels). A câmera foi utilizada para observações em São José dos Campos. A configuração de observação foi ajustada para 512 x 208 pixels, fazendo gravações a 120.000 qps.

Figura 3.11 - Representação da câmera Phantom v2012.



(a) Câmera v2012. (b) Imagem capturada pela câmera.

Fonte: (a) Phantom (2020b). (b) Próprio autor.

### 3.2.2 Câmeras auxiliares

- Câmera MV-CA013-20UC

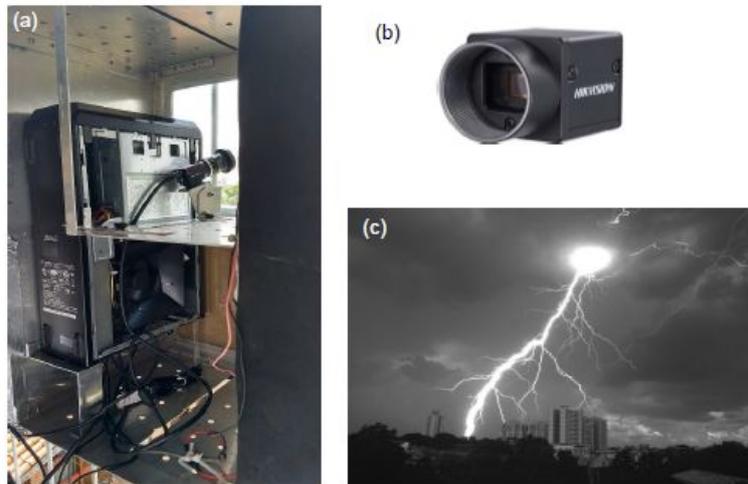
Duas câmeras MV-CA013-20UC foram utilizadas nas instalações, como mostra a Figura 3.12. Cada câmera possui uma boa qualidade de gravação e é capaz de gravar até 85 qps, para um tempo de exposição de 12.000 microssegundos ( $\mu s$ ).

Para não perder nenhum instante do relâmpago, ficou decidido que o melhor ajuste seria para um intervalo de 1,5 segundos para a aquisição das imagens, sendo 0,5 segundos de pré-disparo e 1 segundo de pós-disparo. A câmera foi programada para disparar (acionar seu mecanismo de gravação das imagens) quando perceber uma variação muito alta da luminosidade.

Os fornecedores da câmera MV-CA013-20UC disponibilizaram um *software* que permite a visualização dos vídeos e das imagens registradas quadro a quadro, além de apresentar a imagem que gerou o acionamento da câmera e um pequeno vídeo para todo o relâmpago capturado.

Por convenção chamaremos as câmeras de MV1 e MV2, e assim serão indicadas ao longo do texto.

Figura 3.12 - Representação da câmera MV1.

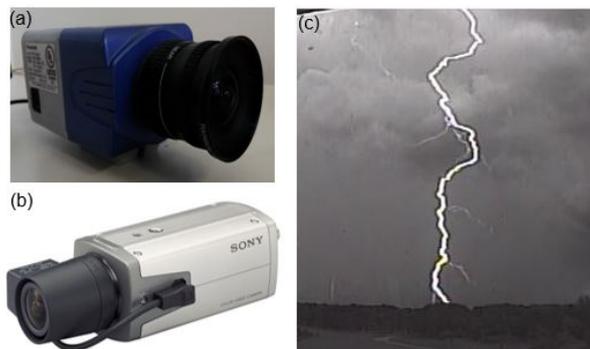


(a) Câmera (em funcionamento) na sua estrutura. (b) Uma foto da câmera sem a lente. (c) Imagem capturada pela câmera mostrando o seu ângulo de visada  
Fonte: Próprio autor.

- Câmera de vigilância

As câmeras de vigilância podem ser configuradas conforme as necessidades das gravações. Configuradas como monocromáticas permitem uma melhor qualidade nas imagens capturadas, além de serem capazes de gravar 30 quadros por segundo (qps). O sistema de gravação DVR foi configurado para gravar continuamente por 30 dias. Em cada câmera é instalado um GPS para garantir que os relâmpagos sejam encontrados após o período de gravação. A Figura 3.13 mostra uma dessas câmeras, que encontra-se instalada na Torre do DCTA.

Figura 3.13 - Representação das câmeras de vigilância Sony e Panasonic.



(a) Câmera de vigilância Panasonic. (b) Câmera de vigilância Sony. (c) Imagem produzida pela câmera Sony.

Fonte: Próprio autor.

- Câmera D800

Durante a campanha em São Paulo a câmera fotográfica da marca Nikon D800 foi utilizada. Na Figura 3.14, podemos observar uma imagem da câmera D800 e uma fotografia de um relâmpago capturado.

A câmera D800 tem um sensor de formato FX de 36,3 megapixels (MP) e um sistema de foco automático, possuindo níveis de profundidade e de detalhes, o que proporciona uma alta qualidade das imagens e vídeos. O tamanho da imagem em pixel vai depender das configurações adotadas pelo operador ou conforme especificações determinadas pelo grupo, dependendo do tipo de imagem que se deseja obter.

Juntamente com a câmera foi instalado um sensor de luminosidade que permite o acionamento da câmera quando a luminosidade ultrapassa um certo limite (este limite dependerá da luminosidade durante a tempestade e é ajustado pelo operador, sendo menor quando estiver claro e maior quando estiver escuro).

Figura 3.14 - Representação da câmera D800.



(a) Câmera D800. (b) Imagem capturada pela câmera.

Fonte: (a) Nikon (2020). (b) ELAT (2019a).

- Câmera H8R

A última câmera auxiliar é uma Ekken H8R. Ela possui uma lente com uma abertura de 170°. Na Figura 3.15 podemos observar a imagem da câmera e uma imagem capturada por ela. A câmera H8R pode ser configurada para capturar imagens fotográficas com qualidade de até 14 megapixels (MP). O tamanho da imagem em pixel vai depender das configurações adotadas pelo operador ou conforme especificações determinadas pelo grupo, dependendo do tipo de imagem que se deseja obter. A câmera pode ser utilizada para gravar vídeos com 30 ou 60 quadros por segundo (qps). Como possui um

microfone interno, podemos utilizá-la para gravar o som do trovão e utilizá-lo para calcular a distância do relâmpago até a câmera.

Figura 3.15 - Representação da câmera H8R.



(a) Câmera H8R. (b) Imagem capturada pela câmera.

Fonte: (a) [EKEN \(2020\)](#). (b) [ELAT \(2018e\)](#).

### 3.2.3 Lentes

As lentes são escolhidas conforme a necessidade de obtenção de imagens, levando em consideração a distância focal e o ângulo de visão, zoom, focagem (automática ou manual), uso especial (olho de peixe), dentre outras. Na Figura 3.16, apresentamos apenas duas lentes utilizadas nas observações.

Figura 3.16 - Representação das lentes.

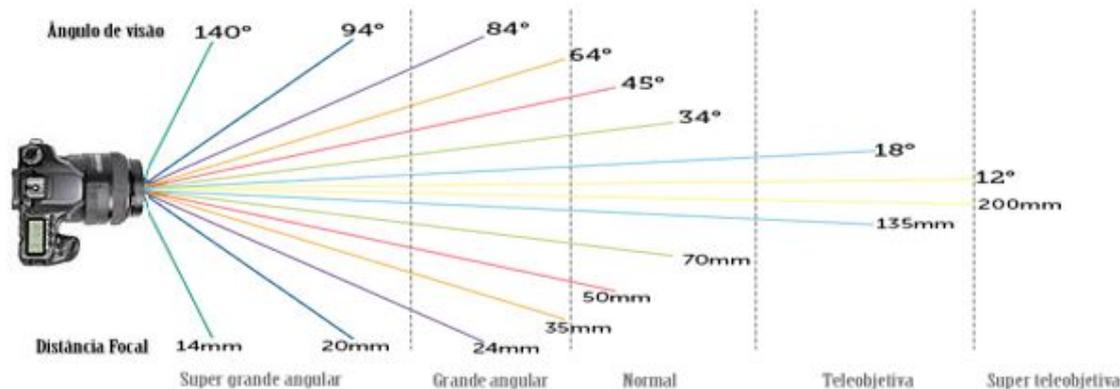


Fonte: Próprio autor.

A primeira lente (a), é uma Nikon de 18-55 mm. Conforme aumentamos de 18 para 55 mm vamos reduzindo o ângulo de abertura da imagem. A lente de 20 mm (b), possui uma boa abertura de foco, permitindo capturar imagens com ótima qualidade, além de possuir uma capacidade para baixa luminosidade. As lentes apresentadas podem ser utilizadas nas câmeras v9.1, v711, v2012 e D800.

Na Figura 3.17 apresentamos uma imagem que representa a distância focal e o ângulo de abertura da lente. Podemos observar que conforme aumentamos a distância focal, menor será o ângulo de abertura da imagem capturada.

Figura 3.17 - Representação da distância focal e do ângulo de visão.



Fonte: Simxer (2017).

### 3.3 Módulo para acionamento remoto das câmeras

Como veremos na Seção seguinte, as câmeras foram instaladas em locais diferentes. Dessa forma, fazia-se necessário, ao menos, quatro pessoas no monitoramento, uma em cada local.

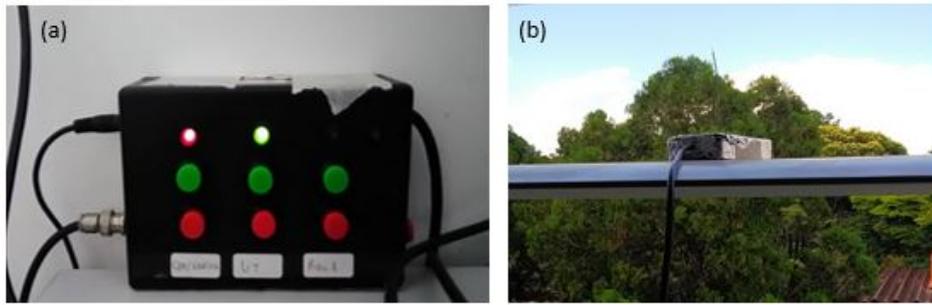
A solução encontrada para que apenas uma pessoa ficasse responsável para disparar as câmeras foi o desenvolvimento de um módulo, criado pelo estagiário Paulo Lessa (ECANTECH SISTEMAS, 2019-2020), para o acionamento remoto dos equipamentos.

O operador é responsável por todos os equipamentos durante a tempestade. Através deste módulo, é possível que o operador ligue e desligue os equipamentos à distância (câmeras e os sensores de raios-X) sem a necessidade de ir até o local de instalação para verificar o equipamento ou para ligar manualmente.

Quando os equipamentos vieram para o INPE, foi instalada uma quantidade maior de câmeras, tendo um aumento significativo na quantidade de equipamentos instalados. Como o grupo ELAT encontra-se alocado no prédio do Centro de Ciências dos Sistemas Terrestres (CCST), foi implantado um centro de monitoramento de relâmpagos que se localiza na sala 26, de agora em diante denominado S26-CCST.

Na S26-CCST estão instaladas as câmeras v711, v9.1 e a v2012, além de uma câmera fotográfica D800. Nesta sala também se encontra o módulo para acionamento remotos dos equipamentos, como podemos observar na Figura 3.18.

Figura 3.18 - Módulo para acionamento remoto.



(a) Módulo desenvolvido para acionamento remoto das câmeras e para o sistema de liga/desliga os sensores de raios-X. (b) A antena permite a comunicação entre os equipamentos e o centro de monitoramento.

Fonte: Próprio autor.

Após algumas semanas de campanha, percebeu-se que era necessário um maior controle das câmeras que seriam disparadas durante as tempestades. A Figura 3.19 apresenta o dispositivo acoplado junto ao módulo. Isso permitiu ao operador total controle das câmeras, ligando apenas as câmeras que estão direcionadas para o local onde está ocorrendo a tempestade, auxiliando também, no controle de dados coletados.

Figura 3.19 - Dispositivo que permite selecionar as câmeras que serão disparadas durante as tempestades.



Fonte: Próprio autor.

Após verificar todas as configurações das câmeras e conferir o ajuste de luminosidade, conforme as condições do tempo, as câmeras estão aptas para iniciar as gravações. Todas as aquisições de imagens pelas câmeras são sincronizadas com o GPS no horário UTC (Tempo Universal Coordenado), que para facilitar abreviaremos para UT.

### 3.4 Sensores de campo elétrico

Os sensores de campo elétrico são compostos por antenas de placas paralelas conectada a um integrador, amplificador e receptor GPS, que conseguem registrar a radiação eletromagnética emitida pelos relâmpagos no decorrer do tempo. Os sensores são classificados como alto ganho e ganho baixo, o que torna possível a detecção das componentes de alta frequência geradas pelos relâmpagos, permitindo validar os registros tanto das redes de detecção, quanto das imagens capturadas pelas câmeras.

Figura 3.20 - Sensores de campo elétrico.



Fonte: ELAT (2018b).

### 3.5 Rede de detecção de descargas atmosféricas

Desde o início dos estudos, o ELAT conta com o apoio da rede de detecção de descargas atmosféricas a BrasilDAT. Os dados adquiridos pela rede estão disponibilizados para consulta das descargas que ocorreram próximas aos locais de estudo, em tempo real e através de um banco de dados.

#### 3.5.1 BrasilDAT

Conhecida como Sistema Brasileiro de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT) é o maior sistema implantado numa região tropical. Operado pelo grupo ELAT, a rede possui 56 sensores instalados nas regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do Brasil. O sistema registra o ponto de impacto das descargas atmosféricas que atingem o solo e para as descargas que não atingem o solo é fornecida uma aproximação média da ocorrência (CCST/INPE, 2018).

Após passar pelo processo de validação, os dados registrados são enviados para a central de processamento e são armazenadas em um banco de dados. As descargas identificadas permanecem disponíveis para consulta, apresentando as seguintes informações: polaridade (positivo ou negativo), data, horário (UT), localização (latitude e longitude) e o pico de corrente (FERRAZ, 2009). Na Figura 3.21, apresentamos a localização dos sensores de detecção das descargas atmosféricas da rede BrasilDAT.

Figura 3.21 - Posição dos detectores da rede BrasilDAT.



Fonte: Naccarato (2020).



## 4 METODOLOGIA

Os estudos propostos neste trabalho necessitam da reconstrução do canal do relâmpago em três dimensões. Portanto, neste Capítulo apresentamos a disposição das coordenadas geográficas e de localização das câmeras e das estruturas, além de apresentar uma breve introdução de como foi construído o algoritmo de reconstrução em 3D para os eventos estudados.

### 4.1 Reconstrução do canal do relâmpago em 3D

#### 4.1.1 São Paulo

Para desenvolver o método de reconstrução, precisamos de todas as informações referentes as configurações das câmeras, que podem ser encontradas na Seção 3.1.1 e, das informações das coordenadas geográficas (que podem ser obtidas através do Google Maps ou Earth) do posicionamento das câmeras e as coordenadas de localização em relação aos eixos x, y e z.

Com o objetivo de obter as coordenadas de localização utilizamos os sites [SunEarth-Tools.com](#) (2009-2020) e [Vivid Planet](#) (2020) para encontrar as distâncias entre as câmeras e os prédios em estudo. A altura dos prédios foi obtida através das plantas dos edifícios. É necessário definir um ponto inicial (0,0,0) do mapa de localização em 2D. Esse ponto foi determinado de acordo com a menor diferença entre a altitude deste ponto e as altitudes dos locais das câmeras, esse ponto será utilizado para reduzir um possível erro de altura entre as câmeras, que poderia afetar no resultado da reconstrução do canal.

Definido o ponto inicial, utilizamos a Equação 4.1 para determinar a distância entre longitude (eixo x) e latitude (eixo y) do ponto inicial, as posições das câmeras e das estruturas em estudo.

$$D(A, B) = R \cdot \arccos[(\text{sen}(\text{lat}A) \cdot \text{sen}(\text{lat}B)) + (\text{cos}(\text{lat}A) \cdot \text{cos}(\text{lat}B) \cdot \text{cos}(\text{lon}A - \text{lon}B))] \quad (4.1)$$

onde D é a distância entre as posições, A e B é o posicionamento em relação a latitude e longitude, R é o raio da Terra, lat é a latitude e lon é a longitude, na Equação 4.1, a latitude A e longitude A foram representadas pelo ponto inicial

e, a latitude B e longitude B foram representadas pelos pontos das câmeras de alta velocidade e auxiliar e do ponto de referência. Para os cálculos utilizamos um programa de computador. Na Figura 4.1, apresentamos a representação do sistema de coordenadas e na Tabela 4.1 estão dispostas as coordenadas geográficas e as coordenadas de localização em x, y e z para as câmeras v711, H8R, D800 e Sony.

Figura 4.1 - Representação do sistema de coordenadas.



Fonte: Adaptado do Google Maps (2019d).

Tabela 4.1 - Coordenadas geográficas e de localização do posicionamento das câmeras.

Câmeras	Coordenadas Geográficas		Localização (m)		
	Latitude	Longitude	x	y	z
v711	-23.483672	-46.725695	0.0	158.20	16.0
H8R	-23.483672	-46.725695	0.0	158.20	16.0
D800	-23.479605	-46.728312	238.90	-304.58	9.0
Sony	-23.479605	-46.728312	238.90	-304.58	9.0

Além disso, precisamos das coordenadas geográficas dos para-raios de cada prédio (P1, P2 e P3), dados que servem como informações de entrada do sistema. Outro dado importante é a quantidade de pixels de cada imagem e essa aquisição é realizada manualmente. Portanto, quanto maior o número de pixels, maior a confiabilidade do resultado final (SIQUEIRA, 2018).

Na Tabela 4.2, apresentamos as coordenadas geográficas e as coordenadas de localização em relação aos eixos x, y e z, dos prédios estudados. Esses dados são importantes, pois serão utilizados para outras reconstruções, a partir dos dados obtidos na cidade de São Paulo.

Tabela 4.2 - Coordenadas geográficas e de localização do posicionamento dos prédios.

Prédios	Coordenadas Geográficas		Localização (m)		
	Latitude	Longitude	x	y	z
P1	-23.483424	-46.727823	207.80	105.04	48.0
P2	-23.483245	-46.727676	225.00	126.59	48.0
P3	-23.483632	-23.479605	156.57	142.65	44.0

#### 4.1.2 São José dos Campos

Após organizadas todas as informações referentes as configurações das câmeras, como apresentadas na Seção 3.1.2, passamos para a fase da aquisição das coordenadas geográficas e das coordenadas de localização, em relação aos eixos x, y e z das câmeras e das estruturas em estudo (GOOGLE EARTH, 2020a).

Com o objetivo de coletar as coordenadas de localização utilizamos o mesmo procedimento adotado em São Paulo para encontrar as distâncias entre as câmeras e as estruturas em estudo. A altura dos prédios foi obtido através das plantas dos edifícios (SUNEARTHTOOLS.COM, 2009-2020; VIVID PLANET, 2020). Definido o ponto inicial (0,0,0), aplicamos a Equação 4.1, encontramos a localização das câmeras e das estruturas em de x, y e z.

Entretanto, não podemos determinar com exatidão os dados coletados devido a um erro nas medições de localização quando se precisa trabalhar com escalas superiores a 1:30.000 (sendo utilizado apenas para medições básicas)(SILVA; FREITAS, 1998) e, da eficiência de detecção do satélite de localização e posicionamento (GPS e Landsat 8). Na Figura 4.2, apresentamos a representação do sistema de coordenadas e, as coordenadas geográficas e de localização em x, y e z para as câmeras, como podemos

visualizar na Tabela 4.3.

Figura 4.2 - Representação do sistema de coordenadas.



Fonte: Adaptado do Google Maps (2019e).

Tabela 4.3 - Coordenadas geográficas e de localização do posicionamento das câmeras.

Câmeras	Local	Coordenadas Geográficas		Localização (m)		
		Latitude	Longitude	x	y	z <sup>1</sup>
v711/v9.1/V2012	CCST	-23.211298	-45.860352	15,5	38,2	-
v9.1/MV1	CEA 2	-23.207767	-45.859781	73,9	430,9	-
MV2	ADC	-23.208662	-45.858365	218,7	331,3	-
v9.1	LIT	-23.210802	-45.857946	261,5	93,3	-
Sony	Torre/DCTA	-23.212549	-45.866863	-650,0	-101,0	-

<sup>1</sup>Depende diretamente da altura dos prédios que estão instaladas as câmeras.

Na Tabela 4.4, apresentamos as informações referentes às coordenadas geográficas e às coordenadas de localização, em relação aos eixos x, y e z das estruturas (GOOGLE EARTH, 2020a).

