



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA

JHONYS WILLIAM MARQUES MOURA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA
AUTOMATIZADO PARA CAPTURA DE IMAGENS DE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

BELÉM/PA
2025

JHONYS WILLIAM MARQUES MOURA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA
AUTOMATIZADO PARA CAPTURA DE IMAGENS DE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Dr. Adonis Ferreira Raiol Leal
Universidade Federal do Pará

BELÉM/PA
2025


JHONYS WILLIAM MARQUES MOURA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA
AUTOMATIZADO PARA CAPTURA DE IMAGENS DE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**


Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, pela Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará.

DATA DE APROVAÇÃO: 28/03/2025


CONCEITO: Excelente

Documento assinado digitalmente
 **ADONIS FERREIRA RAIOL LEAL**
Data: 30/03/2025 21:14:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dr. Adonis Ferreira Raiol Leal
Orientador - FEEB/ITEC/UFPA

Documento assinado digitalmente
 **REINALDO CORREA LEITE**
Data: 29/03/2025 22:19:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Reinaldo Corrêa Leite
Membro - FEEB/ITEC/UFPA

Documento assinado digitalmente
 **WENDLER LUIS NOGUEIRA MATOS**
Data: 29/03/2025 20:33:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Wendler Luis Nogueira Matos
Membro - Externo (USP)

Documento assinado digitalmente
 **GABRIEL ARCANJO VELASCO DOS SANTOS FERREIRA**
Data: 30/03/2025 16:09:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Gabriel Arcanjo Velasco dos Santos
Ferreira
Membro - UFPA

BELÉM/PA
2025

À minha mãe Gisele, por sempre ver o melhor em mim e nunca me deixar desistir. Ao meu pai Jozias, por sempre tentar dar estabilidade e bom humor para nossa casa. À minha vó Terezinha e à minha tia-avó Maria (em memória), que foram pilares fundamentais na minha criação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares, por me motivarem e me incentivarem, pela educação que me deram, pelo amor incondicional, e por moldarem meu caráter com honestidade e gentileza. Agradecimento especial àqueles que ajudaram a me criar: Patricia, Simone, Adriana, Bruna, Priscila, Joel, Nelci, Neri, Orivaldo, José e Cristina. A base de toda minha vida existe graças a vocês.

Ao professor e orientador Adônis Leal, pela paciência e pelo empenho em me direcionar em disciplinas e projetos de laboratório. Por me proporcionar oportunidades nos momentos que mais precisei, que me permitiram continuar a estudar quando achei que não conseguiria, e dar um direcionamento para minha formação.

Aos membros da banca, pela análise construtiva e correções, que me auxiliaram a atingir a qualidade final deste trabalho, sendo a aprovação por parte desses grandes pesquisadores de suma importância para mim.

Aos professores que me marcaram de forma positiva, pelo conhecimento, gentileza e tato para o ensino: Roberto Menezes, Angela Crispino, Waldeci Paraguasu, Aldebaro Klautau, Wilson Rabelo, Reinaldo Leite, Claudomiro Barbosa, Rosana Soares, Rommel Ramos, Sergio Pinheiro, Alessandra Lopes, Adriana Castro, Marcus Nunes, Antônio Silveira, Ronaldo Zampolo, Thiago Soares e Bernardo Neto.

Agradeço aos meus amigos de infância, Lucas Mozart, José Ribeiro e André Santos, que mesmo longe foram minha companhia em momentos de lazer e distração fora da universidade. Agradeço também ao Augusto e ao Ian com quem também dividi momentos nessa trajetória. Obrigado por, mesmo com a distância e o tempo, nossa amizade nunca ter diminuído. Sem vocês, o caminho seria muito mais difícil.

A toda a equipe do Instituto Silva e Silva de Artes Marciais (ISSAM), em especial ao Sifu Jaime e ao Matheus, com quem passei os mais caóticos e divertidos momentos. Onde pude escapar das dificuldades do dia a dia e reaprender a me dedicar a mim mesmo. Obrigado pelos ensinamentos, pelas incontáveis conversas e pela amizade.

À minha companheira de curso, uma amiga que a graduação me deu, Sandy Hiorrana, com quem tive a sorte de dividir as disciplinas do curso, as apresentações, os trabalhos e as reclamações. Obrigado pela companhia e carinho, e principalmente por estar presente nos momentos de maior aflição da graduação.

Ao engenheiro Línercky Lustosa, que me deu oportunidade de aprendizado e crescimento profissional, e acima de tudo, foi compreensível e solidário às dificuldades que tive. Às equipes de engenharia e arquitetura da Secretaria de Estado de Administração Penitenciária (SEAP) pelo ambiente de trabalho sempre amigável e descontraído, e por todo o aprendizado que tive. Agradecimento especial para: Pedro e Cinthia. Obrigado por tudo.

Aos meus amigos e colegas, que não estão mais presentes em minha vida, mas de alguma forma fizeram parte desse trajeto: Isaac, José, Júnior, Gabriel, Rebecca, Albino, Igor, Ian, Thales, Rayssa, Rafael, Ailton, Arthur, Alex, Rômulo, Paulo, Pablo, Luan, Yuri e Lucas. E a uma velha amiga, que durante a maior parte da minha formação foi minha companheira, motivadora e inspiração. Onde quer que esteja, que encontre o que procura.

“Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez.” (Thomas Edison)

RESUMO

Descargas atmosféricas (DA) são um fenômeno natural de alta intensidade que envolve o deslocamento de cargas elétricas sujeitas a um intenso campo elétrico. Por estar situada em uma zona tropical do planeta, onde predomina um clima quente e úmido propício à formação das nuvens cumulonimbus (Cb), a região Amazônica apresenta alta incidência de DA. Neste trabalho, apresentaremos a proposta de um sistema de baixo custo para registro de imagens de DA na Amazônia. O sistema proposto é composto por um *Single-Board Computer* (SBC), uma câmera com resolução de 1280x720p e taxa de captura de 120 quadros por segundo (fps - *Frames per Second*), em conjunto com um sistema microcontrolado de registro de campos elétricos emitidos por raios. O foco deste trabalho é o sistema de captura de vídeos, para isso, foram desenvolvidos algoritmos para iniciar e finalizar as gravações de forma automática, além de processar os vídeos para identificação dos quadros específicos onde ocorreram as DA, utilizando a Interface de Programação de Aplicações (API - *Application Programming Interface*) do programa FFmpeg. Além da proposta deste sistema, o resultado de 2 anos de uma campanha de medição de raios com uma câmera super-rápida instalada no Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSI-PAM) será apresentado. Dentre os parâmetros analisados, temos: número de descargas de retorno, número de contatos com o solo, corrente contínua e tempo entre descargas. Os resultados contribuem para um melhor entendimento da caracterização das descargas atmosféricas e auxiliam no aprimoramento das técnicas de monitoramento e pesquisa na área.

Palavras-chave: Descargas Atmosféricas, Análise de Vídeo, Automação, Processamento de Dados.