Tabela 4.4 - Coordenadas geográficas e de localização (m) do posicionamento das estruturas.

Estruturas	Coordenadas Geográficas		Localização (m)		
	Latitude	Longitude	x	y	z <sup>2</sup>
Caixa d'água	-23.210700	-45.859058	147,8	104,7	-
Antena	-23.210129	-45.858608	193,8	168,2	-

<sup>2</sup>Depende diretamente da altura das estruturas até a ponta do para-raios.

Com a finalidade de verificar se o relâmpago teve o seu ponto de impacto próximo às estruturas estudadas, buscamos as informações na rede de detecção de descargas atmosféricas BrasilDAT. Através dela, identificamos a latitude e longitude do ponto de impacto da descarga no solo.

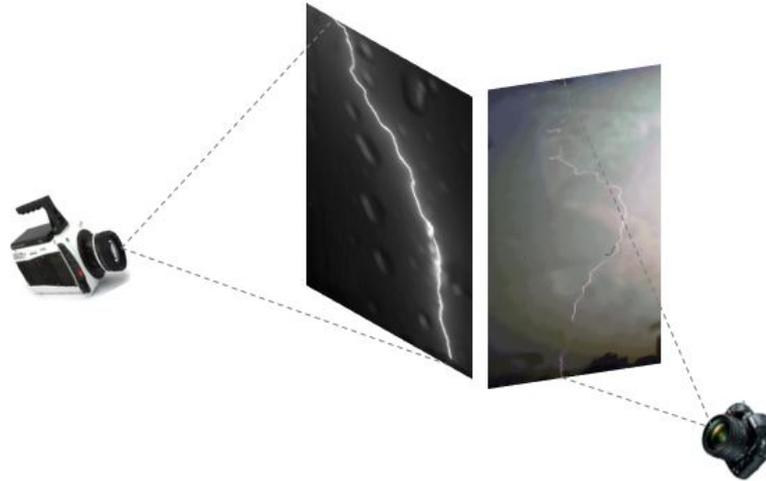
A análise de todos os relâmpagos registrados é realizada a partir da comparação com os horários de sua ocorrência, tanto com os dados fornecidos pelas redes de detecção, quanto com os apresentados pelos GPS das câmeras, a fim de verificar se o relâmpago selecionado teve o seu ponto de impacto dentro de um raio inferior a 1 km, onde encontram-se instalados todos os equipamentos para pesquisa. Essa análise é importante para verificar se o relâmpago está próximo ou não dos equipamentos instalados.

## 4.2 Algoritmo de reconstrução

Até aqui apresentamos as instalações, as configurações das câmeras, as coordenadas geográficas e as coordenadas de localização. Todos esses dados apresentados são importantes, pois são através destas informações e juntamente com a coleta dos pontos das imagens capturadas pelas câmeras que se torna possível a reconstrução do canal do relâmpago.

O algoritmo foi desenvolvido para apresentar um modelo mais próximo possível do relâmpago capturado por duas ou mais câmeras em pontos distintos. O método de coleta dos pixels das imagens é manual. Portanto, cabe ao responsável pela coleta dos pontos uma maior exatidão e o maior número de pontos coletados para reduzir a possibilidade de erro na reconstrução do canal. Na Figura 4.3, apresentamos uma vista em perspectiva do relâmpago vista pelas câmeras v711 e D800.

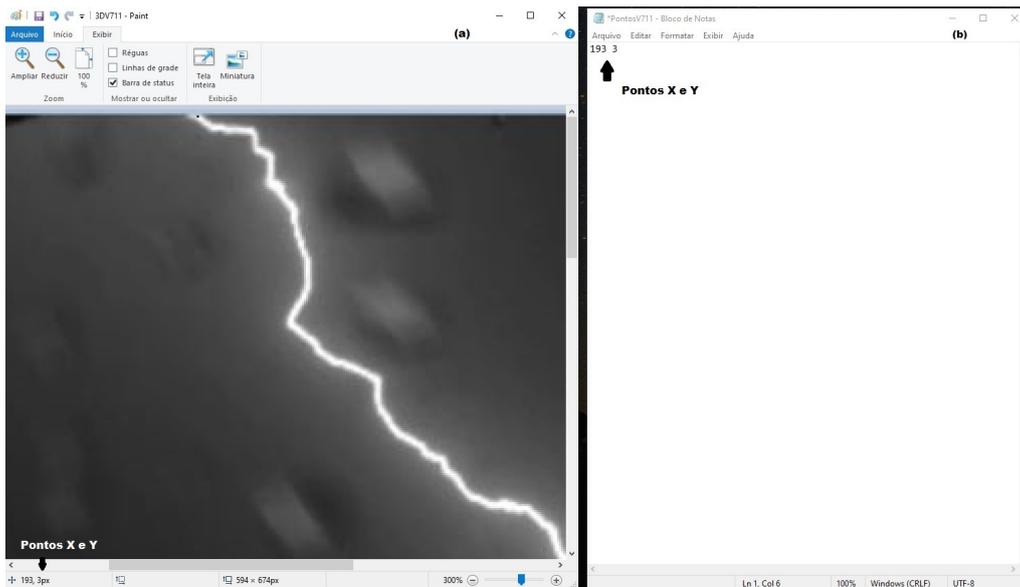
Figura 4.3 - Representação do relâmpago visto pelas câmeras v711 e D800.



Fonte: Próprio autor.

Os pontos coletados são em 2D, logo, devemos obter os pontos x e y, em pixel, de cada imagem. Esses pontos deverão ser colocados em uma tabela, que pode ser criada a partir de um editor de texto, por exemplo, o “Bloco de Notas” do Windows. Para facilitar a coleta dos pontos podemos utilizar o programa fornecido pelo Windows o “Paint” ou, para as imagens capturadas pelas câmeras de alta velocidade, o programa fornecido pela câmera Phantom o “PCC Software” (PHANTOM, 2020a), como podemos observar na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Na Figura apresentamos o método de coleta dos pontos.

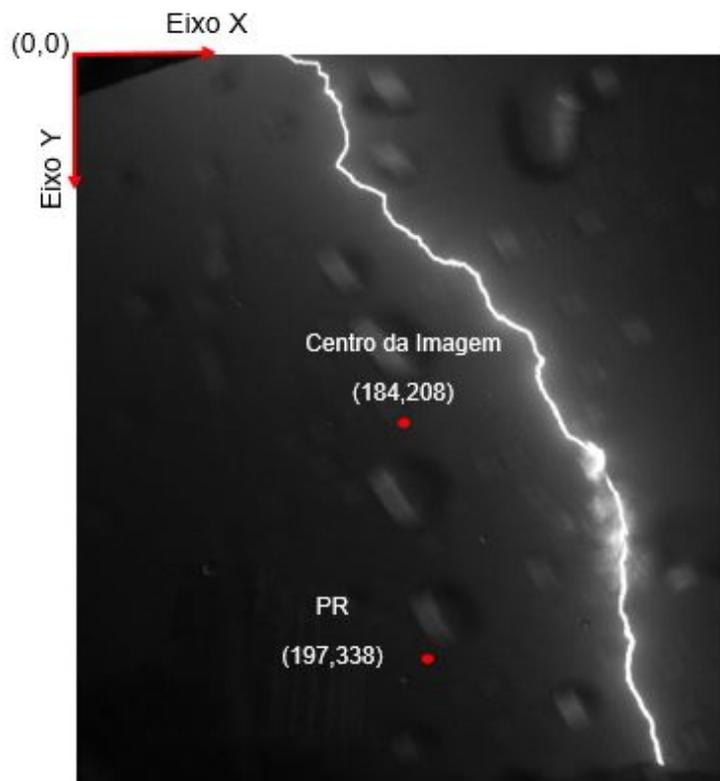


(a) Seleção dos pontos no paint. (b) Início do preenchimento da tabela no bloco de notas.  
Fonte: Próprio autor.

Para obter o ponto de referência (PR) direcionamos as câmeras para a ponta do para-raios. E deve ser facilmente reconhecido nas imagens, já que é o local que se espera que haja o contato com o relâmpago. Outro dado importante é o ângulo de inclinação do eixo ótico das câmeras em relação ao plano horizontal, em graus, ou seja, o ângulo de elevação.

Considerando que a imagem capturada por cada câmera é composta por dimensões x e y, em pixel, sendo x a largura e y a altura, com os pontos de origem na extremidade superior a esquerda da imagem. Para os pontos de referência (PR) precisamos dos valores  $X_{PR}$  e  $Y_{PR}$  da ponta do para-raios na imagem capturada pela câmera, na Figura 4.5, apresentamos os pontos do centro de imagem e de referência para a câmera v711.

Figura 4.5 - Representação dos pontos do centro da imagem e de referência para a câmera v711.



Na imagem não é possível identificar o para-raios, mas o ponto de referência possui um sistema de coordenadas conhecido.

Fonte: Próprio autor.

Apresentamos a sequência dos dados para a variável INFO, para os eventos ocorridos

em São Paulo, no dia 20 de março de 2018, Tabela 4.5 e para o dia 16 de dezembro de 2018, Tabela 4.6.

Tabela 4.5 - Sequência dos dados para a variável INFO (CR - câmeras v711 e CA - câmera D800).

<b>INFO</b>	
Ângulo do eixo ótico da CR com o plano horizontal (em graus)	29,3150
Ângulo azimutal entre a projeção do eixo da CR e o ponto de origem (crescente no sentido horário)	352,0041
Coordenada x da CR no mapa 3D (m)	0,0
Coordenada y da CR no mapa 3D (m)	158,20
Coordenada z da CR no mapa 3D (m)	16,0
Distância focal da CR (m)	0,0065
Razão metros por pixel do sensor da CR (m)	$20,0 \cdot 10^{-6}$
Ângulo do eixo ótico da CA com o plano horizontal (em graus)	26,3080
Ângulo azimutal entre a projeção do eixo da CA e o ponto de origem (crescente no sentido horário)	91,3008
Coordenada x da CA no mapa 3D (m)	238,9
Coordenada y da CA no mapa 3D (m)	-304,58
Coordenada z da CA no mapa 3D (m)	9,0
Distância focal da CA (m)	0,0240
Razão metros por pixel do sensor da CA (m)	$4,88 \cdot 10^{-6}$

Tabela 4.6 - Sequência dos dados para a variável INFO (CR - câmeras H8R e CA - câmera Sony).

<b>INFO</b>	
Ângulo do eixo ótico da CR com o plano horizontal (em graus)	30,7500
Ângulo azimutal entre a projeção do eixo da CR e o ponto de origem (crescente no sentido horário)	345,8756
Coordenada x da CR no mapa 3D (m)	0,0
Coordenada y da CR no mapa 3D (m)	158,20
Coordenada z da CR no mapa 3D (m)	16,0
Distância focal da CR (m)	0,00136
Razão metros por pixel do sensor da CR (m)	$1,55 \cdot 10^{-6}$

Tabela 4.6 - Conclusão

INFO	
Ângulo do eixo ótico da CA com o plano horizontal (em graus)	19,7500
Ângulo azimutal entre a projeção do eixo da CA e o ponto de origem (crescente no sentido horário)	94,3219
Coordenada x da CA no mapa 3D (m)	238,9
Coordenada y da CA no mapa 3D (m)	-304,58
Coordenada z da CA no mapa 3D (m)	9,0
Distância focal da CA (m)	0,0040
Razão metros por pixel do sensor da CA (m)	$6,38 \cdot 10^{-6}$

O programa desenvolvido em MATLAB ([MATHWORKS, 2015](#)) conta com um algoritmo principal “main\_atr.m” e um algoritmo auxiliar “pmatch.m”. O main\_atr é o algoritmo que transforma todas as informações apresentadas pelo operador em uma imagem tridimensional do relâmpago. O pmatch.m é uma função que recebe todas as informações de entrada. Então, o algoritmo principal aplica a função do algoritmo auxiliar para as sequências de pontos capturadas pelas câmeras de alta velocidade e auxiliar, coletando uma matriz de posição e uma matriz de correspondência.

Dentro do algoritmo principal chamamos as tabelas de dados de entrada da câmera de alta velocidade (ENTR) e da câmera auxiliar (ENTA). PRR e PRA (ponto de referência da câmera rápida e da câmera auxiliar) que além de serem as coordenadas do centro da imagem, também informam o ponto de referência (no caso, o para-raios). Esta variável informa as duas coisas ao mesmo tempo (informa o centro da imagem e a ponta do para-raios) como foi possível visualizar na Figura 4.5.

A variável INFO contém as informações básicas para a reconstrução do canal como: ângulos do eixo ótico e azimutal, distância focal e razão em metros por pixel do sensor e a localização (x, y, z) em metros no sistema de coordenadas para o ponto observado. O RES é o ponto de impacto do relâmpago.

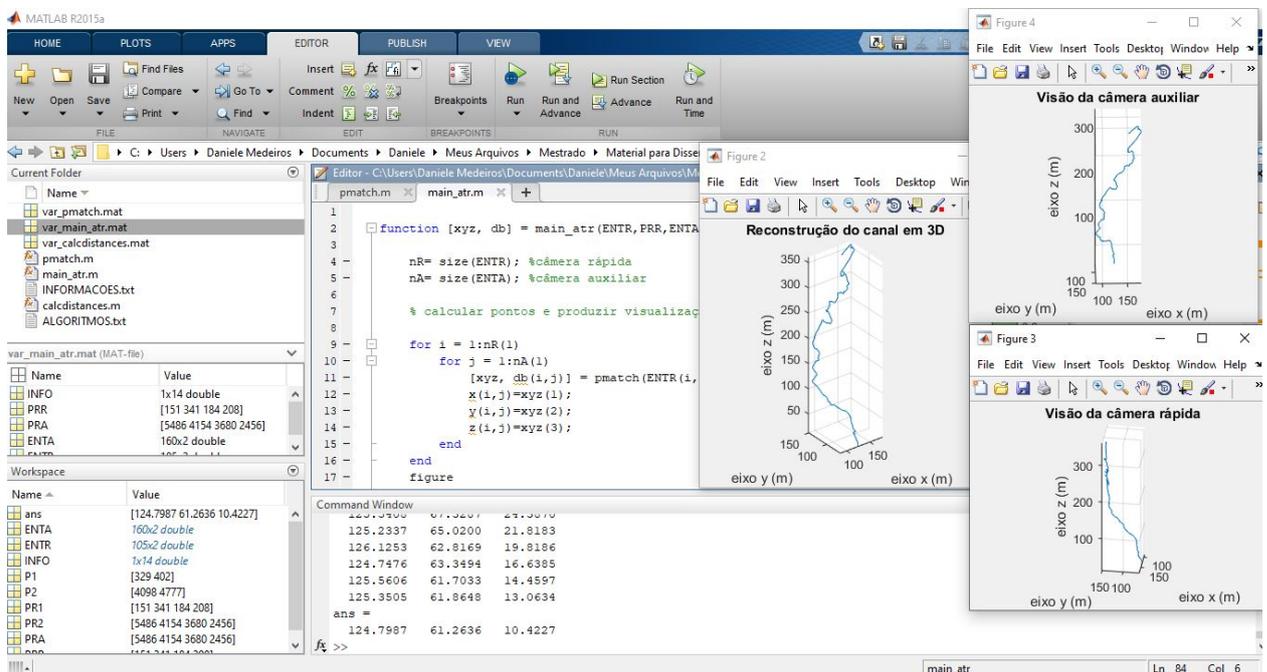
No algoritmo auxiliar, pmatch.m, é calculada a posição 3D de um mesmo ponto em comum ou o ponto de impacto, das duas imagens, como por exemplo, a ponta do para-raios. Neste algoritmo manipulamos as variáveis P1, que são as coordenadas x e y do ponto de impacto da câmera de alta velocidade, e P2, que são as coordenadas x e y do ponto de impacto da câmera auxiliar.

PR1 e PR2 são as informações das imagens (coordenadas  $X_{PR}$ ,  $Y_{PR}$  do ponto de referência e coordenadas  $x$ ,  $y$  do centro da imagem) das câmeras de alta velocidade e auxiliar, respectivamente, como usada em `main_atr.m` (PRR e PRA), assim como INFO é o mesmo usado no algoritmo principal.

Como resultado dessas informações obtemos a localização, em metros, do sistema de coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  do relâmpago. Para os casos de São Paulo e São José dos Campos essas informações serão diferentes. Isso ocorre devido à diferença do relevo e das características das câmeras utilizadas, tanto para a câmera de alta velocidade, quanto para a câmera auxiliar.

Explicando de forma sucinta, o algoritmo tem como função principal calcular as informações coletadas das câmeras e comparar os pontos em pixels das imagens, os pontos reconhecido como idênticos (pares) fazem parte da base de dados dos pontos  $x$ ,  $y$  e  $z$  para a reconstrução do canal do relâmpago em 3D. O código do algoritmo de reconstrução se encontra no Anexo A. Na Figura 4.6, apresentamos o programa Matlab.

Figura 4.6 - Representação do programa Matlab.



Fonte: Próprio autor.

## 5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados dois eventos obtidos a partir de observações para a realização da reconstrução do canal de relâmpagos em 3D. Com base na reconstrução iremos verificar a distância que o líder passa de um para-raios que emite um líder conectivo, as velocidades do canal bidimensional (2D) e tridimensional (3D) e, por fim, tentaremos verificar a direção dos líderes que produzem os raios-X.

O primeiro relâmpago selecionado produziu LANC no para-raios do prédio P3. O ponto de impacto ocorreu em um poste de energia elétrica a cerca de alguns metros dos prédios. O segundo relâmpago produziu o Raios-X detectado pelos equipamentos. Na Tabela 5.1, apresentamos as datas e horários (UT) dos eventos selecionados e na Figura 5.1 suas respectivas imagens.

Tabela 5.1 - Os primeiros eventos selecionados para a reconstrução em 3D.

		Data	Horário (UT)
SP	Evento 01	20.03.2018	19:03:53
	Evento 02	16.12.2018	18:43:37

Figura 5.1 - Representação dos relâmpagos dos Eventos 01 e 02.



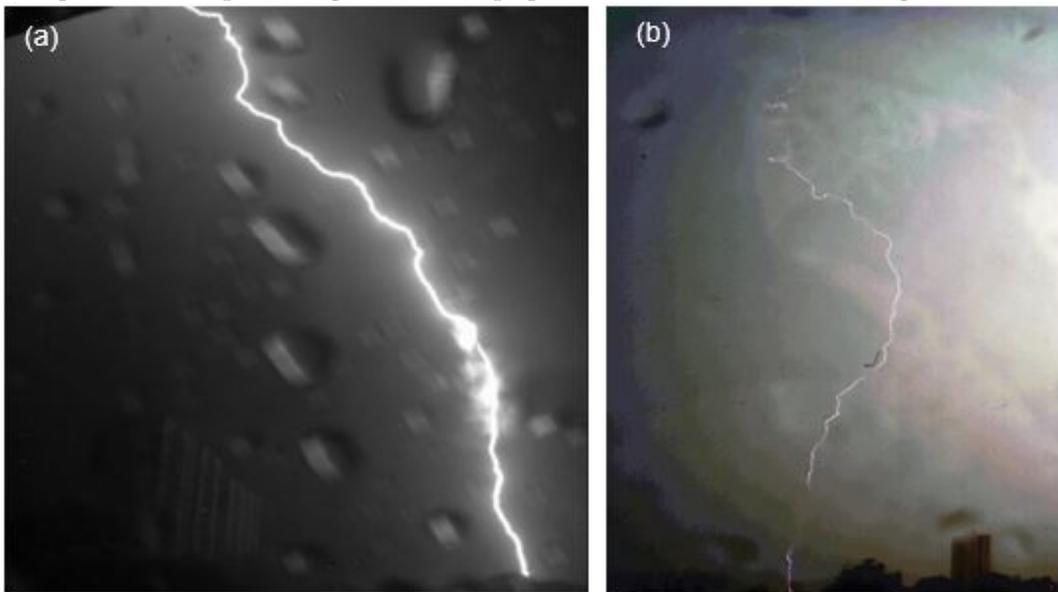
(a) Evento 01 observado pela câmera v711. (b) Evento 02 observado pela câmera v711.

Fonte: (a) ELAT (2018c). (b) ELAT (2018d).

## 5.1 Evento 01: Dia 20 de março de 2018

O primeiro evento escolhido ocorreu no dia 20 de março de 2018 às 19:03:53 (UT), em São Paulo. As imagens analisadas foram adquiridas a partir das câmeras v711 (câmera de alta velocidade) e D800 (câmera auxiliar), em diferentes pontos de observação, tornando possível a reconstrução do canal do relâmpago. Na Figura 5.2, apresentamos as imagens capturadas pelas câmeras.

Figura 5.2 - Representação do relâmpago ocorrido no dia 20 de Março de 2018.



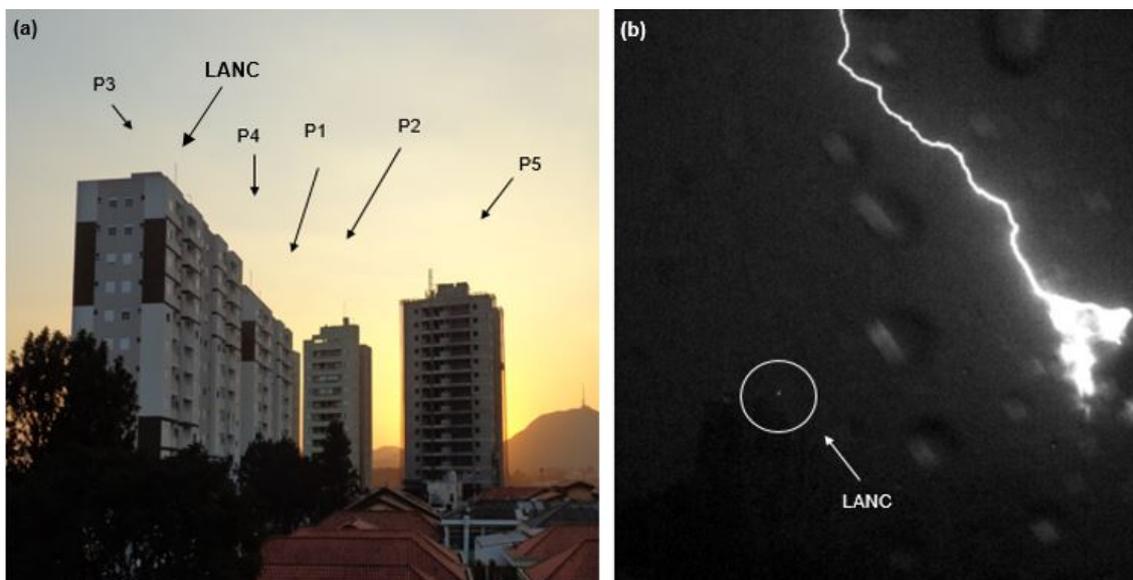
(a) Observado pela câmera v711. (b) Observado pela câmera D800 (foi realizado um tratamento na imagem para visualização do relâmpago).

Fonte: Próprio autor.

Analisando as imagens quadro a quadro, foi possível identificar que, durante a descida do líder escalonado, o para-raios do prédio P3 inicia um líder conectivo na tentativa de interceptar a descarga. Como o líder ascendente não continuou se propagando, ele se dissipou.

Quando foram instalados os equipamentos nos prédios P1 e P2 não havia nenhuma construção alta ao seu redor, o que os tornaram pontos propícios para a interceptação de relâmpagos. Com o passar dos anos, houve um aumento de prédios (P3, P4 e P5). Como podemos verificar na Figura 5.3.

Figura 5.3 - Representação das disposições dos prédios e o início do LANC no P3.



(a) Posição dos prédios e o para-raios que iniciou o LANC. (b) A foto apresenta o relâmpago ocorrido no dia 20 de Março de 2018, capturada pela câmera v711.

Fonte: Próprio autor.

O que tornou esse caso interessante e com maior probabilidade de reconstrução do canal do relâmpago em 3D foi o relâmpago ter o seu ponto de impacto dentro do ângulo de visão das câmeras. Buscando o local de impacto, descobrimos que a descarga atingiu um poste de energia elétrica que se localiza na rua Avelino Zanetti no bairro Jardim Cidade de Pirituba (SP).

Segundo o relato dos moradores, este relâmpago causou um apagão de aproximadamente cinco minutos e além do susto causado pelo estrondo, alguns moradores relataram prejuízos materiais que se encontram dispostos no Apêndice C. O fato de ter ocorrido o prejuízo nas residências mostra fragilidades no sistema de proteção das linhas de distribuição de energia e os benefícios da instalação dos SPDAs nas residências.

Como foi possível observar na Figura 5.3b, o SPDA age na tentativa de interceptar o líder que se propaga em direção ao solo. Conclui-se também que a instalação de SPDAs nos prédios e edificações mais altas, não elimina a possibilidade de um relâmpago atingir edificações mais baixas nas imediações.

A Figura 5.4 apresenta o ponto de impacto vistos de ângulos diferentes. Analisando a imagem é possível observar árvores altas próximas não impediram que o relâmpago

atingisse o poste de energia elétrica, causando prejuízos em três residências.

Figura 5.4 - Imagem do poste que sofreu o impacto.



Fonte: Adaptada do Google Maps (2019c)

Na Figura 5.5, apresentamos a imagem de satélite do local do impacto e as respectivas posições da câmera de alta velocidade, da câmera auxiliar e dos prédios P1, P2 e P3.

Figura 5.5 - Imagem de satélite com as posições dos prédios, das câmeras (Câmera 1 - v711 e Câmera 2 - D800) e do ponto de impacto.



Fonte: Adaptada do Google Maps (2019b).

Os dados de Campo elétrico e Corrente, registrados pelos sensores de campo elétrico e pela rede de detecção de descargas atmosféricas BrasilDAT. São apresentados na Tabela 5.2. A descarga que atinge o poste ocorreu na segunda descarga de retorno.

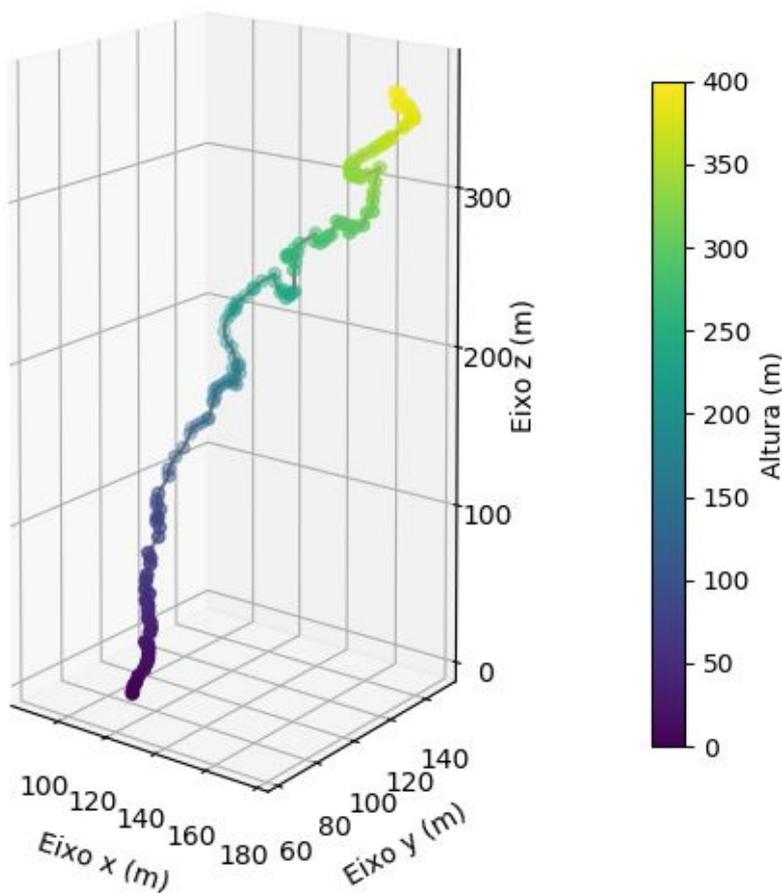
Tabela 5.2 - Dados separados após análise das imagens.

Horário (UT)	Campo Elétrico (V/m)	Corrente (kA)
19:03:53.486	486,0	-25
19:03:53.604	604,3	-19
19:03:53.688	688,9	-5
19:03:53.853	853,8	-6

### 5.1.1 Resultados do evento 01

Com base nas informações apresentadas ao longo do Capítulo 4 e a partir dos dados gerados pelo algoritmo de reconstrução, que se encontram na Tabela D.1, Apêndice D, foi possível plotar o gráfico de reconstrução do canal de relâmpagos em 3D para o Evento 01 ocorrido no dia 20 de março de 2018. Conforme apresentamos na Figura 5.6.

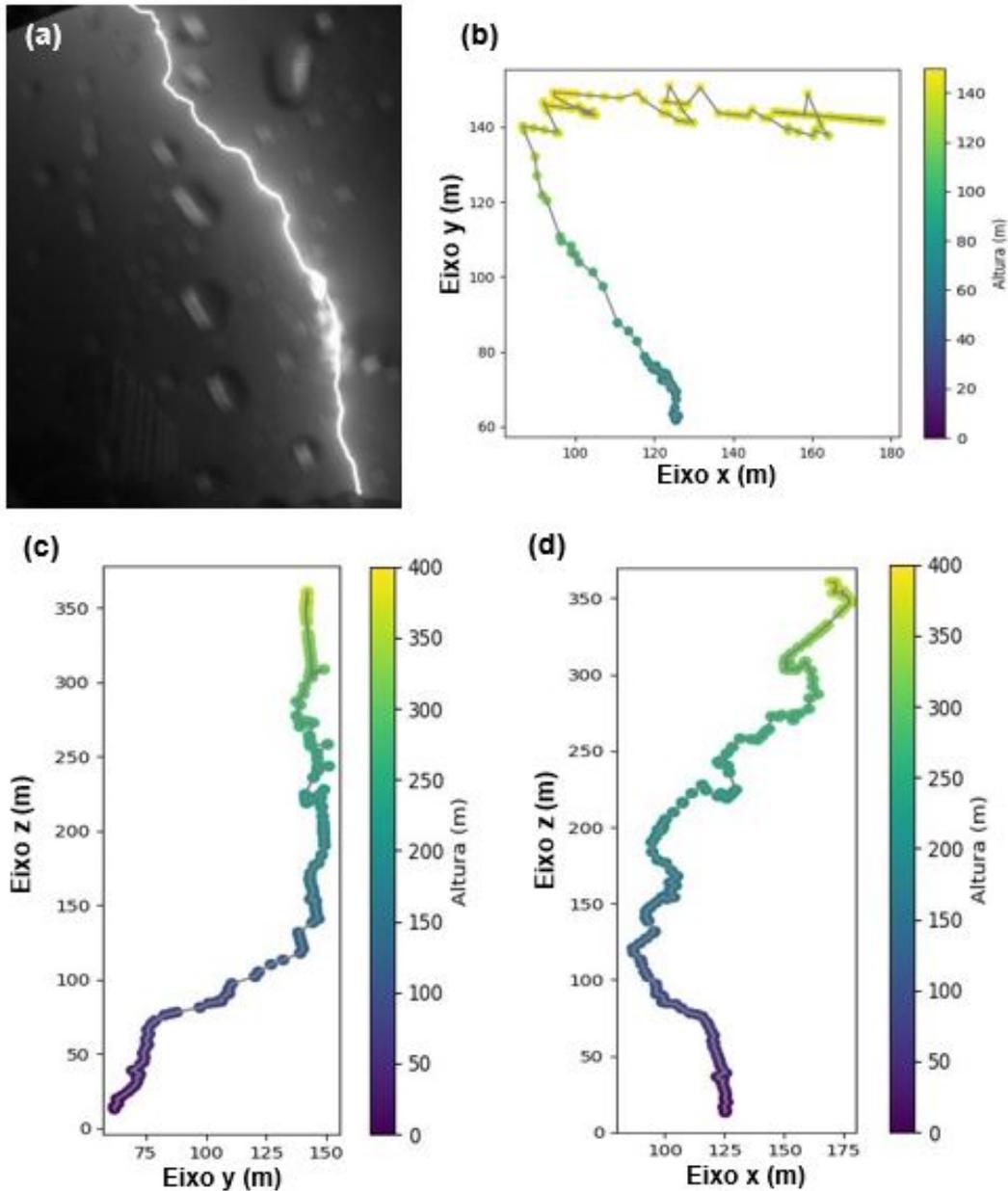
Figura 5.6 - Reconstrução do canal do relâmpago em 3D.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 5.7 são apresentados os planos de projeções dos eixos x e y, eixos x e z e eixos y e z, da representação em 3D. Podemos observar na Figura 5.7, que a propagação do relâmpago ocorre de forma tortuosa, buscando o melhor caminho até o solo.

Figura 5.7 - Representação das projeções dos eixos para a reconstrução do canal em 3D.



(a) Imagem real do relâmpago visto pela câmera v711. (b) Projeção dos eixos x e y. (c) Projeção do eixo y e z. (d) Projeção do eixo x e z.

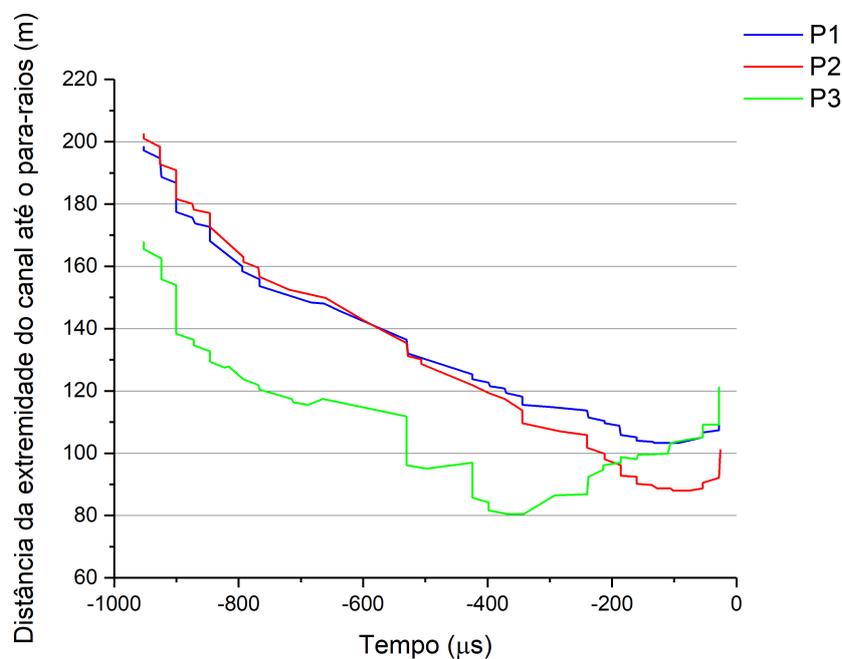
Fonte: Próprio autor.

Analisando as imagens da Figura 5.7, a projeção do eixo x e y é a vista superior do canal do relâmpago reconstruído. Na imagem é possível notar alguns pontos fora da propagação da reconstrução, isso pode ter ocorrido devido às diferenças de configurações das câmeras e lentes utilizadas, para que a reconstrução seja perfeita é sugerido que as configurações e lentes sejam as mais próximas possíveis, pois o

algoritmo foi desenvolvido para reconstruir pares de pontos reconhecidos nas duas imagens, quando não reconhece ele analisa o próximo par de pontos, dando essa descontinuidade no canal.

A Figura 5.8 apresenta a distância percorrida pela extremidade do líder escalonado passando próximo aos para-raios dos prédios P1, P2 e P3 em função do tempo. A linha vertical, na cor laranja, representa o início do LANC no prédio P3. Esse gráfico foi construído como base nos dados dos resultados apresentados pelo algoritmo que verificou a trajetória do relâmpago em relação aos para-raios dos prédios.

Figura 5.8 - O gráfico apresenta a distância da extremidade do líder escalonado à cada um dos para-raios dos prédios P1, P2 e P3 em função do tempo.



A linha vertical representa o instante que o para-raios do P3 iniciou um LANC.  
Fonte: Próprio autor.

Com base na observação do gráfico, foi possível afirmar que o líder escalonado passou mais próximo ao prédio P3 (uma distância de aproximadamente 80 metros). Isso explica a iniciação do LANC na tentativa de interceptar o líder. A conexão veio a ocorrer a uma distância de aproximadamente 85 metros adiante (distância entre o P3 e o poste medido através de imagens de satélite fornecida pelo (GOOGLE EARTH, 2020b)).

Segundo Golde (1973), a distância de atração ( $R_s$ ) é definida pela distância do líder descendente à estrutura quando ela responde ao líder descendente com o início de um líder conectivo nessa mesma estrutura. Essa distância de atração possui relação com a carga elétrica na ponta do líder que, por sua vez, está relacionado com o pico de corrente do relâmpago ao tocar o solo (GOLDE, 1973). A distância de atração no caso desta descarga de retorno seria, pela equação empírica de Love (1973) ( $R_s = a \cdot I^b$ ), igual a 69,8 metros, um valor um pouco menor do que a distância do líder ao para-raios do P3. Isso mostra que a equação de Love (1973) se aplica bem ao caso e confirma por que ela é frequentemente usada na determinação da distância de atração.

Na Figura 5.9, apresentamos a reconstrução num ambiente 3D, em escala, do local que ocorreu o Evento 01 com a utilização do programa Blender (BLENDER, 2020). O ambiente tridimensional da região, com o formato real dos prédios foi desenvolvido em cooperação com Ricardo Soares (SOARES, 2018). Essa ferramenta tornou possível analisar o relâmpago por um ângulo diferente da posição das câmeras. A partir da representação podemos visualizar a posição da câmera v711, do prédio P3 e do ponto de impacto do relâmpago.

Figura 5.9 - Representação do relâmpago visto por outro ângulo.

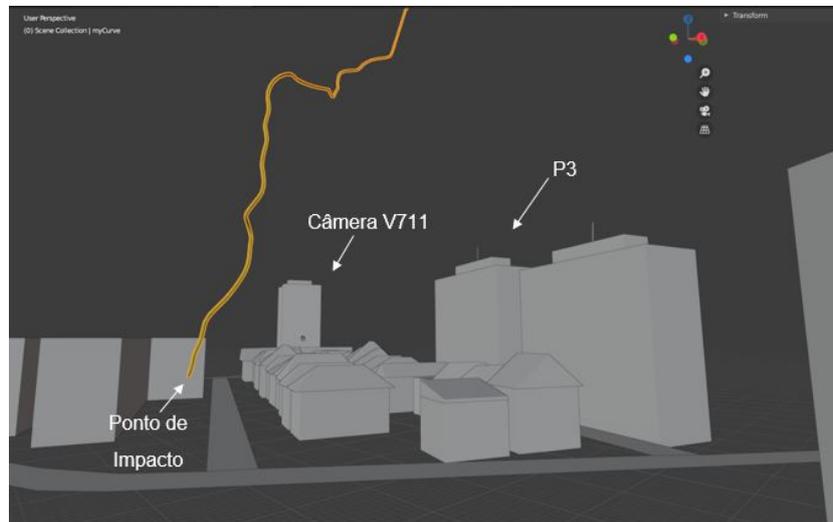


Figura elaborada em colaboração com Ricardo Soares.  
Fonte: Próprio autor.

Para realizar a medição da altura do LANC no P3, foi empregado o próprio software da Phantom (PCC). Utilizando a altura conhecida dos andares do prédio P2 para

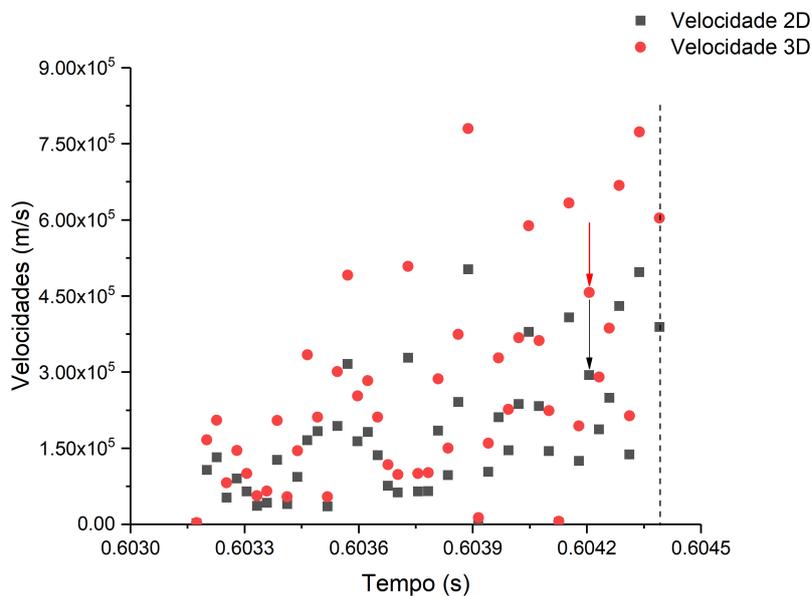
calibrar a imagem encontramos o número de pixels por metro e aplicamos a essa proporcionalidade para calcular a altura do LANC, resultando em uma altura de aproximadamente 90 centímetros.