ABSTRACT

Atmospheric discharges (AD) are a high-intensity natural phenomenon involving the movement of electric charges under a strong electric field. Due to its location in a tropical region of the planet, where a hot and humid climate favors the formation of cumulonimbus (Cb) clouds, the Amazon region exhibits a high incidence of ADs. This study presents a low-cost system for capturing images of ADs in the Amazon. The proposed system consists of a Single-Board Computer (SBC), a camera with a resolution of 1280x720p and a capture rate of 120 frames per second, along with a microcontroller-based system for recording the electric fields emitted by lightning. The focus of this work is the video capture system, for which algorithms were developed to automatically start and stop recordings, as well as to process videos to identify the specific frames where ADs occurred, utilizing the Application Programming Interface (API) of the FFmpeg software. In addition to the proposed system, the results of a two-year lightning measurement campaign using a high-speed camera installed at the Management and Operational Center for the Amazon Protection System (CENSIPAM) will be presented. The analyzed parameters include the number of return strokes, the number of ground contacts, the continuous current, and the time intervals between discharges. The results contribute to a better understanding of the characterization of atmospheric discharges and assist in improving monitoring and research techniques in this field.

Keywords: Atmospheric Discharges, Video Analysis, Automation, Data Processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Região da Amazônia Legal Brasileira.	14
Figura 2.1 – Perfis de temperatura na atmosfera terrestre.	17
Figura 2.2 – Estágios de formação da Cumulonimbus.	18
Figura 2.3 – DA NS de tipo (a) descendente positiva (b) descendente negativa (c) ascendente positiva e (d) ascendente negativa.	19
Figura 2.4 – Representação das etapas de um flash em função do tempo.	20
Figura 2.5 – Captura realizada de um raio NS ascendente partindo do Shiprock, Novo México.	21
Figura 3.1 – Fluxograma da estação de captura de dados de raios para estudo acadêmico.	22
Figura 3.2 – Hélices de ventilador capturadas por <i>Rolling Shutter</i> e <i>Global Shutter</i>	23
Figura 3.3 – Protótipo do sistema montado em bancada.	23
Figura 3.4 – Fluxograma do sistema de captura de raios desenvolvido.	25
Figura 3.5 – Fluxograma do algoritmo para controle do registro e de gravações.	26
Figura 3.6 – Sistema de captura de descargas atmosféricas.	27
Figura 3.7 – Sensor de intensidade luminosa.	27
Figura 3.8 – Interface geral do programa Phantom Camera Control.	28
Figura 4.1 – Captura do Arduino uno e do LED usados para testes.	29
Figura 4.2 – Representação do processo de simulação do <i>strokes</i> realizado pelo código.	30
Figura 4.3 – LED aceso na gravação com o ambiente escuro.	31
Figura 4.4 – LED aceso na gravação com o ambiente claro.	31
Figura 4.5 – <i>Frames</i> para um registro de <i>trigger</i> referente à 4 <i>strokes</i> (Os pares de <i>frames</i> com pontos claros são aqueles em que o LED está aceso. Entre esses pares há uma sequência de 10 <i>frames</i> com o LED apagado).	32
Figura 4.6 – Verificação dos <i>frames</i> do primeiro <i>trigger</i> (Eixo do tempo ajustado para aproximar o primeiro <i>stroke</i> da referência ($t = 0$). O Primeiro <i>frame</i> com mais luminosidade está no instante $t = -8,33\ ms$; o <i>frame</i> com maior intensidade luminosa está no instante $t = 0\ ms$).	32
Figura 4.7 – Relação dos 4 primeiros <i>strokes</i> detectados (eixo do tempo ajustado) com a proposta de simulação do LED.	33
Figura 4.8 – Planilha com dados importados do <i>log</i> de gravações.	33
Figura 4.9 – Planilha com dados do <i>log</i> e dados de pós-processamento.	34
Figura 4.10 – Sequência de <i>frames</i> da simulação de <i>stroke</i> com o LED.	35
Figura 4.11 – Descarga nuvem-solo descendente capturada em vídeo.	36
Figura 4.12 – Descarga intranuvem capturada em vídeo.	36
Figura 4.13 – Organização em planilha das capturas de descargas estudadas.	37
Figura 4.14 – Momento de captura de DA sem visibilidade do canal.	37
Figura 4.15 – Contagem de descargas divididas por classificação.	38
Figura 4.16 – Total de <i>flashes</i> com descargas simples e com múltiplas descargas de retorno.	39
Figura 4.17 – Histograma da contagem de <i>strokes</i> por <i>flash</i> (média: 4,23).	40
Figura 4.18 – Contagem de <i>strokes</i> por <i>flash</i> na Flórida (média: 4,6).	40
Figura 4.19 – Contagem de <i>strokes</i> por <i>flash</i> no Novo México (média: 6,4).	41
Figura 4.20 – Contagem de <i>strokes</i> por <i>flash</i> em Belém (média: 3,1).	41
Figura 4.21 – Quantidade de <i>flashes</i> dividido por ponto de contato.	42

Figura 4.22– <i>Flash</i> com dois canais simultâneos.	42
Figura 4.23–Histograma do tempo entre <i>strokes</i> (média: 86,26 <i>ms</i>).	43
Figura 4.24–Tempo entre <i>strokes</i> em Belém (média: 90 <i>ms</i>).	43
Figura 4.25–Distribuição de <i>strokes</i> pela duração em milissegundos.	44
Figura 4.26–Classificação da duração de CC capturadas.	45
Figura 4.27–Descarga registrada com 3 <i>strokes</i> seguidos.	46
Figura 4.28–Histograma da duração de <i>flashes</i> em milissegundos.	47
Figura 4.29–Gráfico da distribuição de <i>flashes</i> nas horas do dia.	48
Figura 4.30–Gráfico da distribuição de descargas nas horas do dia.	48
Figura 4.31–Distribuição de descargas nas horas do dia em Belém.	49
Figura 4.32–Quantidade de horas com descargas em Belém.	49

LISTA DE SIGLAS

API	<i>Application Programming Interface</i> (Interface de Programação de Aplicações)
CC	Corrente Contínua
CENSIPAM	Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia
Cb	Cumulonimbus
csv	<i>Comma-Separated Values</i> (Valores Separados por Vírgula)
DA	Descargas Atmosféricas
ELAT	Grupo de Eletricidade Atmosférica
fps	<i>Frames per Second</i> (Quadros por Segundo)
GLM	<i>Geostationary Lightning Mapper</i> (Mapeador Geoestacionário de Raios)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IN	Intra-Nuvem
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LED	<i>Light-Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
LPDA	Laboratório de Pesquisa em Descargas Atmosféricas
MB	<i>Megabytes</i>
NA	Nuvem-Ar
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço)
NE	Nuvem-Estratosfera
NN	Nuvem-Nuvem
NS	Nuvem-Solo
SBC	<i>Single-Board Computer</i> (Computador de Placa Única)
SN	Solo-Nuvem
txt	<i>Text File</i> (Arquivo de Texto)
UTC	<i>Coordinated Universal Time</i> (Tempo Universal Coordenado)