Dadas as coordenadas de dois pontos da imagem em pixel podemos calcular a distância entre eles através do teorema de Pitágoras. Aplicamos um coeficiente de conversão para mudar a unidade de pixel para metro da distância de cada trecho de propagação do relâmpago, quadro a quadro. Portanto, conhecido o deslocamento e o intervalo de tempo em cada quadro, podemos calcular a velocidade média da propagação de relâmpagos.

Para realizar os cálculos e plotar os gráficos, utilizamos um programa de planilhas de cálculos. Os dados completos foram dispostos na Tabela E.1 que se encontra no Apêndice E que apresentam as velocidades bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) em função do tempo até o ponto de impacto.

Baseado nos dados apresentados na Tabela E.1, construímos o gráfico das velocidades médias 2D e 3D em função do tempo, como podemos visualizar na Figura 5.10.

Figura 5.10 - Representação das velocidades médias 2D e 3D em função do tempo.



O ponto destacado com uma seta no gráfico representa o instante que apareceu o LANC no para-raios do P3.

Fonte: Próprio autor.

Podemos observar na Figura 5.10 que LANC surgiu na ponta do para-raios no tempo 0,604206 s e velocidade média do relâmpago 3D até o ponto de impacto (poste de energia elétrica) foi de  $6,27 \cdot 10^5$  m/s (velocidade média de conexão entre o líder escalonado e o líder ascendente conectivo). A linha tracejada representa o instante ( $t = 0,604391$  s) do ponto de impacto.

Também é possível notar que a velocidade média em função do tempo não se apresenta de forma linear, porém, é possível notar que, conforme o relâmpago se propaga em direção ao solo ocorre um aumento da velocidade.

Na Tabela 5.3 apresentamos as características 2D e 3D do relâmpago com o comprimento e a velocidades médias. Para calcular essa velocidade média de propagação do relâmpago, subtraímos o comprimento final pelo inicial e o tempo final pelo inicial. Comparando a velocidade média do relâmpago em 3D ( $2,8 \cdot 10^5$  m/s) com a velocidade média do relâmpago em 2D ( $1,8 \cdot 10^5$  m/s). Verificamos que a relação entre as velocidades é um valor médio de 1,55.

Tabela 5.3 - Características do relâmpago em 2D e 3D.

Horário (UT)	Razão vel.	Característica 2D		Característica 3D	
		Comprimento (m)	Velocidade média (m/s)	Comprimento (m)	Velocidade média (m/s)
19:03:53.604	1,55	$223,9 \pm 9$	$1,8 \cdot 10^5 \pm 2 \cdot 10^4$	$347,6 \pm 14$	$2,8 \cdot 10^5 \pm 3 \cdot 10^4$

De acordo com Uman (2001) e Petrov et al. (2003), a tortuosidade do canal não depende dos objetos no solo até que esteja a uma distância de atração da estrutura ou do para-raios. Embora o para-raios do P3 tenha iniciado um líder conectivo, o campo elétrico não foi grande o suficiente para que o líder conectivo avançasse até interceptar o líder descendente. Na Figura 5.11 apresentamos a vista superior da trajetória do relâmpago até o ponto de impacto.

Analisando a Figura 5.11, foi possível verificar que o relâmpago poderia ter seu ponto de impacto em qualquer ponto dentro da circunferência com um raio de 105,8 metros aproximadamente (esse raio foi calculado a partir do instante que o relâmpago aparece na imagem, traçamos uma circunferência cobrindo todo o relâmpago, dentro desse raio de 105,8 metros, o relâmpago poderia ter o seu ponto de impacto em qualquer outra estrutura ou objeto dentro deste raio).

Figura 5.11 - Vista superior da trajetória do relâmpago até o ponto de impacto.

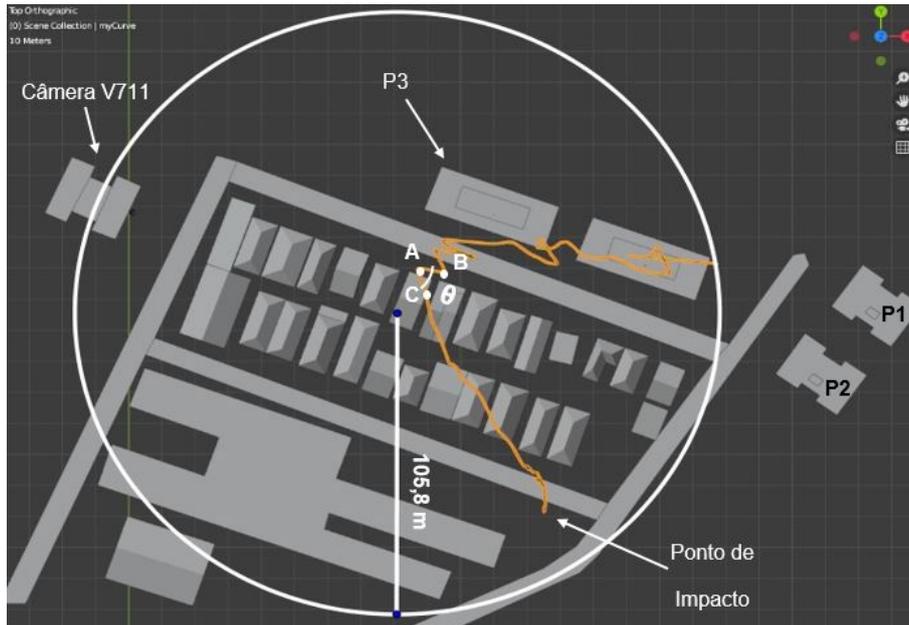


Figura elaborada em colaboração com Ricardo Soares.  
Fonte: Próprio autor.

Para encontramos o ângulo na Figura 5.12, selecionamos os pontos A(86.68, 140.3, 120.8), B(95.67, 138.4, 131.8) e C(89.8, 132, 113.2) que correspondem aos pontos das coordenadas (x,y,z) em metros. Calculamos os vetores  $\overline{AB} = (8.99, -1.9, 11)$  e  $\overline{AC} = (3.12, -8.3, -7.6)$ , substituindo os resultados na Equação 5.1 (WINTERLE; STEINBRUCH, 2000), encontramos o ângulo.

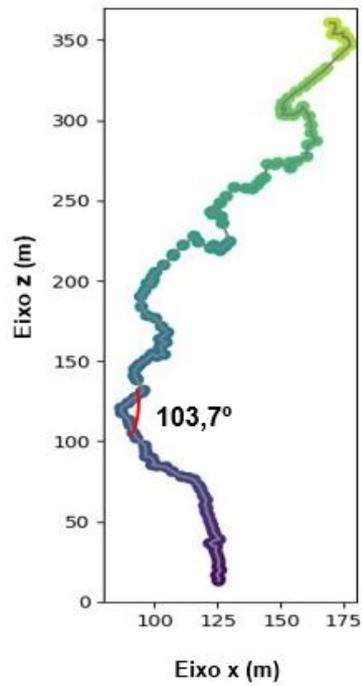
$$\cos(\theta) = \frac{\overline{AB} \cdot \overline{AC}}{|\overline{AB}| \cdot |\overline{AC}|} \quad (5.1)$$

$$\cos = \frac{(8.99, -1.9, 11) \cdot (3.12, -8.3, -7.6)}{\sqrt{80.82 + 3.61 + 121} \cdot \sqrt{9.73 + 68.89 + 57.76}}$$

$$\theta = \arccos \frac{-39.78}{167.38} = 103.7^\circ$$

Na Figura 5.12 podemos observar uma mudança de trajetória com um ângulo de  $103,7^\circ$ . Inicialmente, podemos considerar que o ângulo é muito grande, porém, é possível que o ângulo esteja correto, pois existe uma mudança de trajetória com um ângulo de abertura elevado.

Figura 5.12 - Representação do ângulo onde observamos uma mudança de trajetória da Figura 5.12



Fonte: Próprio autor.

Analisando as imagens, observamos que o LANC iniciou no para-raios no mesmo instante em que ocorreu a mudança de trajetória do relâmpago.

## 5.2 Evento 02: Dia 16 de dezembro de 2018

O Evento 02 ocorreu no dia 16 de dezembro de 2018 às 18:43:37 (UT), em São Paulo. As imagens analisadas foram adquiridas a partir das câmeras H8R (câmera auxiliar) e a câmera Sony (câmera auxiliar). Na Figura 5.13, apresentamos as imagens capturadas pelas câmeras.

Figura 5.13 - As fotos apresentam o relâmpago ocorrido no dia 16 de dezembro de 2018.

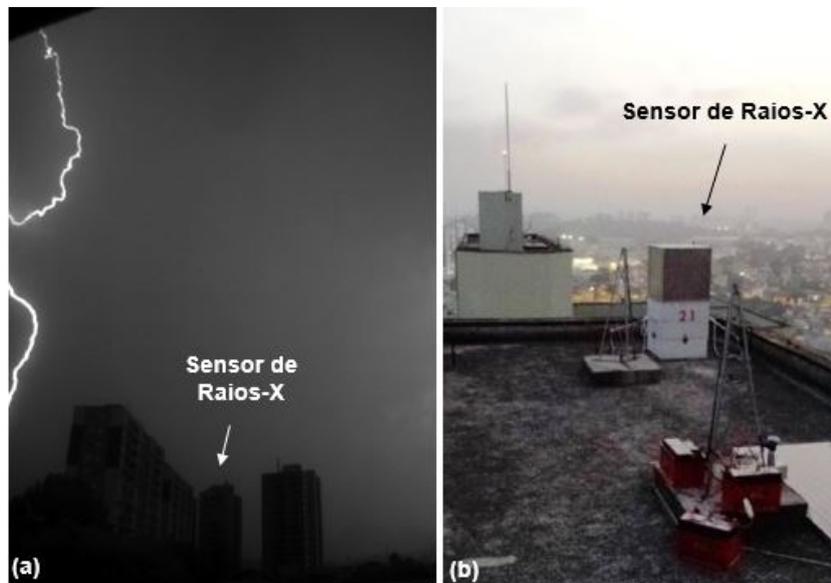


(a) Observado pela câmera H8R. (b) Observado pela câmera Sony.

Fonte: Próprio autor.

Durante a tempestade, o sensor de raios-X, instalado no prédio P2, detectou pela primeira vez no Brasil raios-X produzidos por relâmpagos. Este relâmpago gerou sete descargas de retorno, as três primeiras descargas seguiram caminhos diferentes e somente a partir da quarta descarga que ele segue o mesmo caminho até um determinado ponto, mas se ramifica para um novo canal, produzindo um novo caminho que as descargas subsequentes seguiriam. O sensor de raios-X detectou as partículas de alta energia na quinta descarga de retorno, que um pico de corrente mais alto (-38 kA) (SABA et al., 2019). Na Figura 5.14 apresentamos o posicionamento do sensor de raios-X.

Figura 5.14 - As fotos apresentam o relâmpago ocorrido no dia 16 de dezembro de 2018 (observado pela câmera v711) e o posicionamento do sensor de raios-X.



Fonte: (a) Próprio autor. (b) ELAT (2019b).

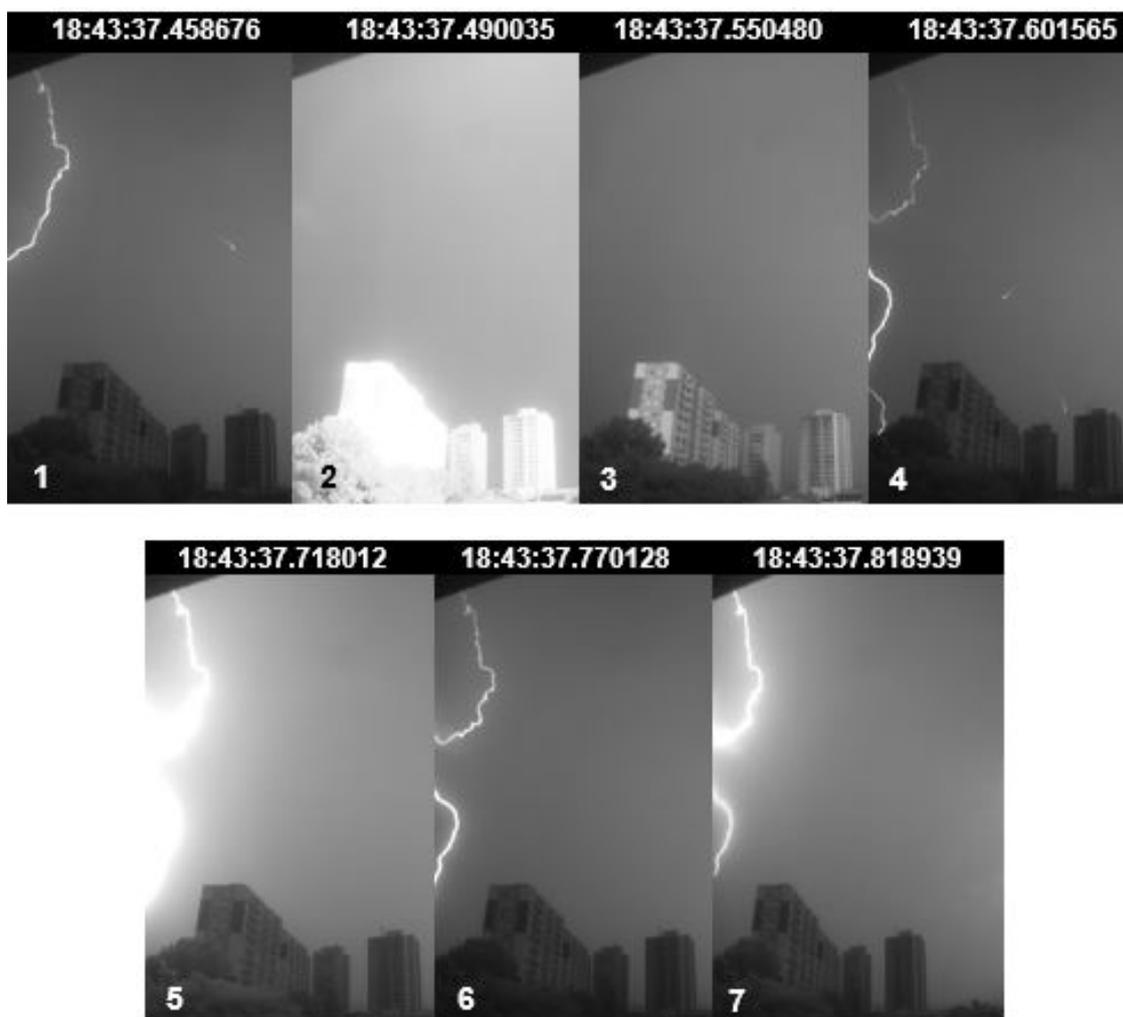
Os dados de pico de corrente para cada descarga de retorno registrado pela rede de detecção de descargas atmosféricas BrasilDAT encontram-se dispostos na Tabela 5.4. Além disso, através da análise de vídeo coletamos os horários que ocorreram as descargas de retorno e calculamos o intervalo de tempo entre eles.

Tabela 5.4 - Dados separados após análise das imagens.

Descarga	Horário (UT)	Tempo (ms)	Corrente (kA)
1	18:43:37.458,730	-	-19
2	18:43:37.490,040	31,310	-18
3	18:43:37.550,480	60,440	-12
4	18:43:37.601,615	51,135	-6
5	18:43:37.718,070	116,455	-38
6	18:43:37.770,178	52,108	-6
7	18:43:37.818,990	48,812	-12

Na Figura 5.15, observamos a sequência de imagens capturadas pela câmera v711, onde é possível visualizar o canal do relâmpago para as 7 descargas de retorno, conforme apresentado na Tabela 5.4.

Figura 5.15 - Sequência das descargas de retorno.



Fonte: Próprio autor.

Analisando a sequência das imagens apresentadas na Figura 5.15, na Figura 5.15(1) é possível observar a primeira descarga de retorno que obteve um pico de corrente de  $-19\text{kA}$ . O canal do relâmpago fica ionizado e as descargas subsequentes, podem ou não, reutilizar o mesmo canal para se propagar novamente em direção ao solo. A seguir, nas Figuras 5.15(2) e 5.15(3), o relâmpago não segue o mesmo canal, na Figura é possível visualizar apenas o clarão, as descargas atingiram os picos de corrente de  $-18\text{ kA}$  e  $-12\text{ kA}$ , respectivamente. A partir da Figura 5.15(4), a descarga de retorno se propaga por um novo canal, atingindo um pico de corrente de  $-6\text{ kA}$ . Na Figura 5.15(5), a descarga reaproveita o canal ionizado pela 4ª descarga de retorno até um certo ponto e muda de direção próximo ao solo. Essa descarga atingiu um pico de corrente de  $-38\text{ kA}$ , o mais alto valor atingido, na Figura podemos verificar que o canal do relâmpago é muito brilhante, sendo impossível visualizar com clareza

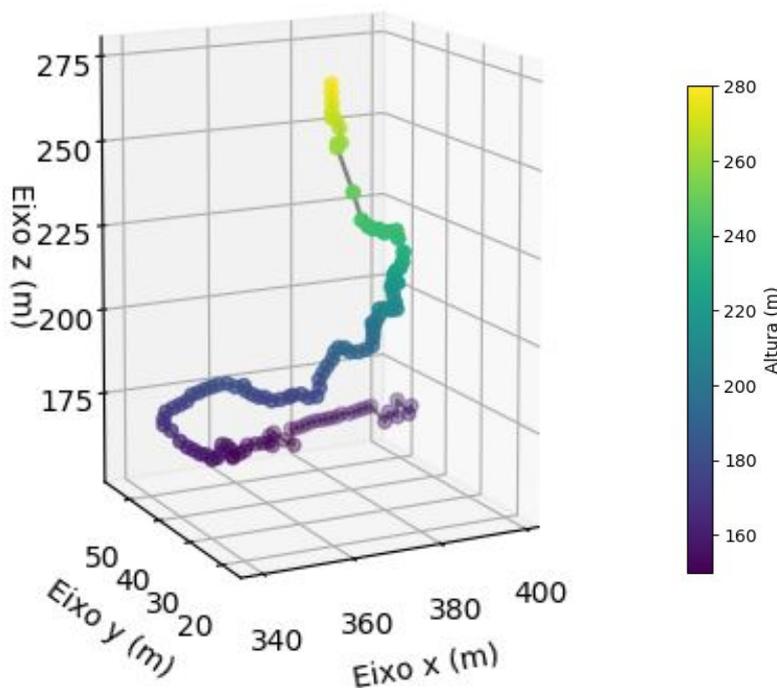
todo o canal. A partir da quinta descarga de retorno, o relâmpago reaproveita todo o canal anteriormente ionizado, como podemos observar nas Figuras 5.15(6) e 5.15(7), com um pico de corrente de -6 kA e -12 kA.

Considerando todas as descargas de retorno, a quinta descarga de retorno é a única que atingiu um alto valor de pico de corrente e apresentou o canal mais iluminado, sendo assim, verificamos que para que ocorra a produção de raios-X oriundos de relâmpagos, é necessário que as descargas de retorno possuam tais características, como descrito nos trabalhos de Cooray et al. (2010) e Saba et al. (2019).

### 5.2.1 Resultados do Evento 02

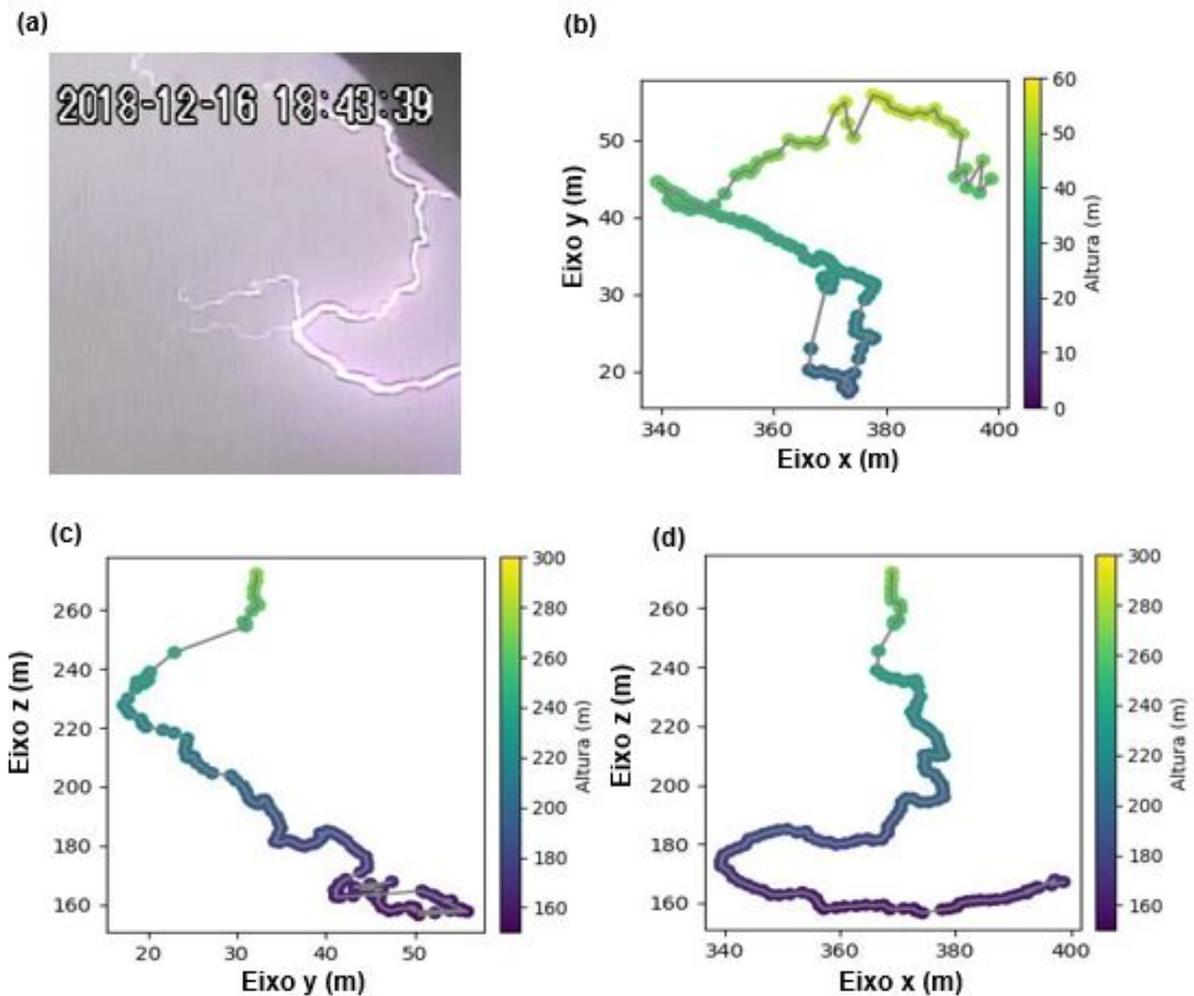
Com base nas informações apresentadas ao longo do Capítulo 4, foi possível realizar a reconstrução do canal em 3D para o Evento 02. Não foi possível realizar a reconstrução do canal até o solo, pois somente a câmera H8R capturou todo o canal do relâmpago, porém, a reconstrução do canal ocorreu até um instante que inclui a detecção de raios-X (Figura 5.16).

Figura 5.16 - Reconstrução do canal do relâmpago em 3D.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.17 - Representação das projeções nos eixos para a reconstrução do canal em 3D.



(a) Imagem real do relâmpago visto pela câmera Sony. (b) Projeção dos eixos x e y. (c) Projeção do eixo y e z. (d) Projeção do eixo x e z.  
Fonte: Próprio autor.

Analisando as imagens da Figura 5.17a projeção do eixo x e y é a vista superior do canal do relâmpago reconstruído. Na imagem é possível notar pontos que se apresentam de forma descontínua no eixo y e numa altura entre 45 e 50 metros, isso se deve à utilização de duas câmeras com diferentes configurações e lentes.

Além disso, na Figura 5.17, foi possível observar um trecho do relâmpago que se apresenta como uma reta direcionada para o prédio P2 (local que está instalado o sensor de raios-X). Na Figura 5.18a podemos observar uma vista superior da posição dos prédios e da projeção nos eixos x e y.

Figura 5.18 - Vista superior da trajetória do relâmpago.

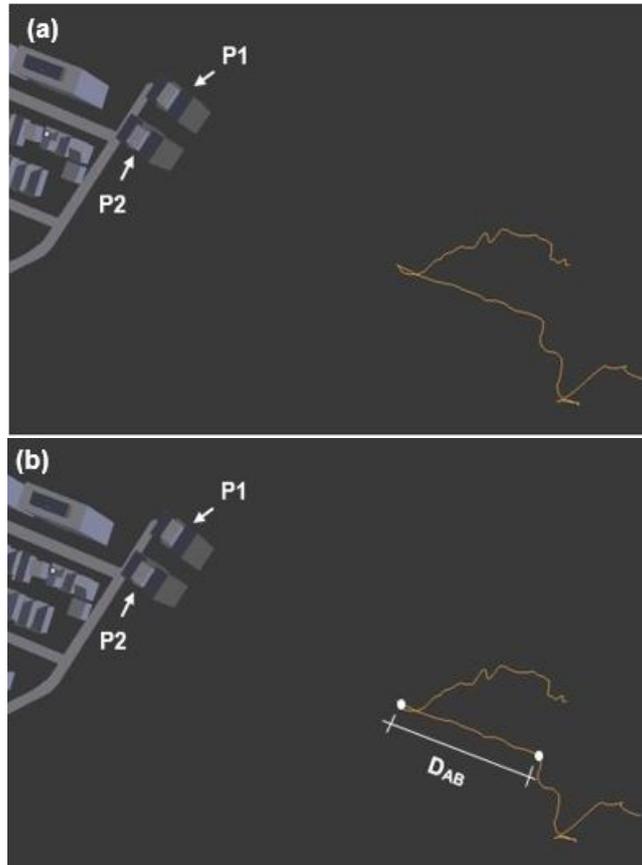


Figura elaborada em colaboração com Ricardo Soares.  
Fonte: Próprio autor.

Para verificar a distância que o relâmpago percorreu em direção ao prédio P2, Figura 5.18b, coletamos os pontos A(339,4, 44,32, 174) e B(370,2, 33,22, 191,8), que correspondem aos pontos das coordenadas (x, y, z) em metros. Substituindo os pontos na Equação 5.2, encontramos a distância de 37,3 metros.

$$D_{AB} = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2} \quad (5.2)$$

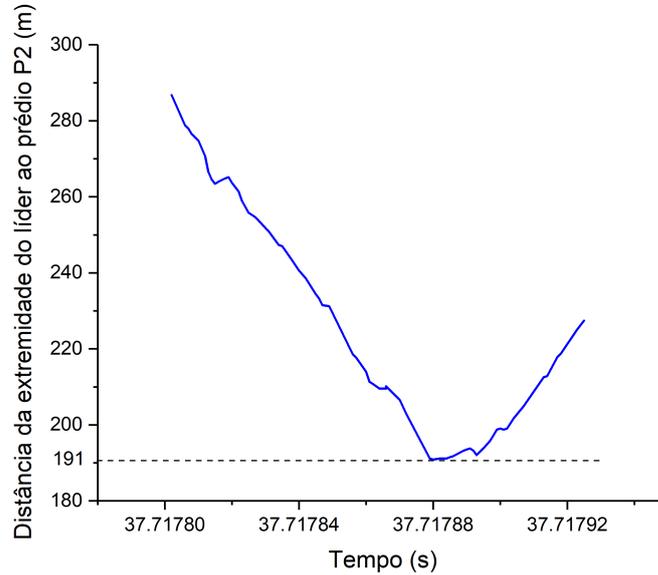
$$D_{AB} = \sqrt{(370,2 - 339,4)^2 + (33,22 - 44,32)^2 + (191,8 - 174)^2}$$

$$D_{AB} \simeq 37,3m$$

Encontramos também, a distância (em 3D) que o líder passou do para-raios do prédio P2 em função do tempo, Figura 5.19. O gráfico foi construído com base nos dados dos resultados do algoritmo que verificou a trajetória do relâmpago em relação aos para-raios dos prédios. Neste gráfico, encontramos a menor distância

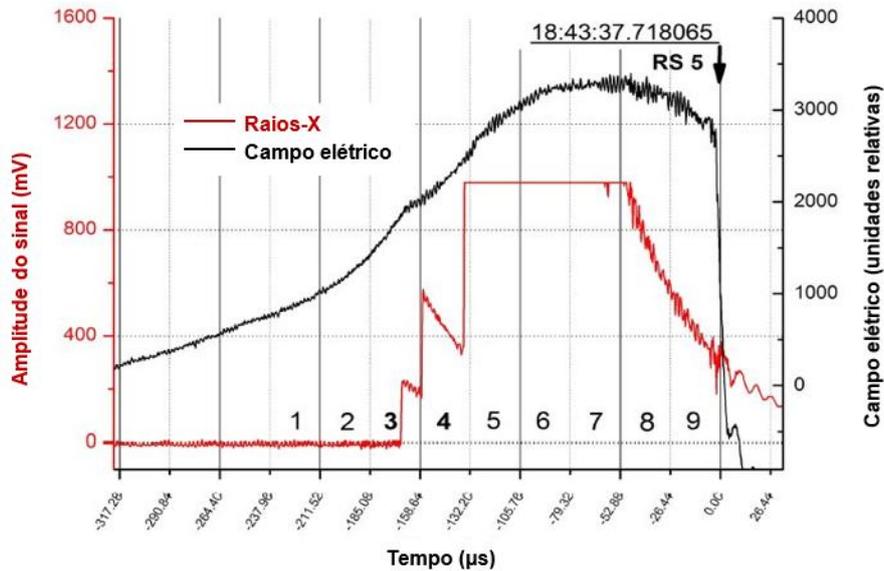
(191metros  $\pm$  30metros) no tempo de 37,717880 segundos.

Figura 5.19 - Distância da extremidade do líder ao prédio P2.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.20 - Medições de campo elétrico e raios-X para o Evento 02.



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

Como podemos observar na Figura 5.20, o sensor de raios-X iniciou a detecção 169  $\mu$ s antes da quinta descarga de retorno. Sabendo que a quinta descarga de retorno ocorreu em 37,718065 segundos, o início da detecção de raios-X ocorreu em 37,717896

segundos. Já o instante em que o líder estava mais próximo do sensor de raios-X (ocorreu em 37,717880 segundos), ou seja, há uma diferença de  $16 \mu s$  em relação ao momento de maior proximidade ao sensor. No intervalo de tempo de  $16 \mu s$ , o líder, com a velocidade encontrada de  $2,88 \cdot 10^6$  (ver Figura 5.22 e Apêndice E) percorre uma distância de  $47 \text{ metros} \pm 7 \text{ metros}$ . Essa distância é compatível ao erro obtido no método utilizado para o segundo evento (como exposto a seguir).

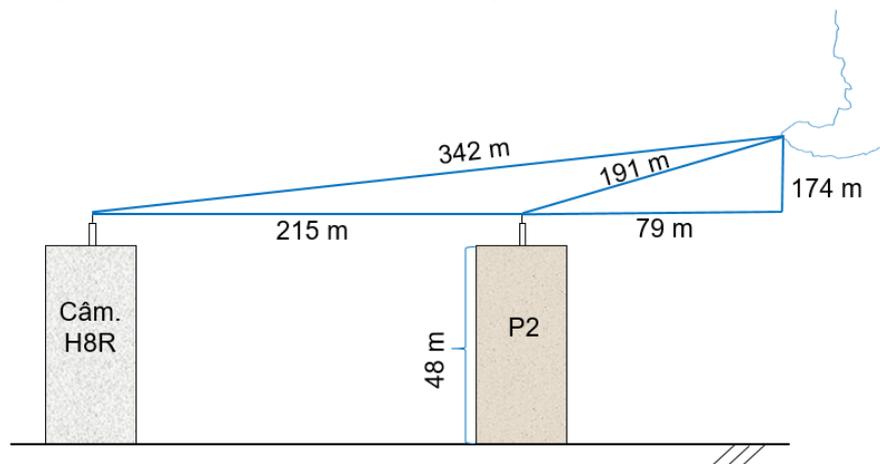
Considerando as distâncias entre o prédio P2, a câmera H8R e o canal do relâmpago reconstruído, podemos estimar o erro em nossas medidas. Para isso, conhecendo as distâncias apresentadas na Figura 5.21, podemos calcular a distância que o som percorreu até chegar na câmera H8R.

$$a = \sqrt{294^2 + 174^2} \quad (5.3)$$

$$a \cong 342 \text{ m} \pm 10 \text{ m}$$

Conforme apresentamos na Figura 5.19, podemos observar que a menor distância entre a extremidade do líder ao para-raios do prédio P2 foi de 191 metros, o que resulta em uma distância de 342 metros do líder à câmera H8R que registrou o som do trovão.

Figura 5.21 - Representação das distâncias entre os prédios e o relâmpago calculadas a partir dos resultados da reconstrução do canal.



Fonte: Próprio autor.

Para comprovar se o método de reconstrução do canal em 3D é válido para o Evento 02, podemos verificar se as distâncias dadas pela reconstrução do canal são confir-

madras pelas distâncias obtidas através da análise do som do relâmpago.

A gravação do som foi feita através da câmera H8R. O início da onda sonora do trovão corresponde ao trecho do canal que se encontra mais próximo da câmera. Como a velocidade do som depende da temperatura, a presença de umidade no ar pode aumentar a velocidade do som, mas o efeito é bem menor que o da temperatura (BOHN, 1987). Sendo a temperatura durante o evento de, aproximadamente, 27,9°C (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET, 2018), podemos calcular a velocidade do som a partir da Equação 5.4 (PHYSICS LIBRETEXTS., 2020).

$$V_{Som} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = 331,2 \cdot \sqrt{\frac{301,5}{273,15}} \cong 348m/s \quad (5.4)$$

onde  $\gamma = 1,4$  (constante empírica das moléculas diatômicas),  $M = 0,02897$  kg/mol (massa molar do ar),  $R = 8,31$  J/mol.K (constante Rydberg dos gases ideais) e  $T = 301,5$  K (temperatura em Kelvin).

Como a velocidade da luz é maior que a velocidade do som, primeiro vemos o relâmpago e depois ouvimos o som do trovão. Através da análise do vídeo da câmera H8R, é possível verificar o intervalo entre o relâmpago e o som do trovão que é de 0,90 segundos, desta forma, podemos calcular a distância que ocorreu o relâmpago. O cálculo pode ser realizado através da Equação 5.5.

$$d = V_{Som} \cdot t \quad (5.5)$$

$$d = 348 \cdot 0,90 \cong 313 \pm 10m$$

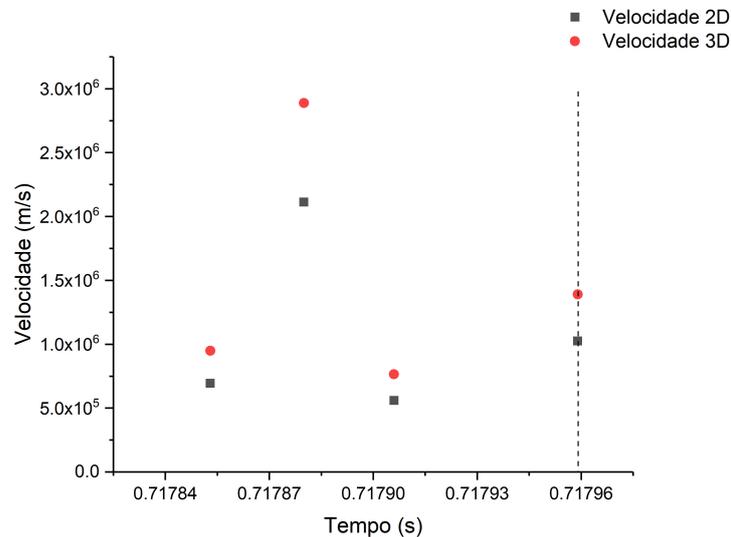
onde  $V_{Som}$  é a velocidade do som,  $d$  é a distância que ocorreu o relâmpago e  $t$  é o tempo que o som demorou pra chegar até a câmera H8R. Portanto, através do cálculo realizado, o relâmpago ocorreu a aproximadamente 313 metros de distância da câmera.

Comparando os resultados encontrados através da análise dos dados a partir da reconstrução do canal, com os dados obtidos através dos cálculos realizados, considerando a temperatura, a velocidade do som, o tempo de duração do som e da distância de propagação do som até a câmera H8R, encontramos uma diferença de 30 metros, estimando um erro de aproximadamente  $\pm 10$  metros.

Além de calcular a distância que o som percorreu até a câmera H8R, adquirimos o deslocamento e o tempo de propagação do relâmpago (esses dados foram selecionados até o momento que o relâmpago deixa de ser visualizado pela câmera Sony). Os dados completos das velocidades bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) em função do tempo estão dispostos na Tabela E.2, Apêndice E.

Para calcular a velocidade média ( $V_m$ ) (variação do deslocamento em relação ao tempo) do relâmpago em 2D e 3D, analisamos, quadro a quadro do vídeo, para obter a variação do deslocamento e do tempo. Com base nos dados apresentados na Tabela E.2, construímos o gráfico das velocidades 2D e 3D em função do tempo, como podemos visualizar na Figura 5.22.

Figura 5.22 - Representação das velocidades 2D e 3D em função do tempo.



A linha tracejada corresponde ao momento que a imagem do relâmpago desaparece para a câmera Sony.

Fonte: Próprio autor.

O resultado apresenta um número pequeno de dados, pois não foi possível visualizar todo o canal do relâmpago durante a sua propagação, sendo observados apenas 4 quadros.

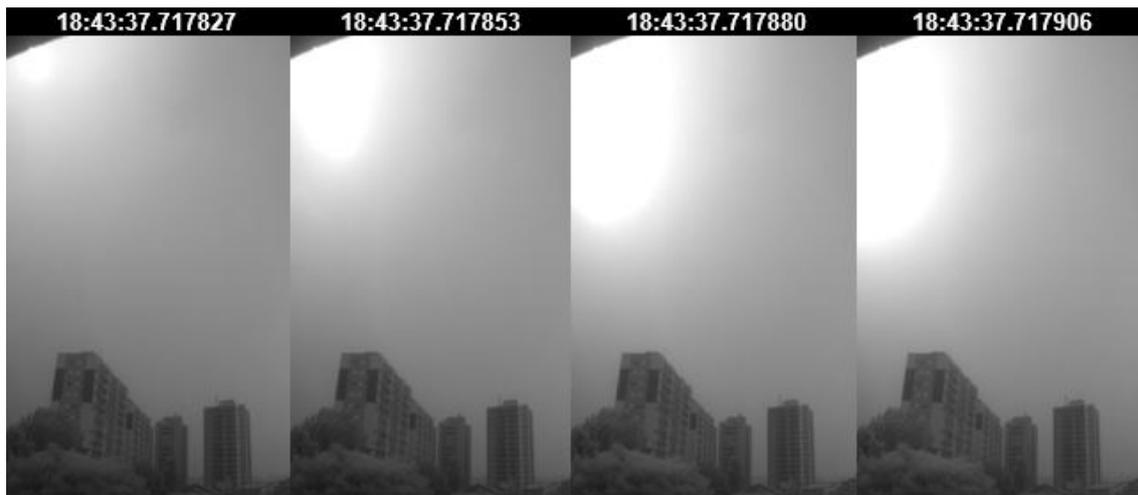
Na Tabela 5.5 apresentamos as características 2D e 3D do relâmpago com os comprimentos e as velocidades médias. Comparando a velocidade média do relâmpago em 3D ( $1,6 \cdot 10^6$  m/s) com a velocidade média do relâmpago em 2D ( $1,2 \cdot 10^6$  m/s), verificamos que a relação entre as velocidades é igual ao valor médio de 1,36.

Tabela 5.5 - Características do relâmpago em 2D e 3D.

Horário (UT)	Característica 2D			Característica 3D	
	Razão vel.	Comprimento (m)	Velocidade média (m/s)	Comprimento (m)	Velocidade média (m/s)
18:43:37.717	1,36	$199,5 \pm 25$	$1,2 \cdot 10^6 \pm 3,5 \cdot 10^5$	$272,7 \pm 35$	$1,6 \cdot 10^6 \pm 4,8 \cdot 10^5$

O que dificultou a coleta de dados foi a grande luminosidade do líder, conforme apresentamos na Figura 5.23. Como já dissemos anteriormente, esse evento apresentou um pico de corrente de -38 kA. Segundo Kodali et al. (2005), o pico de corrente está relacionado à densidade de carga do líder, sendo assim, quanto maior a carga, maior será a corrente, e mais luminoso será o líder.

Figura 5.23 - Os quadros apresentam a luminosidade do líder durante a quinta descarga de retorno.



Fonte: Próprio autor.