SUMÁRIO

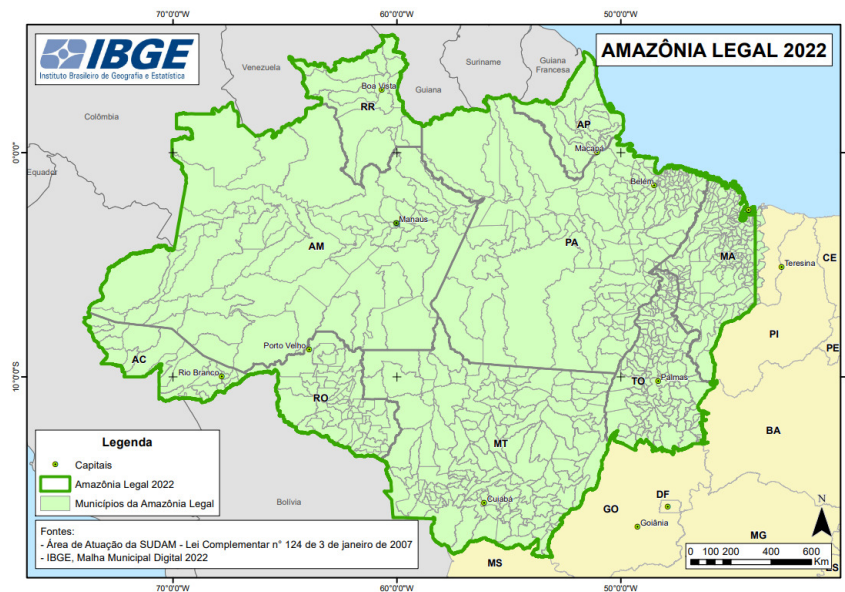
1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contribuições do trabalho	14
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
1.3	Estrutura do trabalho	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Nuvens Cumulonimbus	16
2.2	Descargas Atmosféricas	18
2.2.1	Classificação de descargas atmosféricas	18
2.2.2	Descargas Nuvem-Solo descendentes negativas	19
2.2.3	Descargas Nuvem-Solo descendentes positivas	20
2.2.4	Descargas Nuvem-Solo ascendentes	20
3	METODOLOGIA	22
3.1	Sistema automatizado de aquisição de imagens de raios	22
3.1.1	Processamento de multimídia com FFmpeg	24
3.1.2	Identificação de raios e captura de imagem	24
3.1.3	Processamento de captura	25
3.2	Campanha de medição de descargas atmosféricas no CENSIPAM	26
4	RESULTADOS	29
4.1	Avaliação da Captura do Protótipo	29
4.1.1	Captura de eventos	29
4.1.2	Processamento de gravações armazenadas	34
4.2	Campanha de medições no CENSIPAM	35
4.2.1	Classificação dos tipos de descarga	37
4.2.2	Número de <i>strokes</i> registrados por <i>flashes</i>	39
4.2.3	Pontos de contato com o solo por <i>flash</i>	41
4.2.4	Intervalo entre <i>strokes</i>	42
4.2.5	Duração de <i>strokes</i> e de corrente contínua	43
4.2.6	Componente M	45
4.2.7	Duração de <i>flashes</i>	46
4.2.8	Distribuição de descargas nas horas do dia	47
5	CONCLUSÃO	50
6	TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS	52

1 INTRODUÇÃO

A ocorrência de descargas atmosféricas (DA) é um fenômeno que antecede a origem da própria humanidade, e por si só o olhar questionador para com os fenômenos naturais é uma das características mais antigas do homem (CAMPOS, 2007). Já na Grécia antiga, Tales de Mileto (640-546 a.C.) observava as características elétricas da matéria, enquanto Aristóteles (384–322 a.C.) pela primeira vez tentava explicar raios como fenômenos da natureza ao invés de manifestações divinas (P., 1961). Porém, somente no século XVIII os cientistas voltaram a atenção aos raios, sendo esse período marcado pelo famoso experimento com a pipa de Benjamin Franklin (1706-1790) e a criação do para-raios (IRIBARNE; CHO, 1980). As DA são fenômenos elétricos naturais que ocorrem na atmosfera devido à eletrificação das nuvens Cumulonimbus (Cb) pelo movimento de partículas de gelo e gotas de água em seu interior. Após o carregamento, a nuvem apresentará uma polaridade de cargas e, com isso, fará o carregamento por indução do solo logo abaixo, criando assim uma diferença de potencial e um campo elétrico na região. Nessa condição, se o campo elétrico exceder a rigidez dielétrica do ar, ocorre o fenômeno do raio, podendo ser classificado pela sua origem e quanto à carga que é transferida (PAIVA, 2015).

O Brasil é um país com regime pluviométrico intenso, devido ao fato de possuir a maior parte de sua área situada em zona de clima tropical, o que naturalmente indica forte propensão à incidência de raios em seu território (FRAULOB, 2014). Segundo notícia publicada por Romero (2003), dados levantados no período de 1995 até 2001 pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em parceria com a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) apontam o país como primeiro lugar em número total de ocorrências de raios, com a cidade de Belém do Pará em sétimo lugar entre as cidades da América do Sul com maior número de DA registradas. Uma notícia de (TEIXEIRA, 2024) apresentou um levantamento feito pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) dos raios registrados no país entre os anos de 2018 e 2022, considerando não apenas aqueles que atingem o solo, mas também os raios intranuvem, e apontou uma média anual de 118 milhões de DA, acompanhando a média de 110 mortes e 200 feridos e o prejuízo em torno de 1 bilhão de reais. Além disso, um ranking realizado neste levantamento colocou Amazonas, Pará e Mato Grosso como os três estados com maior número absoluto de ocorrências, e Tocantins em décimo lugar. Na Figura 1.1 pode ser vista a região da Amazônia Legal Brasileira, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2022), a qual é composta por 9 estados: Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins, onde 4 destes estados estão presentes entre os 10 primeiros lugares do ranking anterior.

Figura 1.1 – Região da Amazônia Legal Brasileira.



Fonte: IBGE (2022)

A região da Amazônia corresponde a uma área de aproximadamente 5 milhões de Km², ocupando 60 % do território geográfico brasileiro (JUNIOR; CONTINI; NAVARRO, 2011). No intervalo de janeiro de 2009 a abril de 2019, houveram 118 ocorrências relacionadas a danos provocados por raios em indivíduos, na região Amazônica. O ano de 2018 registrou o maior número de mortes e incidentes, com o mês de outubro marcando o maior número de óbitos, atingindo valores acima de 20 (FERREIRA et al., 2019). A crescente incidência de raios é um ponto de preocupação no meio científico há alguns anos, sendo o aumento de frequência e da intensidade desses eventos diretamente relacionado às mudanças climáticas do planeta. O cenário de estudos de monitoramento e caracterização de DA mostra-se imprescindível para o avanço de pesquisas dos fenômenos, para um maior número de dados em diferentes referenciais e para o melhor desenvolvimento de sistemas de proteção.