Saba et al. (2019), concluíram em seus estudos que um líder carregado intensamente pode produzir um campo elétrico alto o suficiente para que inicie o processo de produção de raios-X e, de acordo com os estudos de Cooray et al. (2010), um campo elétrico presente na ponta do líder contínuo é capaz de produzir radiação de alta energia (raios-X).

## 6 CONCLUSÕES

Para estudar a física envolvida durante a propagação dos líderes de relâmpagos utilizamos uma modelagem computacional para a reconstrução do canal de relâmpagos em 3D a partir de imagens produzidas por câmeras.

Trabalhos anteriores que analisaram a aproximação de líderes provocando a iniciação de LANCs em estruturas e torres, fizeram através de imagens em 2D. O presente trabalho permitiu, pela primeira vez no mundo, identificar a distância real (em 3D) necessária para que o líder descendente iniciasse, no para-raios de um prédio residencial, um líder conectivo. Além disso, observamos que o LANC iniciou no para-raios no mesmo instante em que ocorreu a mudança de trajetória do relâmpago.

No primeiro evento analisado pudemos validar o método de reconstrução em 3D através da observação das imagens e a partir da pesquisa de campo. A pesquisa de campo tornou-se necessária devido a não identificação visual do ponto de impacto através das imagens. Durante a pesquisa, verificamos que o ponto de impacto do relâmpago foi um poste de energia elétrica que alimentava três domicílios que tiveram vários danos materiais confirmados pelos moradores, como apresentado no Apêndice C. Encontrou-se um erro de apenas 13 metros entre o ponto de impacto dado pelo método de reconstrução e o encontrado pela pesquisa de campo.

O estudo confirma a estimativa empírica usada por [Love \(1973\)](#) para calcular a distância de atração. No nosso caso, analisamos a segunda descarga de retorno que atingiu o poste de energia, essa descarga atingiu um pico de corrente de 19 kA, com um raio de atração de 69,8 metros, isso explica o porquê o líder conectivo não conseguiu interceptar o líder descendente.

Estudos anteriores afirmaram que relâmpagos produzem raios-X, porém, ainda não se encontra esclarecido porque alguns relâmpagos produzem raios-X e outros não. E dentre os relâmpagos que produzem raios-X, ainda não se tem conhecimento em qual etapa do processo de formação de relâmpagos ocorre a produção de raios-X. Há estudos que apresentam que o líder deve estar direcionado para o sensor para que ocorra a detecção de partículas de raios-X, outros que o líder ser intenso. O trabalho de [Saba et al. \(2019\)](#), apresentou o primeiro registro de detecção de raios-X no Brasil, neste trabalho sugerem que o raios-X acontece quando o líder está direcionado para o sensor.

O presente trabalho, realizou a análise em 3D deste caso relatado por [Saba et al.](#)

(2019) e mostrou: (a) a que distância o líder se encontrava do sensor de raios-X e, (b) que o líder se propagou por aproximadamente 37 metros em direção ao sensor. Esse resultado confirma a hipótese de Saba et al. (2019), de que o líder estaria se propagando em direção ao sensor quando houve a detecção de raios-X.

De fato, podemos confirmar através das análises e da reconstrução do canal em 3D que o líder estava se propagando em direção do sensor, encontramos que há um erro de 16 microssegundos do momento exato que ocorreu o raios-X e foi detectado pelo sensor. A partir desse erro uma nova hipótese foi considerada, pois, no momento que o raios-X é mais intenso, o canal do relâmpago sofreu uma curvatura muito acentuada, implicando num aumento da aceleração, que pode ter causado a produção de raios-X.

Para validar o método de reconstrução no segundo evento, utilizamos cálculos auxiliares como o de propagação do som. Através dos cálculos encontramos a distância real entre a extremidade do líder e a câmera H8R de 313 metros, com um erro de aproximadamente  $\pm 10$  metros. Comparando com os resultados com base no algoritmo, encontramos uma diferença de 30 metros, sendo um valor dentro do esperado, levando em conta que as medidas de distâncias entre os prédios foram obtidas através de imagens de satélites.

É importante ressaltar que os resultados deste trabalho evidenciam a dificuldade de observação de emissões de raios-X de relâmpagos naturais. Além da direcionalidade do canal, vimos que foi necessária uma descarga entre -12 e -38 kA, a aproximadamente 300 metros de distância do sensor, para sensibilizá-lo. Com apenas um caso é difícil traçar um paralelo entre distância e pico de corrente mínimos necessários para sensibilizar um sensor de raios-X, porém, estes dados podem ser referência para futuras campanhas de observação.

Além disso, apresentamos os cálculos para as velocidades 2D e 3D, onde apresentamos que a velocidade 3D é maior que a 2D e, a razão entre elas é de 1,55, para o Evento 01, e de 1,36 para o Evento 02. Apresentamos também, as alturas referentes aos canais em 2D e 3D, como apresentados nas Tabelas 5.3 e 5.5.

Sugerimos para trabalhos futuros, novas observações para verificar a hipótese levantada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5419: proteção contra descargas atmosféricas - parte 1**. Rio de Janeiro, 2015.

67 p. 18

BALLAROTTI, M. G.; MEDEIROS, C.; SABA, M. M.; 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. D6, 2012. 1

BLENDER. **Programa para criação 3D**. 2020. Disponível em:

<<https://www.blender.org/>>. Acesso em: 15 jun. 2020. 57

BOHN, D. A. Environmental effects on the speed of sound. **Journal of the Audio Engineering Society**, v. 36, p. 223–231, 1987. 70

CAMPOS, L. Z.; SABA, M. M.; WARNER, T. A.; PINTO, O.; KRIDER, E. P.; ORVILLE, R. E. High-speed video observations of natural cloud-to-ground lightning leaders—a statistical analysis. **Atmospheric Research**, v. 135, p. 285–305, 2014. 8

CAMPOS, L. Z. S. **On the mechanisms that lead to multiple ground contacts in lightning**. 248 p. Thesis (Doctorate in Space Geophysics) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP, 2016. 8, 9

CARDOSO, I.; PINTO, O.; PINTO, I.; HOLLE, R. Lightning casualty demographics in brazil and their implications for safety rules. **Atmospheric Research**, v. 135, p. 374–379, 2014. 1

CCST/INPE. **ELAT (BrasilDat)**. 2018. Disponível em:

<<http://www.ccst.inpe.br/projetos/brasildat/>>. Acesso em: 19 fev. 2020. 36

COORAY, V. **Lightning protection**. [S.l.]: The Institution of Engineering and Technology, 2009. 19

\_\_\_\_\_. **An introduction to lightning**. [S.l.]: Springer, 2015. 1, 5, 6, 7, 19

COORAY, V.; DWYER, J.; RAKOV, V.; RAHMAN, M. On the mechanism of x-ray production by dart leaders of lightning flashes. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 72, n. 11-12, p. 848–855, 2010. 65, 72

- COTTON, W. R.; ANTHES, R. A. **Storm and cloud dynamics**. [S.l.]: Academic press, 1992. 5
- CUADROS, E. T. **Fotografia do sensor de raios-X**. [S.l.: s.n.], 2019. 17
- DWYER, J. R. et al. Energetic radiation produced during rocket-triggered lightning. **Science**, v. 299, n. 5607, p. 694–697, 2003. 1, 16
- \_\_\_\_\_. Measurements of x-ray emission from rocket-triggered lightning. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 5, 2004. 1, 16
- \_\_\_\_\_. X-ray bursts associated with leader steps in cloud-to-ground lightning. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 1, 2005. 1, 16
- DWYER, J. R.; SCHAAL, M.; RASSOUL, H. K.; UMAN, M. A.; JORDAN, D. M.; HILL, D. High-speed x-ray images of triggered lightning dart leaders. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 116, n. D20, 2011. 1, 16
- DWYER, J. R.; SMITH, D. M.; CUMMER, S. A. High-energy atmospheric physics: terrestrial gamma-ray flashes and related phenomena. **Space Science Reviews**, v. 173, n. 1-4, p. 133–196, 2012. 16
- DWYER, J. R.; UMAN, M. A. The physics of lightning. **Physics Reports**, v. 534, n. 4, 2014. 1
- ECANTECH SISTEMAS. **Projetos INPE**. 2019–2020. Disponível em: <<https://ecantech.com.br/projetos-inpe>>. Acesso em: 29 set. 2020. 34
- EKEN. **Câmera H8R Plus**. 2020. Disponível em: <[https://www.eken.com/preview\\_pdf/show.html?file=H8R\\_Plus.pdf](https://www.eken.com/preview_pdf/show.html?file=H8R_Plus.pdf)>. Acesso em: 28 ago. 2020. 33
- FERRAZ, E. C. **Medidas de corrente contínua em raios nuvem-solo negativos naturais no Brasil: Desenvolvimento de instrumentação e primeiros resultados**. 133 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP, 2009. 37
- FERRO, M.; SABA, M.; PINTO, O. Continuing current in multiple channel cloud-to-ground lightning. **Atmospheric Research**, v. 91, n. 2-4, p. 399–403, 2009. 1

GAO, Y.; LU, W.; MA, Y.; CHEN, L.; ZHANG, Y.; YAN, X.; ZHANG, Y. Three-dimensional propagation characteristics of the upward connecting leaders in six negative tall-object flashes in guangzhou. **Atmospheric Research**, v. 149, p. 193–203, 2014. 2, 12, 13, 14, 15

GIN, R.; BIANCHI, R.; ANTOLINI, F. Study of lightning channel through 3d reconstruction images: a case study. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, 15., 2014. Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2014. 2, 12, 13

GOLDE, R. H. **Lightning protection**. [S.l.: s.n.], 1973. 19, 20, 57

GOOGLE EARTH. **A imagem de satélite apresentam os pontos de instalação das câmeras com suas respectivas indicações de quantidades**. 2020. São José dos Campos. 1 imagem de satélite. Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>. Acesso em: 04 jan. 2020. 26, 41, 42, 93, 94, 95, 96

\_\_\_\_\_. **Medição entre o prédio P3 e o ponto de impacto do relâmpago**. 2020. São José dos Campos. 2 imagem de satélite. Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>. Acesso em: 04 jan. 2020. 56

GOOGLE MAPS. **A imagem de satélite apresentam os pontos e as distâncias entre os prédios estudados e as câmeras**. 2019. São Paulo. 1 imagem de satélite. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/preview.>>. Acesso em: 15 jun. 2019. 23

\_\_\_\_\_. **Imagem de satélite com as posições dos prédios, das câmeras e do ponto de impacto**. 2019. São Paulo. 4 imagem de satélite. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/preview.>>. Acesso em: 15 jun. 2019. 53

\_\_\_\_\_. **Imagem do poste que sofreu o impacto visto por dois ângulos diferentes**. 2019. São Paulo. 3 imagem de satélite. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/preview.>>. Acesso em: 15 jun. 2019. 52, 97

\_\_\_\_\_. **Representação dos sistemas de coordenadas**. 2019. São Paulo. 2 imagem de satélite. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/preview.>>. Acesso em: 15 jun. 2019. 40

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 2019. São José dos Campos. 2 imagem de satélite. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/preview.>>. Acesso em: 15 jun. 2019. 42

- HARTLEY, R.; ZISSERMAN, A. **Multiple view geometry in computer vision**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003. 13
- HEBER, M.; RUTHER, M.; BISCHOF, H.; PACK, S. Photogrammetric 3d reconstruction of lightning discharges. In: **ANNUAL WORKSHOP OF THE AUSTRIAN ASSOCIATION FOR PATTERN RECOGNITION, 32., 2008, Linz, Austria. Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2008. 2, 12
- HEIDLER, F. H.; MANHARDT, M.; STIMPER, K. The slow-varying electric field of negative upward lightning initiated by the peissenberg tower, germany. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 55, n. 2, p. 353–361, 2012. 1
- HETTIARACHCHI, P.; COORAY, V.; DIENDORFER, G.; PICHLER, H.; DWYER, J.; RAHMAN, M. X-ray observations at gaisberg tower. **Atmosphere**, v. 9, n. 1, p. 20, 2018. 1, 16
- HILL, R. Analysis of irregular paths of lightning channels. **Journal of Geophysical Research**, v. 73, n. 6, p. 1897–1906, 1968. 16
- HOFFERT, H. Xv. intermittent lightning-flashes. **Journal of Science**, v. 28, n. 171, p. 106–109, 1889. 11
- HOUZE, R. A. J. Mesoscale convective systems. **Reviews of Geophysics**, v. 42, n. 4, 2004. 5
- HOUZE, R. A. J.; RUTLEDGE, S. A.; BIGGERSTAFF, M.; SMULL, B. Interpretation of doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale convective systems. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 70, n. 6, p. 608–619, 1989. 5
- HOWARD, J.; UMAN, M. A.; BIAGI, C.; HILL, D.; JERAULD, J.; RAKOV, V. A.; DWYER, J.; SALEH, Z.; RASSOUL, H. Rf and x-ray source locations during the lightning attachment process. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115, n. D6, 2010. 1, 16
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS - IEEE. **Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Substations**. [S.l.]: IEEE, 1996. 19
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Estação: São Paulo(Mirante de Santana) (83781)**. 2018. Disponível em:

<<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/83781>>. Acesso em: 08 set. 2020. 70

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA - INPE/ELAT,. **Foto de um relâmpago atingindo o para-raios do prédio P1 em São Paulo.** São José dos Campos, 2015. 12

\_\_\_\_\_. **As fotos apresentam as imagens dos prédios na posição 1 e 2 das câmeras.** São José dos Campos, 2018. 24

\_\_\_\_\_. **Edifício residencial escolhido inicialmente para estudo P1 e P2 (esquerda) e a situação atual com os prédios P3, P4 e P5 (direita).** São José dos Campos, 2018. 23, 36

\_\_\_\_\_. **Evento 01 observado pela câmera v711.** São José dos Campos, 2018. 49

\_\_\_\_\_. **Evento 02 observado pela câmera v711.** São José dos Campos, 2018. 49

\_\_\_\_\_. **Imagem gerada pela câmera H8R.** São José dos Campos, 2018. 33

\_\_\_\_\_. **Imagem gerada pela câmera v711.** São José dos Campos, 2018. 29

\_\_\_\_\_. **Os prédios P1P2 e ao fundo o Pico do Jaraguá.** São José dos Campos, 2018. 21

\_\_\_\_\_. **Imagem gerada pela câmera D800.** São José dos Campos, 2019. 32

\_\_\_\_\_. **Posicionamento do sensor de raios-X no topo do prédio P2.** São José dos Campos, 2019. 63

\_\_\_\_\_. **Relâmpago nuvem-solo positivo.** São José dos Campos, 2019. 8

\_\_\_\_\_. **Tipos de relâmpagos.** São José dos Campos, 2019. 7

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA - INPE/ELAT. **Vítimas de raios.** São José dos Campos, 2019. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/noticias/vitimas.de.raios.-.infografico.php>>. Acesso em: 08 dez. 2020. 1, 18

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA - INPE/ELAT,. **Relâmpago nuvem-solo negativo**. São José dos Campos, 2020. 8

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

KODALI, V.; RAKOV, V.; UMAN, M.; RAMBO, K.; SCHNETZER, G.; SCHOENE, J.; JERAULD, J. Triggered-lightning properties inferred from measured currents and very close electric fields. **Atmospheric Research**, v. 76, n. 1-4, p. 355–376, 2005. 72

KREHBIEL, P. R. The electrical structure of thunderstorms. In: MAXWELL, A. E. (Ed.). **The Earth's electrical environment**. Washington: National Academy Press: [s.n.], 1986. p. 90–113. 5, 6

LARSEN, A. **Photographing lightning with a moving camera**. [S.l.]: Smithsonian Institution, 1905. 119–27 p. 11

LIU, Y.-C. J. **A feasibility study on the three-dimensional reconstruction of high voltage and lightning discharge channels using digital images**. 133 p. Dissertation (Master of Science in Engineering.) — University of Witwatersrand, Johannesburg, 2012. 2, 12, 13

LOVE, E. R. **Improvement on lightning stroke modelling and applications to design of ehv and uhv transmission lines**. Thesis (M. Sc.) — University of Colorado, Boulder, 1973. 20, 57, 73

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: Atmospheres**, v. 117, n. D19, 2012. 2, 12

LU, W.; GAO, Y.; CHEN, L.; QI, Q.; MA, Y.; ZHANG, Y.; CHEN, S.; YAN, X.; CHEN, C.; ZHANG, Y. Three-dimensional propagation characteristics of the leaders in the attachment process of a downward negative lightning flash. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 136, p. 23–30, 2015. 1

MALLICK, S.; RAKOV, V.; DWYER, J. R. A study of x-ray emissions from thunderstorms with emphasis on subsequent strokes in natural lightning. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 117, n. D16, 2012. 1, 16

- MATHWORKS. **MATLAB R2015a [Computer software]**. [S.l.]: Author Natick, MA, 2015. 47
- MAZUR, V. A physical model of lightning initiation on aircraft in thunderstorms. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 94, n. D3, p. 3326–3340, 1989. 7
- MCCARTHY, M.; PARKS, G. Further observations of x-rays inside thunderstorms. **Geophysical Research Letters**, v. 12, n. 6, p. 393–396, 1985. 16
- MOORE, C. B.; EACK, K. B.; AULICH, G. D.; RISON, W. Energetic radiation associated with lightning stepped-leaders. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 11, p. 2141–2144, 2001. 1, 16
- NACCARATO, K. P. **Redes de detecção de descargas atmosféricas - BrasilDAT**. 2020. [comunicação pessoal]. em 22 abr. 2020. 37
- NIKON. **D800**. 2020. Disponível em: <[https://www.nikon.pt/pt\\_PT/product/discontinued/digital-cameras/2014/d800#overview](https://www.nikon.pt/pt_PT/product/discontinued/digital-cameras/2014/d800#overview)>. Acesso em: 28 mar. 2020. 32
- ORVILLE, R. E.; IDONE, V. P. Lightning leader characteristics in the thunderstorm research international program (trip). **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 87, n. C13, p. 11177–11192, 1982. 8
- PAIVA, A. R. d. **Estudo dos líderes positivos em descargas atmosféricas**. 91 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP, 2020. 20
- PARKS, G.; MAUK, B.; SPIGER, R.; CHIN, J. X-ray enhancements detected during thunderstorm and lightning activities. **Geophysical Research Letters**, v. 8, n. 11, p. 1176–1179, 1981. 16
- PETROV, N.; PETROVA, G.; D’ALESSANDRO, F. Quantification of the probability of lightning strikes to structures using a fractal approach. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 10, n. 4, p. 641–654, 2003. 59
- PHANTOM. **Phantom camera hardware user manual**. 2018. Disponível em: <<https://phantomhighspeed-service.force.com/servlet/servlet.FileDownload?file=00P1N00000dSu7aUAC&oid=00D1N000002Br2EUAS>>. Acesso em: 12 fev. 2020. 29

\_\_\_\_\_. **PCC Software**. 2020. Disponível em:

<<https://www.phantomhighspeed.com/resourcesandsupport/phantomresources/pccsoftware>>. Acesso em: 12 fev. 2020. 44

\_\_\_\_\_. **Ultrahigh-speed v2012**. 2020. Disponível em: <<https://www.phantomhighspeed.com/products/cameras/ultrahighspeed/v2012>>.

Acesso em: 12 fev. 2020. 30

PHYSICS LIBRETEXTS. **Speed of sound**. 2020. Disponível em:

<[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University\\_Physics/Book%3A\\_University\\_Physics\\_\(OpenStax\)/Map%3A\\_University\\_Physics\\_I\\_-\\_Mechanics\\_Sound\\_Oscillations\\_and\\_Waves\\_\(OpenStax\)/17%3A\\_Sound/17.03%3A\\_Speed\\_of\\_Sound](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/University_Physics/Book%3A_University_Physics_(OpenStax)/Map%3A_University_Physics_I_-_Mechanics_Sound_Oscillations_and_Waves_(OpenStax)/17%3A_Sound/17.03%3A_Speed_of_Sound)>. Acesso em: 10 aug. 2020. 70

PINTO, O. **A arte da guerra contra os raios**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2005. 1

PINTO, O.; PINTO, I. R. C. de A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE., 2000. 200 p. 5, 7

PINTO, O. J.; PINTO, I. R. de A. **Relâmpagos**. [S.l.]: Brasiliense, 2008. 1, 5

RAKOV, V. A. Lightning discharge and fundamentals of lightning protection.