1.1 Contribuições do trabalho

Este trabalho tem dois objetivos centrais. O primeiro é o desenvolvimento de uma estação de registro de imagens de raios automática, usando equipamentos de baixo custo, quando comparados às metodologias que utilizam câmeras super-rápidas. Desta forma, o sistema desenvolvido poderá ser replicado e posicionado em diferentes pontos de captura, possibilitando a análise de um mesmo evento de diferentes referenciais. O desenvolvimento do primeiro protótipo tem capacidade de captura de imagens com resolução de 1280x720p e 120 fps, além de algoritmo para identificação das DA nos vídeos gravados. O segundo objetivo é a análise dos dados de dois anos de uma campanha de medição com câmera rápida no CENSIPAM. Os resultados serão comparados a estudos realizados em outras regiões do planeta.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Planejar um sistema eletrônico e computacional capaz de registrar de forma automática vídeos de DA. Com isso, desenvolver um protótipo funcional com a aplicação da ideia central, priorizando a captura de imagens em boa resolução e alta taxa de quadros e a gestão de armazenamento. Para isso, serão utilizadas técnicas de linguagem de programação em Python e Arduino IDE, com o uso de uma API de captura e edição de vídeo, juntamente com um computador e equipamentos eletrônicos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Planejar e estruturar a ideia central da estação de captura de dados de DA, com medições do campo eletromagnético, e gravação em vídeo com 1280x720p e 120 fps;
- Desenvolver o primeiro protótipo do projeto, utilizando componentes eletrônicos de baixo custo, sendo esses: Arduino UNO, módulo GPS NEO-6M e a câmera USB U20CAM-9281M;
- Criar a programação do protótipo em linguagem Python e Arduino IDE para fazer a leitura de sensores de entrada, identificar variação na leitura e iniciar e salvar gravações de forma totalmente autônoma;
- Realizar a programação de um script auxiliar em Python para ser acionado separadamente pelo usuário, responsável por analisar automaticamente as capturas de vídeo e recortar os momentos em que uma DA foi capturada, mantendo armazenado somente os momentos de interesse e assim otimizando o espaço em disco;
- Realizar estudo de caso com a base de dados em vídeo adquirida nas medições do CENSIPAM pela equipe do Laboratório de Pesquisa em Descargas Atmosféricas (LPDA), para avaliar e identificar características das DA na cidade de Belém do Pará, parte da região Amazônica;

1.3 Estrutura do trabalho

No capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica necessária para o entendimento do contexto no qual o trabalho está inserido, como processo de eletrificação das nuvens e caracterização dos raios.

O capítulo 3 detalha a metodologia do trabalho, apresentando o planejamento do projeto, o desenvolvimento do projeto, com etapas de identificação, captura e processamento. Também é apresentada a estrutura de pesquisa utilizada nas capturas do CENSIPAM, os equipamentos utilizados e o procedimento geral para aquisição de registros.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos do protótipo desenvolvido, e as perspectivas de possíveis aplicações e ajustes. Também são mostrados os dados obtidos a partir da análise dos vídeos registrados na campanha de medição do CENSIPAM, caracterizando estatisticamente DA analisadas.

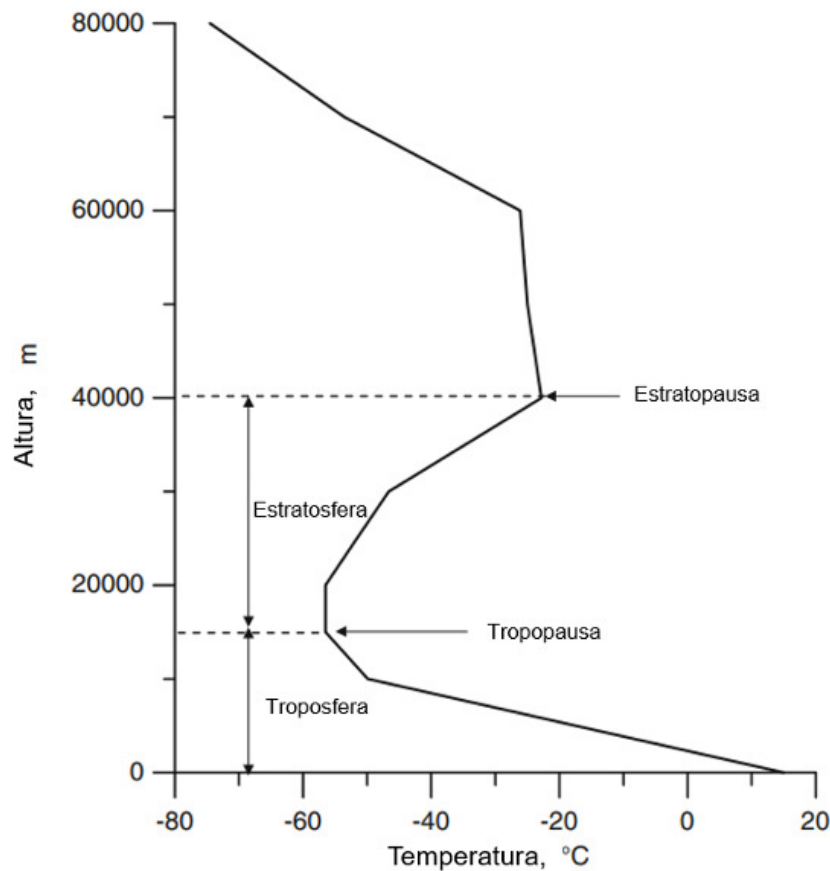
O capítulo 5 apresenta as conclusões gerais do trabalho, e o capítulo 6 apresenta sugestões e perspectivas para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Nuvens Cumulonimbus

As nuvens de tempestade, onde se originam os raios, são as chamadas Cumulonimbus, formadas a partir da vaporização da água do planeta e iniciando seu desenvolvimento na troposfera, que é a camada mais inferior da atmosfera (RAKOV, 2016). Devido ao processo de expansão, compressão e convecção do ar, que são responsáveis pela movimentação das partículas presentes na atmosfera, a nuvem atinge altitudes com temperaturas cada vez menores (Figura 2.1), acontecendo a condensação deste vapor d'água (ALBRECHT; DIAS, 2004). Eventualmente, a água pode chegar ao estado sólido, como cristais de gelo e neve, ocasionada por temperaturas a partir de determinadas altitudes (acima de 5 Km), para além do estado líquido anteriormente mencionado, como gotas de água e gotículas super-resfriadas (NACCARATO, 2001). Além disso, o perfil de temperatura na troposfera e a umidade relativa da atmosfera também colaboram para esse processo. A presença da água nos 3 estados da matéria (sólido, líquido e gasoso) raramente ocorre em um mesmo lugar na natureza, o que favorece que isso ocorra na Cb é sua elevada altitude vertical (LIMA, 2005), de até 20 Km, e extensão horizontal na base e topo, podendo variar entre 3 Km e 50 Km (RAKOV, 2016), enquanto a porção central apresenta um afunilamento, atribuindo à nuvem um formato de bigorna (LIMA, 2005).

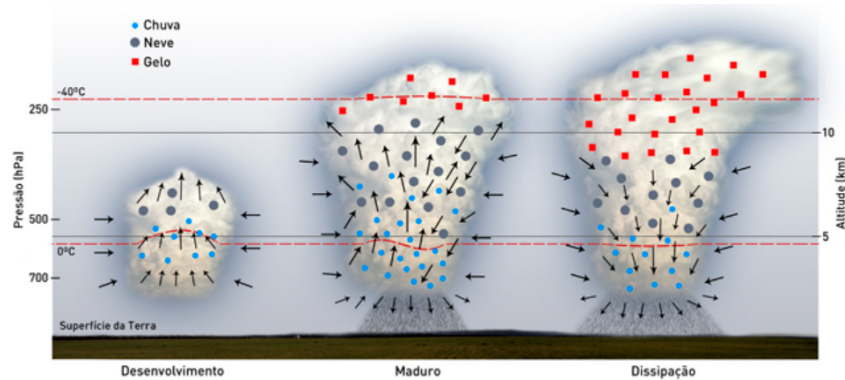
Figura 2.1 – Perfis de temperatura na atmosfera terrestre.



Fonte: Adaptado de Cooray (2015)

Após o processo de desenvolvimento da Cb, ela atinge o estágio maduro (Figura 2.2), quando ocorrem precipitações intensas (LUDLAM; MASON, 1957) e surgem as chamadas células de tempestade (NACCARATO, 2001). Essas células dizem respeito ao processo de eletrificação que ocorre no interior da nuvem, causado pela colisão e atrito da água em suas várias fases, como resultado dos movimentos ascendentes e descendentes das diferentes partículas e do ar (COORAY, 2015). A indução elétrica por atrito causa o aparecimento de células de cargas positivas e negativas, cargas essas que tendem a formar um dipolo elétrico na Cb pelos diferentes movimentos das partículas e pela natureza de atração e repulsão das cargas (NACCARATO, 2006). Finalmente, a Cb, atuando como um dipolo, induz a separação de cargas na superfície do solo logo abaixo de si, e, por conseguinte, cria uma diferença de potencial elétrico e um campo eletromagnético, onde podem ocorrer as DA ao acontecer a ruptura dielétrica do ar na região entre os potenciais (NACCARATO, 2001; COORAY, 2015).

Figura 2.2 – Estágios de formação da Cumulonimbus.



Fonte: INPE (2020)

2.2 Descargas Atmosféricas

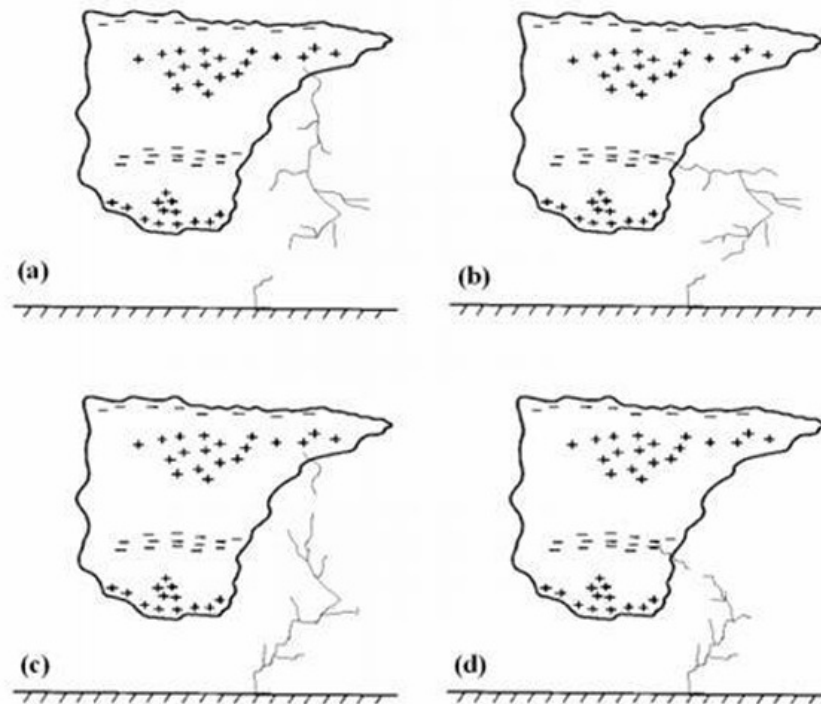
A descarga elétrica que ocorre a partir das nuvens Cb é chamada descarga atmosférica ou raio, sendo fenômenos naturais caracterizados como uma descarga transitória de alta corrente e curta duração (UMAN; KRIDER, 1989). Ao ocorrer a quebra da rigidez dielétrica do ar, é dado início ao surgimento de um canal de plasma quente e de alta condutibilidade (DWYNER; UMAN, 2014), que terá cargas positivas e negativas se acumulando nas suas extremidades, com as positivas se acumulando na extremidade que acompanha a orientação do campo elétrico, e as negativas na extremidade oposta (FERRO, 2008). O desenvolvimento deste canal ionizado e do acúmulo de cargas é o ponto de início do aparecimento do raio e por onde será guiado, e para ele se dá o nome de líder elétrico.

2.2.1 Classificação de descargas atmosféricas

As DA são classificadas a partir da sua formação e do seu ponto de contato (STOLZENBURG; MARSHALL, 2009), e podem ser divididas em dois grupos: DA que tocam o solo, sendo aproximadamente 25 % das observações totais, e as que não tocam o solo, podendo chegar até 80 % do total (OGAWA, 1995; RAKOV, 2016). Assim, a terminologia usada para nomear os tipos de descarga usa como referência o ponto de origem e o ponto de propagação (UMAN, 1987), com as DA Intra-Nuvem (IN), Nuvem-Nuvem (NN), Nuvem-Ar (NA) e Nuvem-Estratosfera (NE) como as que não tocam o solo, enquanto as que tocam o solo são classificadas como Nuvem-Solo (NS) e Solo-Nuvem (SN), ou simplesmente NS ascendente (com propagação do solo para a nuvem) e descendente (com propagação da nuvem para o solo), e, apesar da nomenclatura, englobam como ponto de contato objetos, e não apenas o solo (MATOS, 2022; NACCARATO, 2001).

As DA do tipo NS são o maior enfoque de estudos, apresentando uma frequência de ocorrências em uma tempestade de 10 % a 20 % (MATOS, 2022) e com menos de 1 % sendo ascendentes (RAKOV, 2016), e isso é devido principalmente à sua capacidade destrutiva e também à sua observação mais acessível, em contraste com os demais tipos que são de difícil observação e estudo (CAMPOS, 2007; MATOS, 2022). Esses raios são ainda classificados segundo a polaridade das cargas efetivamente transferidas ao solo (Figura 2.3), onde, ao todo, 90 % dos raios observados são descendentes negativos, e mais de 9 % são descendentes positivos (NACCARATO, 2001; RAKOV, 2016).

Figura 2.3 – DA NS de tipo (a) descendente positiva (b) descendente negativa (c) ascendente positiva e (d) ascendente negativa.