**Journal of Lightning Research**, v. 4, n. 1, p. 3–11, 2012. 1

\_\_\_\_\_. **Fundamentals of lightning**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2016. 6, 7, 8, 9

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: physics and effects**. [S.l.]:

Cambridge University Press, 2003. 1, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12

SABA, M.; BALLAROTTI, M.; PINTO, O. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. **Journal of Geophysical**

**Research: Atmospheres**, v. 111, n. D3, 2006. 1, 8

SABA, M.; PAIVA, A.; SCHUMANN, C.; FERRO, M.; NACCARATO, K.; SILVA, J.; SIQUEIRA, F.; CUSTÓDIO, D. Lightning attachment process to common buildings. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 9, p. 4368–4375, 2017. 18, 22

SABA, M. M. A física das tempestades e dos raios. **Física na Escola**, v. 2, n. 1, p. 19–22, 2001. 7

SABA, M. M.; FERRO, M. A.; CUADROS, E. T.; CUSTODIO, D. M.; NAG, A.; SCHUMANN, C.; COORAY, G. V.; PAIVA, A.; LAURIA, P. B.; MEDEIROS, D.; HETTIARACHCHI, P.; RASSOUL, H. K. High-speed video observation of a lightning flash producing x-rays. **AGUFM**, v. 2019, p. AE33A–3117, 2019. [1](#), [16](#), [17](#), [62](#), [65](#), [68](#), [72](#), [73](#), [74](#)

SABA, M. M.; SCHULZ, W.; CAMPOS, L. Z. M components or cloud-to-ground subsequent strokes? In: **INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 21., 2010, Austria. Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2010. p. 19–20. [8](#)

SALEH, Z.; DWYER, J.; HOWARD, J.; UMAN, M.; BAKHTIARI, M.; CONCHA, D.; STAPLETON, M.; HILL, D.; BIAGI, C.; RASSOUL, H. Properties of the x-ray emission from rocket-triggered lightning as measured by the thunderstorm energetic radiation array (tera). **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, n. D17, 2009. [1](#), [16](#)

SANTOS, A. P. P. **Eventos extremos de descargas atmosféricas no estado de São Paulo: Casos observados e cenários futuros**. 193 p. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP, 2017. [1](#)

SCHAAL, M. M. et al. The structure of x-ray emissions from triggered lightning leaders measured by a pinhole-type x-ray camera. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, n. 2, p. 982–1002, 2014. [1](#), [16](#)

SCHONLAND, B. **The flight of thunderbolts**. [S.l.]: Clarendon Press, 1964. [8](#)

SCHONLAND, B. F. J. Progressive lightning iv-the discharge mechanism. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A-Mathematical and Physical Sciences**, v. 164, n. 916, p. 132–150, 1938. [8](#), [9](#)

SCHONLAND, B. F. J.; COLLENS, H. Progressive lightning. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character**, v. 143, n. 850, p. 654–674, 1934. [11](#), [12](#)

SCHROEDER, M. A. d. O. **Modelo eletromagnético para descontaminação de ondas de corrente de descargas atmosféricas: aplicação às medições da estação do morro do cachimbo**. 158 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001. [19](#)

- SILVA, C. A.; CAMPOS, G. L.; SANTOS, M. G. dos; NOBREGA, R. V. T. da; OLIVEIRA, M. L. R. Análise conceitual de linhas de transmissão operando em regime permanente senoidal. **ForScience**, v. 4, n. 2, 2016. 9
- SILVA, I. d. F. T.; FREITAS, A. **Noções básicas de cartografia**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE., 1998. 200 p. 41
- SIMXER. **Como a Distância Focal Afeta o Que (e Como) Você Vê**. 2017. Disponível em: <<https://fotodicasbrasil.com.br/como-a-distancia-focal-afeta-o-que-e-como-voce-ve/>>. Acesso em: 10 aug. 2020. 34
- SIQUEIRA, F. V. C. **A corrente elétrica e o processo de conexão dos raios com estruturas no solo**. [S.l.: s.n.], 2018. 41
- SOARES, R. M. B. **Reconstrução do canal do relâmpago em 3D com a utilização do Programa Blender**. [S.l.: s.n.], 2018. 57
- STARK, G. **X-ray**. 2020. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/X-ray>>. Acesso em: 10 jul. 2020. 15
- SUNEARTHTOOLS.COM. **Distância**. 2009–2020. Disponível em: <<https://www.sunearthtools.com/pt/tools/distance.php>>. Acesso em: 08 jan. 2019. 39, 41
- UMAN, M. A. **The lightning discharge**. [S.l.]: Courier Corporation, 2001. 59
- VISACRO, S. **Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia**. [S.l.]: Artliber, 2005. 19
- VIVID PLANET. **Google Maps encontrar coordenadas facilmente**. 2020. Disponível em: <<https://www.mapcoordinates.net/pt>>. Acesso em: 08 jan. 2019. 39, 41
- WALTER, B. Ein photographischer apparat zur genaueren analyse des blitzes. **Physikalische Zeitschrift**, v. 3, p. 168, 1902. 11
- \_\_\_\_\_. Über die entstehungsweise des blitzes. **Annalen der Physik**, v. 315, n. 2, p. 393–407, 1903. 11
- \_\_\_\_\_. Ueber doppelenaufnahmen von blitzten. **Jahrbuch der Hamburgischen Wissenschaftlichen Anstalten.**, v. 27, p. 81, 1909. 11

\_\_\_\_\_. Stereoscopische blitzaufnahmen. **Physikalische Zeitschrift****Z**, v. 13, p. 1082–84, 1912. 11

\_\_\_\_\_. Über die ermittelung der zeitlichen aufeinanderfolge zusammengehoriger blitze sowie ubere in bemerkenswertes beispiel dieser art von entladungen. **Physikalische Zeitschrift**, v. 19, p. 273–9, 1918. 11

WEBER, L. **Über blitzphotographieen**. [S.l.]: Reimer, 1889. 11

WILLIAMS, E. R. The tripole structure of thunderstorms. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 94, n. D11, p. 13151–13167, 1989. 5, 6, 8

\_\_\_\_\_. Problems in lightning physics—the role of polarity asymmetry. **Plasma Sources Science and Technology**, v. 15, n. 2, p. S91, 2006. 8

WILSON, C. T. R. The acceleration of  $\beta$ -particles in strong electric fields such as those of thunderclouds. **Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society**, Cambridge University Press, v. 22, n. 4, p. 534–538, 1925. 15

WINTERLE, P.; STEINBRUCH, A. **Geometria analítica**. [S.l.]: Makron Books, São Paulo, 2000. 60



## APÊNDICE A - LOCAL DE INSTALAÇÃO DAS CÂMERAS

- São Paulo

Figura A.1 - Posição das câmeras 1 (Benny).



Fonte: Arquivo do banco de dados do grupo.

Figura A.2 - Posição das câmeras 2 (Banfruty).



Fonte: Arquivo do banco de dados do grupo.

- São José dos Campos

Figura A.3 - Instalação das câmeras MV1 e v9.1, no terraço do prédio do CEA 2, posicionada para as duas estruturas.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.4 - Instalação da câmera v9.1, no terraço do prédio do LIT, posicionada para o topo da caixa d'água.



Fonte: Próprio autor.

Figura A.5 - Instalação da câmera MV2, no terraço da casinha de iluminação, próximo ao campo da ADC, posicionada para as duas estruturas.



Fonte: Próprio autor.



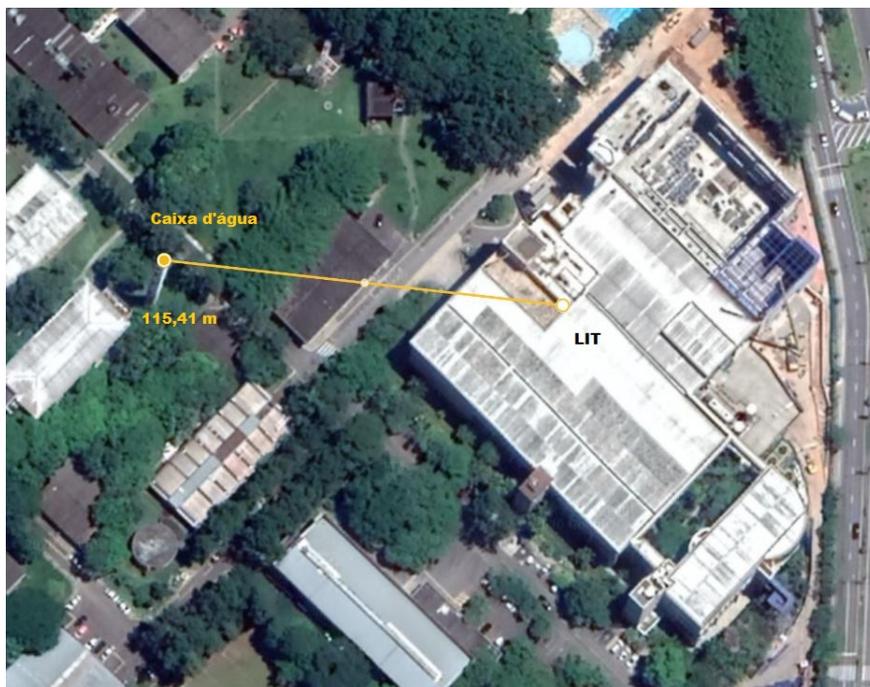
## APÊNDICE B - DISTÂNCIA ENTRE OS PONTOS DE OBSERVAÇÃO E AS ESTRUTURAS

Figura B.1 - Distância da Caixa d'água até a Torre/DCTA (825,53 m).



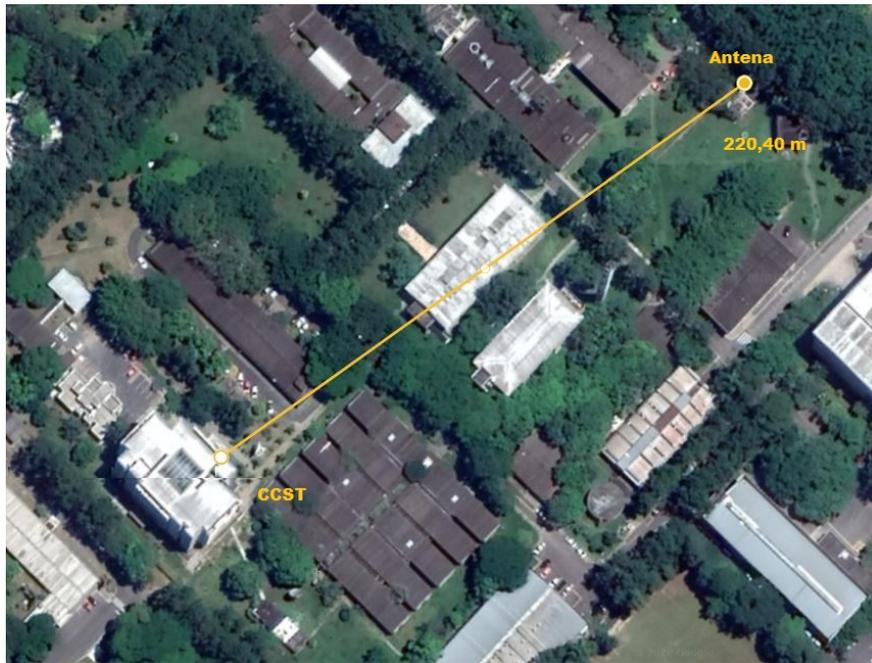
Fonte: Adaptado do Google Earth (2020a)

Figura B.2 - Distância da Caixa d'água até o LIT (115,41 m).



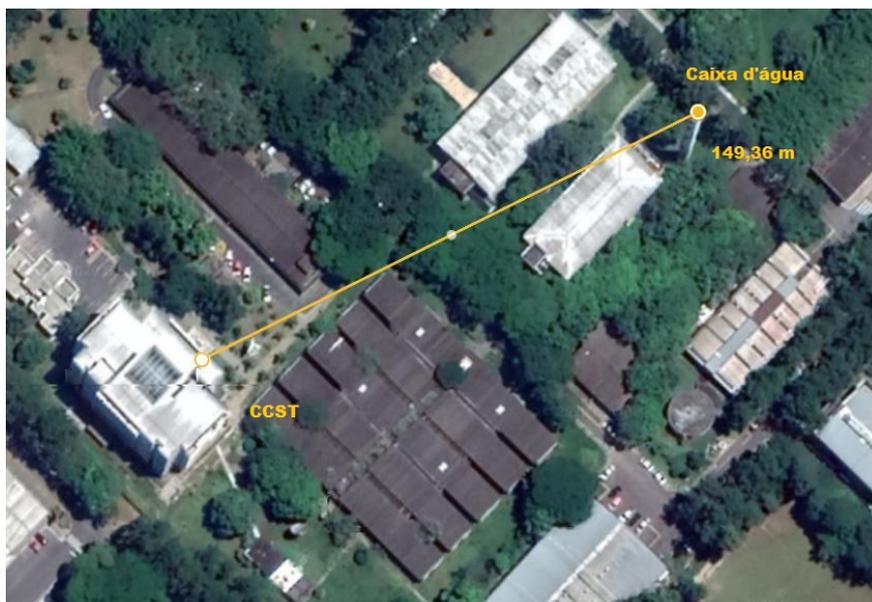
Fonte: Adaptado do Google Earth (2020a)

Figura B.3 - Distância do CCST até a Antena (220,40 m).



Fonte: Adaptado do Google Earth (2020a)

Figura B.4 - Distância do CCST até a Caixa d'água (149,36 m).



Fonte: Adaptado do Google Earth (2020a)

Figura B.5 - Distância do CEA até a Antena (288,87 m).



Fonte: Adaptado do Google Earth (2020a)

Figura B.6 - Distância do CEA até a Caixa d'água (334,44 m).



Fonte: Adaptado do Google Earth (2020a)

Figura B.7 - Distância da ADC até a Antena (165,20 m).



Fonte: Adaptado do Google Earth (2020a)

Figura B.8 - Distância da ADC até a Caixa d'água (236,60 m).



Fonte: Adaptado do Google Earth (2020a)

## APÊNDICE C - PREJUÍZOS CAUSADOS PELA DESCARGA ATMOSFÉRICA QUE ATINGIU O POSTE DE ENERGIA ELÉTRICA

Abaixo segue o detalhamento dos prejuízos causados pela descarga atmosférica. Além das três casas se localizarem em frente ao poste atingido, elas também recebem a energia elétrica diretamente dele.

- **Casa 121:**
  - 1 DVR;
  - 2 estabilizadores;
  - 1 Motor do porteiro eletrônico;
  - 1 Modem de internet.
  
- **Casa 127:**
  - 1 Aparelho da prestadora de TV por assinatura;
  - 1 Modem de internet.
  
- **Casa 137:**
  - 1 Motor do porteiro eletrônico;
  - 1 Modem de internet;
  - 1 Aparelho da prestadora de TV por assinatura;
  - 1 Televisão;
  - 1 Geladeira.

Figura C.1 - Imagem do poste que sofreu o impacto.



Fonte: Adaptado do Google Maps (2019c)



## APÊNDICE D - DADOS GERADOS PELO ALGORITMO

Tabela D.1 - Dados gerados pelo algoritmo do raio (dia 20 de março de 2018).

Eixo X (m)	Eixo Y (m)	Eixo Z (m)
152,8465	143,7724	347,6532
152,5677	143,7987	345,6115
153,7747	143,6847	345,9866
157,9301	143,2925	351,0119
162,5066	142,8605	354,4751
165,5944	142,5690	357,3492
169,5618	142,1946	360,7260
171,5334	142,0084	360,6853
171,8910	141,9747	357,3105
170,5486	142,1014	353,5663
172,3377	141,9325	354,1360
172,6055	141,9072	353,5745
174,8314	141,6971	354,9125
174,5649	141,7223	351,6453
176,1621	141,5715	351,9348
176,4278	141,5464	350,9560
177,3124	141,4629	348,9842
177,3124	141,4629	347,5992
177,5775	141,4379	346,8855
174,7426	141,7055	342,9671
172,9623	141,8736	340,0654
168,2129	142,3219	332,7983
166,9505	142,4410	330,6183
165,3227	142,5947	328,8684
164,0529	142,7146	326,8820
161,7772	142,9294	324,4790
159,4909	143,1452	321,1694
156,1799	143,4577	317,8539
153,1252	143,7461	314,0226
150,7984	143,9657	310,6258
150,7984	143,9657	309,1304
150,4251	144,0009	307,2923
151,8235	143,8689	308,5011
151,9166	143,8601	308,0285
150,7984	143,9657	305,5657
151,8235	143,8689	306,3711
150,6118	143,9833	303,5223
151,9166	143,8601	303,2878
153,9601	143,6672	303,7992

Tabela D.1 - Continuação

<b>Eixo X (m)</b>	<b>Eixo Y (m)</b>	<b>Eixo Z (m)</b>
154,9787	143,5711	303,1716
158,0221	143,2838	306,1003
158,8867	148,9445	308,6132
161,2294	142,9811	302,6950
162,1026	140,9230	297,0525
162,0935	140,4282	292,1031
164,1357	137,6836	287,0822
160,7942	139,0912	284,6131
160,3178	137,6662	277,4551
156,4810	138,6404	274,5287
153,9103	139,9093	273,9691
153,9009	138,9629	270,2604
149,0010	142,3194	273,5485
147,6898	142,4591	272,3520
144,7919	144,5327	272,6476
143,6402	142,8907	264,2759
142,3144	143,0320	262,8671
140,6997	143,2041	259,8508
138,7932	143,4073	257,2491
136,3035	143,6727	257,6488
131,6571	150,5307	258,2101
128,3815	146,0817	252,5707
126,0351	146,3032	248,3963
122,3964	146,6466	242,9284
123,3824	146,5536	243,5057
123,3824	146,5536	242,8704
122,9882	146,5908	241,4559
123,8475	150,9856	243,5067
126,4269	146,2662	240,1528
127,0002	144,6642	235,7868
129,8165	141,1718	224,5638
128,4524	141,3507	222,5944
127,7688	141,4404	221,2549
126,0066	141,6715	218,8710
123,4553	143,5286	222,2655
122,2709	143,6693	220,3897
117,3382	147,1241	224,1730
115,6724	149,0321	227,8094
111,3229	147,6919	222,2725
107,4767	148,0550	216,4903
107,3751	148,0645	215,6605
103,6018	148,4207	209,8230

Tabela D.1 - Continuação

<b>Eixo X (m)</b>	<b>Eixo Y (m)</b>	<b>Eixo Z (m)</b>
100,3161	148,7309	205,2558
99,1819	148,8379	202,3648
97,1134	149,0332	198,3722
99,2851	148,8282	200,2753
98,5622	148,8964	198,1489
96,0760	149,1311	193,8391
94,5162	149,2783	190,2594
94,7776	148,0985	183,7977
97,0243	146,6696	178,3945
100,3098	145,0422	176,6854
102,7640	143,4456	171,5568
105,1311	143,1057	167,9411
104,4119	143,2090	166,6097
102,0413	143,5493	163,7106
104,5302	144,1652	161,6952
102,1631	144,4830	158,6598
103,7947	143,2976	154,1401
100,8425	145,5950	152,9604
99,1616	144,8860	154,5248
98,5382	144,9697	153,5263
96,3501	145,2635	150,6619
94,1520	145,5586	148,0617
93,3120	145,6714	146,6683
92,1546	145,8268	144,8532
91,9801	146,7028	140,8146
92,7536	144,8828	139,3552
92,9439	144,2765	138,2652
95,6737	138,4232	131,8178
95,0379	138,5546	130,5249
92,1646	139,1486	127,1772
89,4865	139,7022	123,9350
86,6830	140,2817	120,7524
86,9720	139,1039	117,7379
89,8163	132,0033	113,2108
90,2960	126,9893	110,1928
91,6432	121,7736	105,1828
92,7963	120,3397	102,0690
96,1858	110,6929	97,2971
96,4930	109,4825	93,8813
96,4930	109,4825	90,6583
98,9631	108,2354	89,5756
100,0164	105,8629	86,0524

Tabela D.1 - Continuação		
<b>Eixo X (m)</b>	<b>Eixo Y (m)</b>	<b>Eixo Z (m)</b>
99,0080	106,3906	85,3286
100,9385	103,8835	84,6909
104,4603	101,2100	84,1276
107,0292	97,4006	81,2187
110,7085	87,6907	78,0972
113,4994	85,4724	77,2791
115,6349	82,7522	76,1459
117,5432	78,7385	72,3824
118,3280	77,2728	70,1355
119,4354	75,5683	66,2935
120,4923	76,2691	63,4949
119,9682	75,1997	60,0612
120,6377	75,2152	58,4284
120,4587	75,8156	56,2395
121,2725	74,7786	53,9942
121,9796	73,8081	50,4798
122,6716	74,3021	47,8353
123,1949	73,9442	44,7225
123,6576	72,6471	42,9348
125,6323	69,2784	38,8759
124,1753	70,3097	38,6838
121,8912	72,4133	36,4615
123,1823	71,9959	34,7923
124,4363	71,1183	34,5881
124,2279	71,2642	31,3638
124,8265	70,3474	28,8349
125,2968	69,0145	26,9259
125,5408	67,3287	24,3870
125,2337	65,0200	21,8183
126,1253	62,8169	19,8186
124,7476	63,3494	16,6385
125,5606	61,7033	14,4597
125,3505	61,8648	13,0634
Fim da Tabela		

Tabela D.2 - Dados gerados pelo algoritmo do raio (dia 16 de dezembro de 2018).