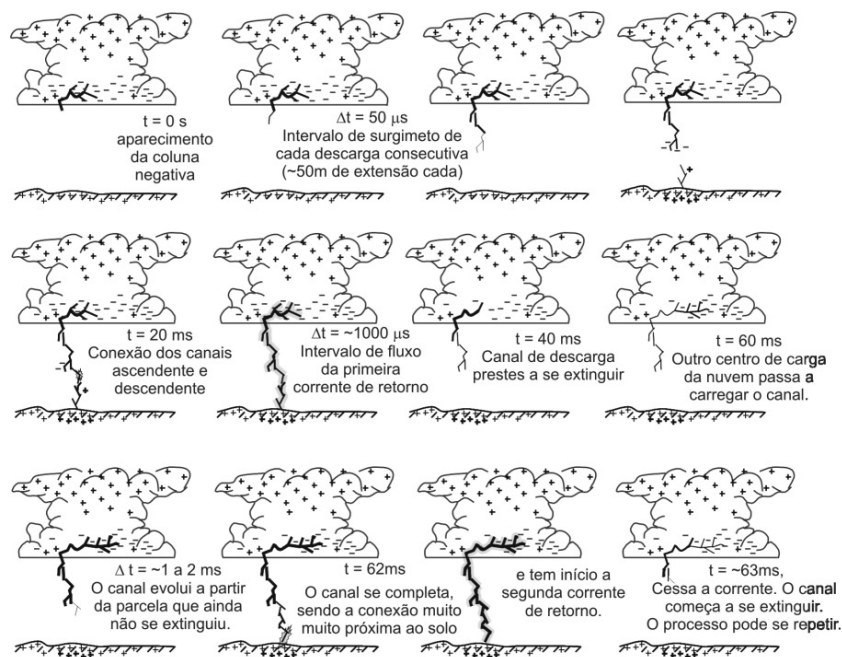
Fonte: Naccarato (2001)

2.2.2 Descargas Nuvem-Solo descendentes negativas

Os raios ascendentes, devido à sua baixa frequência de ocorrência, não são observados em grande número e, por isso, são considerados mais raros. Já os raios descendentes são os principais responsáveis pelos danos observados, o que os torna de maior interesse para estudo. Na origem de uma DA NS descendente negativa, no ponto de ruptura dielétrica do ar, surge em uma região entre os centros de cargas positivas e negativas da nuvem o líder bipolar bidirecional, onde a extremidade positiva (líder positivo) se propaga em direção ao centro de cargas negativas da nuvem, e a extremidade negativa (líder negativo) se propaga em direção ao centro de cargas positivas; para esse processo se dá o nome de Pulso de Quebra de Rigidez ou descarga p-N (SABA, 1997). Em sequência, um canal ionizado começa a se formar em direção ao solo, podendo produzir uma fraca descarga luminosa e se propagando em passos irregulares, recebendo o nome de líder escalonado (*stepped leader*). Enquanto o líder escalonado se aproxima do solo, com o aumento da intensidade do campo elétrico, surge um líder a partir de um ponto de acúmulo de cargas em direção ao líder escalonado. Ao líder é dado o nome de líder de conexão (ou líder ascendente), e ao ponto de origem será dado o nome de ponto de contato, após a descarga efetiva. Quando é feita a conexão dos líderes, ocorre uma descarga forte e de intensa luminosidade, denominada descarga de retorno (*return stroke*). Geralmente ocorre a ramificação do líder escalonado, no entanto, nem todos os seus ramos formam uma descarga de retorno. Após a descarga de retorno, caso ainda existam cargas disponíveis próximas ao canal anterior, forma-se um novo líder chamado líder contínuo (*dart leader*), caracterizado por possuir alta velocidade, visto que apenas refaz o canal criado pelo líder escalonado. Com isso, outra descarga ocorre, denominada descarga subsequente (*subsequent stroke*). Esse processo pode se repetir até a

neutralização das cargas da nuvem, ocorrendo em média três descargas por raio. O tempo entre descargas é chamado de intervalo *inter-strokes*, ou entre *strokes*, e o conjunto de descargas subsequentes pode ser denominado de descargas múltiplas. Contudo, se após a descarga de retorno ocorrer o término da DA, ela é denominada como descarga simples. Ao conjunto de todos os processos envolvidos em uma DA se dá o nome de *flash* (CAMPOS, 2007; LEAL, 2018; ROMERO, 2007). Na Figura 2.4 são apresentados os processos descritos na formação de um flash, estimando o processo em função do tempo em microssegundos e milissegundos.

Figura 2.4 – Representação das etapas de um flash em função do tempo.



Fonte: Filho (2005)

2.2.3 Descargas Nuvem-Solo descendentes positivas

Para uma DA NS descendente positiva, os processos do flash são similares aos de uma negativa; contudo, o líder bipolar bidirecional apresenta uma luminosidade mais fraca e inicia sua propagação a partir de um centro de cargas positivas dentro da nuvem, agora com o líder descendente se comportando mais próximo de um líder contínuo, mas com variações periódicas de intensidade luminosa e propagação. No geral, essa DA ocorre próximo de pontos de contato elevados, onde há o acúmulo de cargas negativas, e é caracterizada por descargas simples (70 % dos casos), mas podendo haver mais de um ponto de contato no caso de uma descarga subsequente. Além disso, também são relacionados aos incêndios florestais e danos em pás de turbinas eólicas causados por DA, em vista de possuírem corrente contínua mais longa que as NS descendentes negativas (CAMPOS, 2007; MONTANYÀ et al., 2022; JR.; PINTO, 2000; SILVA, 2022).

2.2.4 Descargas Nuvem-Solo ascendentes

Para as DA NS ascendentes, também é observada sua formação a partir de um líder escalonado, em geral com cargas positivas na extremidade que se propaga para cima,

e também há ramificações do canal, que agora são orientadas para cima (Figura 2.5). Após a conexão de líderes, o processo se dá igual ao que foi apresentado para as NS descendentes negativas. Os raios ascendentes também tendem a formar a partir de objetos e estruturas a partir de 60 metros (SCHUMANN, 2016), assim como podem começar a se desenvolver após uma DA NS descendente, por influência do canal ionizado deixado para trás (NACCARATO, 2001; SILVA, 2022).

Figura 2.5 – Captura realizada de um raio NS ascendente partindo do Shiprock, Novo México.

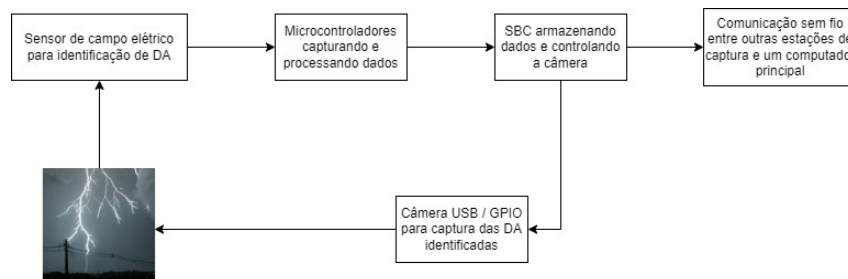


Fonte: Tang (2023)

3 METODOLOGIA

A Figura 3.1 mostra um fluxograma representativo do sistema que, a princípio, foi planejado, tendo como base o sistema de medição utilizado nas capturas do CENSIPAM, sendo essa abordagem a origem e o direcionamento para o projeto desenvolvido neste trabalho. A ideia motivadora que iniciou o projeto foi a de tornar o estudo de DA mais fácil, acessível e difundido no Brasil. Sendo assim, essa estação deveria possibilitar a captura de dados de campo elétrico e de imagens em vídeo das DA identificadas, para então armazenar e processar esses dados e, posteriormente, possibilitar a comunicação com diferentes estações e com um computador principal para estudo e comparação dos dados obtidos.

Figura 3.1 – Fluxograma da estação de captura de dados de raios para estudo acadêmico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.1 Sistema automatizado de aquisição de imagens de raios

Para o sistema construído, priorizou-se o desenvolvimento de um sistema de captura automática, partindo da captura individual de imagens. Para isso, utilizou-se a câmera USB *Global Shutter* U20CAM-9281M, que possibilita a resolução máxima de 1280x800p, um campo de visão (Field Of View - FOV) de 148°, e com taxa de captura de 120 fps, assim podendo ser aplicada para capturas de DA, cujo tempo de evento varia de milésimos de segundo até, em média, 2 segundos. A captura do *flash* é possível pois a câmera escolhida utiliza a tecnologia de *Global Shutter* (Obturador Global), ao invés da tecnologia de *Rolling Shutter* (Obturador Progressivo) normalmente utilizada em câmeras populares. Câmeras fazem uma captura de imagens com células de fotodiodos dispostos como em uma matriz, onde cada pixel da imagem é um elemento da matriz. Para a tecnologia de *Rolling Shutter*, essa captura é feita progressivamente (linha a linha, ou coluna a coluna), o que impossibilita a captura de eventos rápidos com precisão, pois, no tempo necessário para fazer a captura total da matriz, o evento pode ter se alterado, o que resulta em imagens distorcidas ou deformadas, como normalmente é visto em fotos de objetos em movimento realizadas por celular. Para a tecnologia de *Global Shutter*, é feita a captura de imagens com todos os fotodiodos simultaneamente, podendo capturar uma cena inteira registrando todos os pixels em um mesmo instante de tempo, sem distorções ou com distorções mínimas. Além do tipo de tecnologia utilizada, outras especificações do equipamento afetam o registro preciso da cena. Para câmeras do tipo *Rolling Shutter*, dependem da taxa de leitura do sensor da câmera (quão rápido a célula de fotodiodos consegue registrar uma linha) e da velocidade do evento registrado em relação a essa taxa

de leitura. Enquanto câmeras do tipo *Global Shutter*, dependem do tempo de exposição, ou *shutter speed* (quanto tempo é necessário para o obturador se manter aberto e registrar a cena completa), e, novamente, da velocidade do evento registrado em relação ao tempo de exposição. Na Figura 3.2 exemplifica-se como as distorções são visualizadas no uso dessas duas tecnologias para a captura de objetos em movimento.

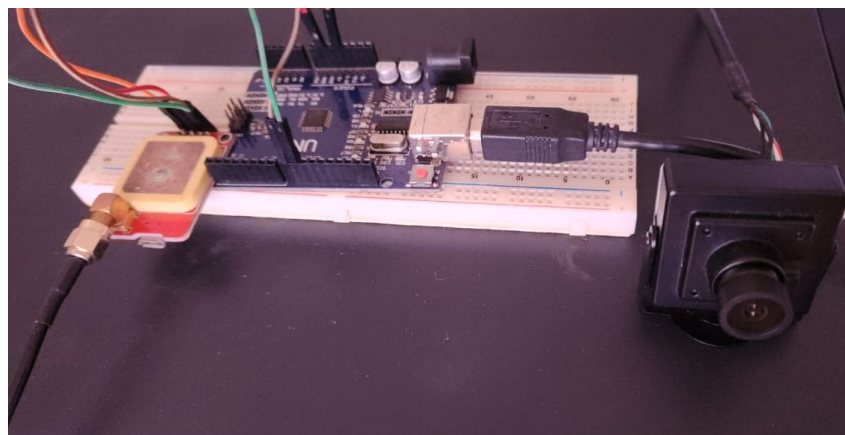
Figura 3.2 – Hélices de ventilador capturadas por *Rolling Shutter* e *Global Shutter*.



Fonte: Cotes e Juvan-Beaulieu (2020)

Para o sistema de identificação do evento, usou-se o microcontrolador Arduino UNO, que possui 14 pinos para entrada digital, 6 para entrada analógica, permite comunicação serial via USB e opera com uma frequência de 16 *MHz*, sendo capaz de trabalhar com os sinais esperados e executar operações a uma velocidade elevada. Em conjunto com o microcontrolador, usa-se um módulo GPS NEO-6M que, a partir da comunicação com satélites, permite obter o instante de tempo atual em *Coordinated Universal Time* (UTC), chamado de *timestamp*. Ao computador, cabe suprir a tensão necessária para funcionamento do sistema (saída de 5V pela comunicação USB) e executar algoritmos para realizar o processo de gravação e processamento de captura. Os componentes combinados para o protótipo são demonstrados na Figura 3.3

Figura 3.3 – Protótipo do sistema montado em bancada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