<b>Eixo X (m)</b>	<b>Eixo Y (m)</b>	<b>Eixo Z (m)</b>
368,9979	32,1946	272.2054
368,9979	32,1946	269.7065
368,8742	31,8746	267,0861

Tabela D.2 - Continuação

<b>Eixo X (m)</b>	<b>Eixo Y (m)</b>	<b>Eixo Z (m)</b>
368,8742	31,8746	264,6119
368,9979	32,1946	262,5857
370,3738	32,4527	261,4944
370,4973	31,6826	259,6228
370,1209	30,7210	255,8879
369,3752	30,9779	255,6391
369,3752	30,9779	254,4162
366,6688	22,9550	245,4806
366,4135	20,2022	238,8931
367,4802	19,8005	237,2812
368,7912	20,0224	236,1928
369,8514	19,6251	236,1130
371,0344	19,5420	235,0142
372,0869	19,1487	235,3256
373,1349	18,7570	235,6361
373,4833	18,6269	233,4180
373,9156	17,7395	229,9441
373,3078	17,2438	227,5940
373,0919	17,6870	225,7205
372,3975	17,9486	224,7472
372,9159	19,2010	222,9387
373,3956	19,3849	221,1618
374,3567	19,7553	220,2607
375,1492	21,6529	219,2374
375,6804	22,9248	218,2588
376,7037	24,3956	216,3956
377,0595	24,2693	214,2429
377,4147	24,1431	212,0978
377,9052	24,3383	210,0714
376,8381	24,7163	209,7870
375,6336	24,7757	210,4697
374,5590	25,1574	210,1833
374,6905	25,4770	208,0723
374,5933	26,2443	206,2487
374,9880	27,2065	204,6299
376,2792	29,3386	203,7986
376,9119	29,8625	202,1690
377,6814	30,7144	200,1176
377,8164	31,0406	198,2957
377,9516	31,3671	195,9540
376,8466	31,7379	194,9255
375,3663	32,2346	194,1817

Tabela D.2 - Continuação

<b>Eixo X (m)</b>	<b>Eixo Y (m)</b>	<b>Eixo Z (m)</b>
373,8778	32,7341	194,1851
372,6279	32,7868	195,4835
371,5030	33,1654	195,5752
370,7506	33,4187	194,2688
370,4989	33,8680	191,8609
369,8669	34,4443	189,8874
369,1073	34,6984	187,9392
368,3456	34,9533	185,8894
368,2230	34,6318	183,6842
367,2173	34,2465	181,4757
365,6892	34,7624	181,1234
364,7735	35,7894	181,7890
363,2265	36,3085	181,4307
362,4498	36,5692	180,8898
360,8898	37,0927	180,1701
359,3210	37,6191	179,8097
358,2486	38,3317	180,6216
357,0598	38,7295	180,7057
355,8659	39,1289	181,5379
354,6670	39,5301	182,6195
354,1611	39,3507	184,2731
352,5543	39,8899	183,8930
350,8372	40,1208	185,0440
349,2139	40,6671	184,6578
347,9904	41,0789	184,0100
346,7615	41,4925	183,3627
345,5273	41,9079	182,3610
344,2878	42,3251	181,7154
343,5510	42,9112	179,6506
342,3011	43,3307	178,6574
341,0457	43,7519	177,6664
339,8731	44,4801	176,3639
339,4511	44,6213	174,2453
339,4511	44,6213	172,4746
340,6260	43,8928	171,0222
341,5215	42,2485	168,6344
342,6759	41,5197	167,1831
344,0081	41,4042	166,1114
345,2433	40,9849	164,9672
346,6653	41,1838	164,3087
347,9904	41,0789	162,7581
349,5118	41,5992	162,6450

Tabela D.2 - Continuação

<b>Eixo X (m)</b>	<b>Eixo Y (m)</b>	<b>Eixo Z (m)</b>
351,3413	43,0677	162,9900
353,4976	45,5070	163,5645
355,0481	46,0681	162,6324
355,8711	45,8082	161,3900
356,4961	46,3180	159,1492
357,2309	47,1512	157,9374
359,3168	47,9313	158,3332
360,7748	48,2018	158,7375
362,8057	50,1136	158,9347
364,4547	49,6223	159,2779
366,3326	49,7942	159,0534
367,5603	49,4309	159,3091
368,6192	49,8540	157,8542
371,0414	53,9734	158,1016
372,7864	54,9814	158,0834
373,1345	52,2623	157,2960
374,2517	50,4448	156,5875
377,7005	55,9017	157,7510
378,9362	55,5670	158,0102
380,1673	55,2335	158,6285
380,7117	54,3192	159,8432
381,9319	53,9862	160,4635
383,1476	53,6545	160,7224
384,3588	53,3240	160,9805
385,8522	53,6938	160,9194
387,0577	53,3673	161,1769
388,6998	54,0981	161,4532
389,4553	52,7179	162,0559
390,6475	52,3950	162,6791
391,8354	52,0733	163,3032
392,3197	51,1518	164,1575
393,4970	50,8306	164,7828
392,3548	45,2325	163,2637
394,1193	46,3044	165,3662
394,3277	43,8750	165,1684
397,2036	47,4222	167,8425
396,5892	43,2193	166,0279
398,6809	45,0093	167,1044
Fim da Tabela		



## APÊNDICE E - VELOCIDADES 2D E 3D EM FUNÇÃO DO TEMPO.

Tabela E.1 - Velocidade 2D e 3D calculadas a partir do seu deslocamento e dos seus respectivos intervalos de tempo para o Evento 01.

Tempo (s)	Tempo rel. (s)	$\Delta S$ 2D (m)	Velocidade 2D (m/s)	$\Delta S$ 3D (m)	Velocidade 3D (m/s)
0					
0,603174	$1,22 \cdot 10^{-3}$	2,87	$2,36 \cdot 10^3$	4,45	$3,66 \cdot 10^3$
0,603201	$1,19 \cdot 10^{-3}$	2,89	$1,07 \cdot 10^5$	4,49	$1,66 \cdot 10^5$
0,603227	$1,16 \cdot 10^{-3}$	3,43	$1,32 \cdot 10^5$	5,34	$2,05 \cdot 10^5$
0,603253	$1,14 \cdot 10^{-3}$	1,37	$5,28 \cdot 10^4$	2,13	$8,19 \cdot 10^4$
0,603280	$1,11 \cdot 10^{-3}$	2,44	$9,02 \cdot 10^4$	3,78	$1,45 \cdot 10^5$
0,603306	$1,09 \cdot 10^{-3}$	1,68	$6,46 \cdot 10^4$	2,61	$1,00 \cdot 10^5$
0,603333	$1,06 \cdot 10^{-3}$	0,98	$3,64 \cdot 10^4$	1,53	$5,67 \cdot 10^4$
0,603359	$1,03 \cdot 10^{-3}$	1,10	$4,22 \cdot 10^4$	1,70	$6,54 \cdot 10^4$
0,603386	$1,01 \cdot 10^{-3}$	3,44	$1,27 \cdot 10^5$	5,53	$2,05 \cdot 10^5$
0,603412	$9,79 \cdot 10^{-4}$	1,04	$3,98 \cdot 10^4$	1,41	$5,42 \cdot 10^4$
0,603439	$9,52 \cdot 10^{-4}$	2,53	$9,36 \cdot 10^4$	3,92	$1,45 \cdot 10^5$
0,603465	$9,26 \cdot 10^{-4}$	4,30	$1,65 \cdot 10^5$	8,69	$3,34 \cdot 10^5$
0,603492	$8,99 \cdot 10^{-4}$	4,96	$1,84 \cdot 10^5$	5,70	$2,11 \cdot 10^5$
0,603518	$8,73 \cdot 10^{-4}$	0,92	$3,54 \cdot 10^4$	1,41	$5,42 \cdot 10^4$
0,603544	$8,47 \cdot 10^{-4}$	5,04	$1,94 \cdot 10^5$	7,82	$3,01 \cdot 10^5$
0,603571	$8,20 \cdot 10^{-4}$	8,54	$3,16 \cdot 10^5$	13,26	$4,91 \cdot 10^5$
0,603597	$7,94 \cdot 10^{-4}$	4,25	$1,63 \cdot 10^5$	6,58	$2,53 \cdot 10^5$
0,603624	$7,67 \cdot 10^{-4}$	4,91	$1,82 \cdot 10^5$	7,64	$2,83 \cdot 10^5$
0,603650	$7,41 \cdot 10^{-4}$	3,54	$1,36 \cdot 10^5$	5,50	$2,12 \cdot 10^5$
0,603677	$7,14 \cdot 10^{-4}$	2,05	$7,61 \cdot 10^4$	3,18	$1,80 \cdot 10^5$
0,603703	$6,88 \cdot 10^{-4}$	1,63	$6,28 \cdot 10^4$	2,55	$9,81 \cdot 10^4$
0,603730	$6,61 \cdot 10^{-4}$	8,86	$3,28 \cdot 10^5$	13,73	$5,09 \cdot 10^5$
0,603756	$6,35 \cdot 10^{-4}$	1,68	$6,46 \cdot 10^4$	2,61	$1,00 \cdot 10^5$
0,603783	$6,08 \cdot 10^{-4}$	1,76	$6,54 \cdot 10^4$	2,75	$1,02 \cdot 10^5$
0,603809	$5,82 \cdot 10^{-4}$	4,80	$1,85 \cdot 10^5$	7,45	$2,87 \cdot 10^5$
0,603835	$5,56 \cdot 10^{-4}$	2,51	$9,67 \cdot 10^4$	3,90	$1,50 \cdot 10^5$
0,603862	$5,29 \cdot 10^{-4}$	6,51	$2,41 \cdot 10^5$	10,11	$3,74 \cdot 10^5$
0,603888	$5,03 \cdot 10^{-4}$	13,07	$5,03 \cdot 10^5$	20,28	$7,80 \cdot 10^5$
0,603915	$4,76 \cdot 10^{-4}$	0,23	$8,44 \cdot 10^3$	0,36	$1,34 \cdot 10^4$
0,603941	$4,50 \cdot 10^{-4}$	2,69	$1,03 \cdot 10^5$	4,16	$1,60 \cdot 10^5$
0,603968	$4,23 \cdot 10^{-4}$	5,70	$2,11 \cdot 10^5$	8,85	$3,28 \cdot 10^5$
0,603994	$3,97 \cdot 10^{-4}$	3,79	$1,46 \cdot 10^5$	5,89	$2,27 \cdot 10^5$
0,604021	$3,70 \cdot 10^{-4}$	6,39	$2,37 \cdot 10^5$	9,93	$3,68 \cdot 10^5$
0,604047	$3,44 \cdot 10^{-4}$	9,85	$3,79 \cdot 10^5$	15,29	$5,88 \cdot 10^5$
0,604074	$3,17 \cdot 10^{-4}$	6,30	$2,33 \cdot 10^5$	9,78	$3,62 \cdot 10^5$
0,604100	$2,91 \cdot 10^{-4}$	3,75	$1,44 \cdot 10^5$	5,83	$2,24 \cdot 10^5$

Tabela E.1 - Conclusão

<b>Tempo (s)</b>	<b>Tempo relativo (s)</b>	<b><math>\Delta S</math> 2D (m)</b>	<b>Velocidade 2D (m/s)</b>	<b><math>\Delta S</math> 3D (m)</b>	<b>Velocidade 3D (m/s)</b>
0,604126	$2,65 \cdot 10^{-4}$	0,09	$3,35 \cdot 10^3$	0,15	$5,77 \cdot 10^3$
0,604153	$2,38 \cdot 10^{-4}$	11,00	$4,08 \cdot 10^5$	17,10	$6,33 \cdot 10^3$
0,604179	$2,12 \cdot 10^{-4}$	3,25	$1,25 \cdot 10^5$	5,04	$1,94 \cdot 10^5$
0,604206*	$1,85 \cdot 10^{-4}$	7,94	$2,94 \cdot 10^5$	12,33	$4,57 \cdot 10^5$
0,604232	$1,59 \cdot 10^{-4}$	4,86	$1,87 \cdot 10^5$	7,55	$2,90 \cdot 10^5$
0,604259	$1,32 \cdot 10^{-4}$	6,73	$2,79 \cdot 10^5$	10,44	$3,87 \cdot 10^5$
0,604285	$1,06 \cdot 10^{-4}$	11,18	$4,30 \cdot 10^5$	17,36	$6,68 \cdot 10^5$
0,604312	$7,90 \cdot 10^{-5}$	8,44	$3,13 \cdot 10^5$	5,77	$2,14 \cdot 10^5$
0,604338	$5,30 \cdot 10^{-5}$	8,21	$3,16 \cdot 10^5$	20,11	$7,73 \cdot 10^5$
0,604391	0	20,62	$3,89 \cdot 10^5$	31,98	$6,03 \cdot 10^5$

Fim da Tabela

Tabela E.2 - Velocidade 2D e 3D calculadas a partir do seu deslocamento e dos seus respectivos intervalos de tempo para o Evento 02.

<b>Tempo (s)</b>	<b>Tempo rel. (s)</b>	<b><math>\Delta S</math> 2D (m)</b>	<b>Velocidade 2D (m/s)</b>	<b><math>\Delta S</math> 3D (m)</b>	<b>Velocidade 3D (m/s)</b>
0					
0,717853	$1,06 \cdot 10^{-4}$	72,14	$6,81 \cdot 10^5$	100,43	$9,47 \cdot 10^5$
0,717880	$7,90 \cdot 10^{-5}$	55,92	$2,07 \cdot 10^6$	77,83	$2,88 \cdot 10^6$
0,717906	$5,30 \cdot 10^{-5}$	14,27	$5,49 \cdot 10^5$	19,87	$7,64 \cdot 10^5$
0,717933 <sup>1</sup>	-	-	-	-	-
0,717959	0	53,21	$1,00 \cdot 10^6$	74,07	$1,40 \cdot 10^6$

<sup>1</sup>Para esse intervalo de tempo a câmera não capturou a imagem do relâmpago.

## ANEXO A - CÓDIGO DO ALGORITMO DE RECONSTRUÇÃO

O algoritmo de reconstrução é o mesmo para os dois eventos estudados.

- Código da função `pmatch.m`

```
function [xyz, db] = pmatch(P1,PR1,P2,PR2,INFO)
```

```
% Esse algoritmo calcula as possíveis coordenadas x,y,z considerando que os dois pontos de entrada P1 e P2 são correspondentes. Também retorna o valor db, que calcula a correspondência (quanto menor o db, maior a chance de P1 e P2 serem o mesmo ponto no espaço).
```

```
% xpr e ypr correspondem à localização do ponto de referência da imagem de que o ponto de match foi retirado. xci e yci são a localização do centro da imagem.
```

```
format compact
```

```
xpr1 = PR1(1) ; ypr1 = PR1(2);  
xpr2 = PR2(1) ; ypr2 = PR2(2);  
xc1 = PR1(3) ; yc1 = PR1(4);  
xc2 = PR2(3) ; yc2 = PR2(4);
```

```
% As coordenadas de P1 e P2 são traduzidas para ângulos de inclinação com a horizontal (ANG(1)) e ângulo azimutal (ANG(2)) em radiano.
```

```
ANG1d(1) = INFO(1) - 180 * atan((P1(2) - yc1) * INFO(7)/INFO(6))/pi;  
ANG1d(2) = INFO(2) - 180 * (atan((P1(1) - xc1) * INFO(7)/INFO(6)) - atan((xpr1 - xc1) *  
INFO(7)/INFO(6)))/pi;  
ANG2d(1) = INFO(8) - 180 * atan((P2(2) - yc2) * INFO(14)/INFO(13))/pi;  
ANG2d(2) = INFO(9) - 180 * (atan((P2(1)-xc2) * INFO(14)/INFO(13)) - atan((xpr2 - xc2) *  
INFO(14)/INFO(13)))/pi;  
  
ANG1 = ANG1d * pi/180;  
ANG2 = ANG2d * pi/180;
```

```
% encontrando a projeção (xp,yp) no plano horizontal para esse par.
```

```
xp = -(INFO(11) - INFO(4) - INFO(10) * tan(ANG2(2) - INFO(3) * tan(ANG1(2)))) /  
(tan(ANG2(2)) - tan(ANG1(2)));  
yp = (xp - INFO(3)) * tan(ANG1(2)) + INFO(4);
```

```
% calculando as estimativas de altura para o suposto ponto 3D (x,y,z)
```

```
d1 = sqrt((INFO(3) - xp)^2 + (INFO(4) - yp) ^ 2);  
d2 = sqrt((INFO(10) - xp)^2 + (INFO(11) - yp) ^ 2);  
zp1 = d1 * tan(ANG1(1)) + INFO(5);  
zp2 = d2 * tan(ANG2(1)) + INFO(13);
```

```

% calculando db de acordo com a diferença entre os valores de zp1 e zp2

db = atan(abs(zp1-zp2)/min(d1,d2));

% retornando a altura estimada como a média dos valores de altura encontrados para cada ponto

z = zp2 + (d2/cos(ANG2(1))) * (zp1-zp2)/(d2/cos(ANG2(1)) + d1/cos(ANG1(1)));
xyz = [xp,yp,z];
end

```

• **Código da função main\_atr**

```

function [xyz, db] = main_atr(ENTR,PRR,ENTA,PRA,INFO)

nR = size(ENTR);
nA = size(ENTA);

% calcular pontos e produzir visualização da matriz db.

for i = 1:nR(1)
    for j = 1:nA(1)
        [xyz, db(i,j)] = pmatch(ENTR(i,:),PRR,ENTA(j,:),PRA,INFO);
        x(i,j) = xyz(1);
        y(i,j) = xyz(2);
        z(i,j) = xyz(3);
    end
end

figure
mesh(db.^(1/4))

% escolher os pontos para construção do raio.

kmin=1;
for j = 1:nA(1)
    dbarrayj = db(:,j).^(1/4);
    [min_db,k] = min(dbarrayj);
    % k(i) = n° do ponto da CA que corresponde ao ponto i da CR
    if(k < kmin-1)
        404 % mandar erro. Significa que os pontos estão "voltando".
    end
    if k == kmin-1
        k=kmin;
    end

% atualizat kmin para que os pontos estejam em ordem descendente
if k < nA
    if k > kmin

```

```

        kmin = k;
    end
end

% caso o ponto não encontre correspondência:
if k == 1
    k=0;
end
if k == nR(1)
    k=0;
end
K(j) = k;
j = j+1;
end

p=1;
for j = 1:length(K)
    if(K(j) > 0)
        xyzt(p,1) = x(K(j),j);
        xyzt(p,2) = y(K(j),j);
        xyzt(p,3) = z(K(j),j);
        p = p+1;
    end
end

% plot
res(:,1) = xyzt(:,1)
res(:,2) = xyzt(:,2)
res(:,3) = xyzt(:,3)

% plot tridimensional do raio
figure
plot3(xyzt(:,1),xyzt(:,2),xyzt(:,3));
xlabel('eixo x (m)');
ylabel('eixo y (m)');
zlabel('eixo z (m)');
title('Representação tridimensional dos pontos adquiridos');
grid;
axis equal;

% plot tridimensional do raio da visão da câmera auxiliar
figure
plot3(xyzt(:,1),xyzt(:,2),xyzt(:,3));
xlabel('eixo x (m)');
ylabel('eixo y (m)');
zlabel('eixo z (m)');

```

```
title('Visão da câmera rápida');
grid;
axis equal;
view(INFO(2) - 90, -INFO(1));

% plot tridimensional do raio da visão da câmera rápida
figure
plot3(xyzt(:,1),xyzt(:,2),xyzt(:,3));
xlabel('eixo x (m)');
ylabel('eixo y (m)');
zlabel('eixo z (m)');
title('Visão da câmera auxiliar');
grid;
axis equal;
view(INFO(9) - 90, -INFO(8));
end
```

## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

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

### **Manuais Técnicos (MAN)**

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

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

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

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

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

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

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

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

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

### **Programas de Computador (PDC)**

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

### **Pré-publicações (PRE)**

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