3.1.1 Processamento de multimídia com FFmpeg

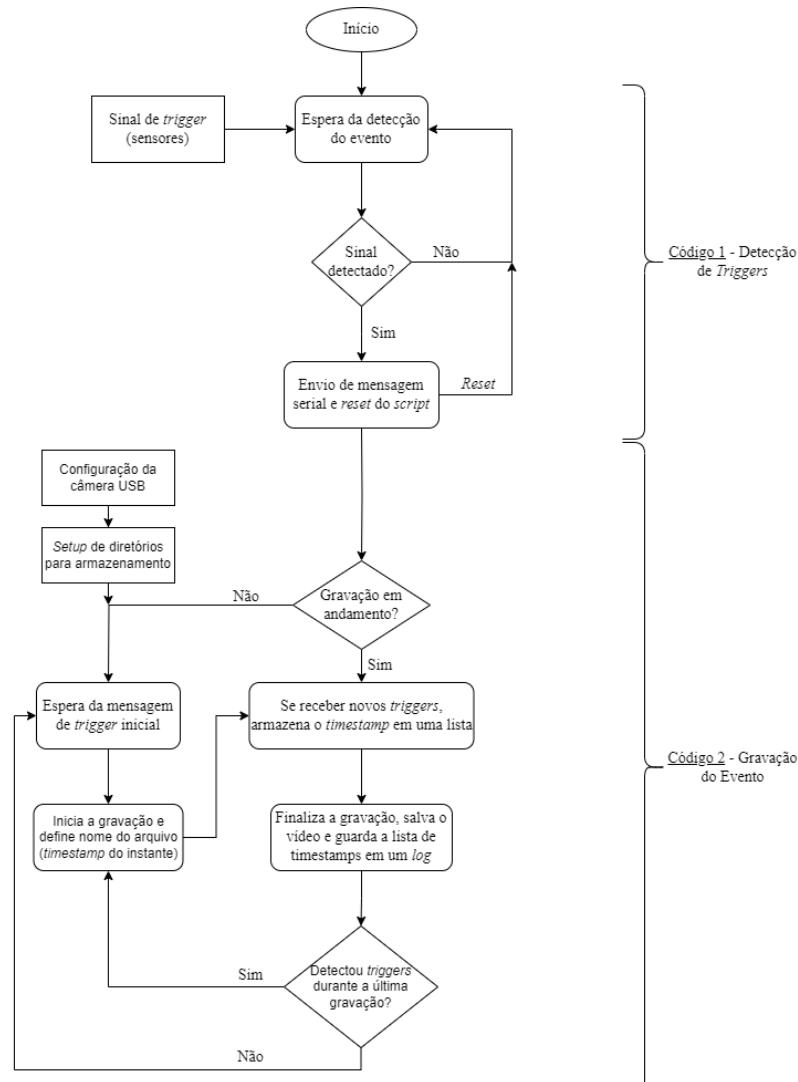
O programa em código aberto FFmpeg é uma ferramenta multimídia de ampla aplicabilidade, sendo capaz de trabalhar com áudio, imagem e vídeo, e com a possibilidade de ser executado em um sistema operacional ou em linhas de código. Dentro da biblioteca de ferramentas disponíveis, destacam-se: codificação e decodificação de áudio e vídeo; manipulação de extensões de arquivos multimídia; aplicação de filtros; processamento digital; captura de tela e de dispositivos externos; edição e *streaming* de vídeo. O uso dessa ferramenta se mostrou necessário para a captura de imagens sem atraso de processamento no código, o que permitiu atingir o número máximo de quadros por segundo da câmera (120 fps) sem perda considerável da qualidade, garantindo imagens nítidas. A aplicação do programa também garantiu a automação do processamento das capturas de vídeo e otimização do armazenamento de dados, permitindo também a extração de quadros únicos da captura para melhor análise. Mais aplicações podem ser avaliadas para englobar o uso de inteligência computacional e no sistema, em vista das vastas possibilidades de pré e pós-processamento.

3.1.2 Identificação de raios e captura de imagem

O algoritmo do Arduino UNO foi projetado para ser executado repetidamente, sempre esperando uma nova entrada. A entrada da detecção foi prevista para um sinal digital ou analógico variável, que acionará o sistema ao ser detectado um valor mínimo; para esse valor mínimo se deu o nome de *trigger*. Ao detectar um *trigger*, o microcontrolador faz uma leitura do *timestamp* do evento e envia via comunicação serial para o computador ao qual está conectado.

Da mesma forma que o Arduino, o algoritmo projetado para o computador é executado repetidamente de forma indefinida, porém, mudando as ações que devem ser realizadas de acordo com parâmetros definidos. Em uma primeira execução, o *script* configura a câmera na resolução de 1280x720p e taxa de quadros de 120 fps, utilizando a integração do programa FFmpeg à linguagem Python, e aguarda a detecção de um *trigger*. Ao ser realizada a comunicação serial sinalizando uma DA, o algoritmo inicia um processo de gravação da câmera pelo programa, salvando o *timestamp* recebido do Arduino (momento de início) e ainda lendo possíveis novas detecções enquanto continua a gravação. As gravações duram até atingir um tamanho pré-definido, escolhido para 3 GB (aproximadamente 1 hora e 26 minutos de vídeo), e caso ocorram detecções durante uma gravação, os *timestamps* dessas detecções serão salvos em um arquivo de registro chamado *"log.txt"*. A gravação é finalizada ao atingir o espaço de armazenamento definido, e uma nova gravação é iniciada imediatamente, repetindo o processo explicado. Isso foi definido tendo em vista a duração extremamente baixa de uma DA e as características dos *strokes* vistas no Subseção 2.2.2, prevendo a possível não captura ou captura parcial da primeira descarga de retorno, mas podendo capturar as descargas subsequentes ou novas DA, usando assim os *triggers* como indício de que novas descargas continuam ocorrendo. Para o caso de uma gravação ser finalizada, porém não ter sido detectado nenhum *trigger*, o script irá retornar para o processo inicial, apenas aguardando uma nova comunicação serial. Na Figura 3.4 está o fluxograma do funcionamento geral do sistema.

Figura 3.4 – Fluxograma do sistema de captura de raios desenvolvido.



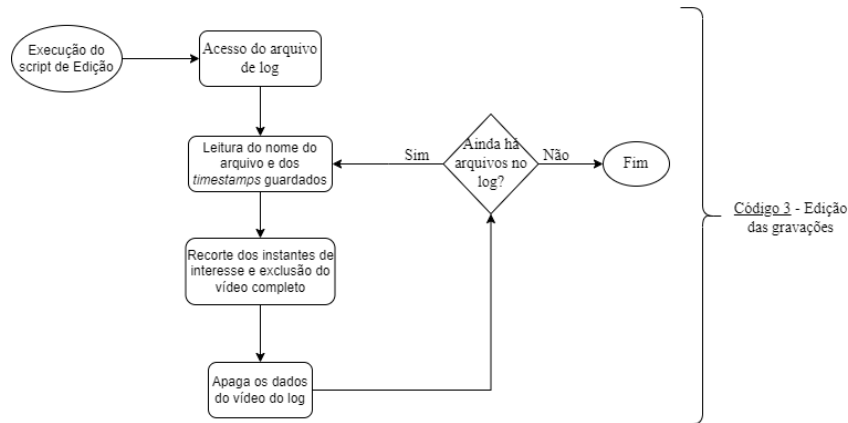
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.1.3 Processamento de captura

O arquivo de registro mencionado em Subseção 3.1.2, apesar de escrito em arquivo de texto (txt), é estruturado como um arquivo com valores separados por vírgula (csv), onde cada linha do texto é referente a um arquivo de gravação, sendo o primeiro elemento o nome do arquivo e os demais elementos os *timestamps* de *triggers* detectados durante esta gravação. O intuito de gerar o registro é, além de ter controle das capturas de forma mais flexível, poder operar as gravações automaticamente, otimizando a análise de capturas. Com um segundo *script* em Python, que é executado pontualmente quando necessário, é feita a leitura do registro linha por linha, e para cada linha é extraído o nome do arquivo e os *timestamps* de DA. Por padrão, o nome de cada arquivo é o *timestamp* do momento de início da gravação, e, usando as ferramentas do FFmpeg, pode-se fazer a diferença entre esse valor e os *timestamps* subsequentes, obtendo o instante de tempo do vídeo gravado em que outras DA foram detectadas. Com esses dados, realiza-se o acesso do arquivo da gravação e, para cada um dos instantes de tempo calculados, é feito um recorte do vídeo, começando 3 segundos antes e até 3 segundos depois do instante de *trigger*,

resultando em um clipe de 6 segundos do *flash* que é salvo em um novo arquivo. O processo é repetido automaticamente para todos os *timestamps* de um vídeo, seguindo para todos os vídeos do registro. Quando concluído, o algoritmo apaga os dados anteriores do arquivo de registro e exclui os arquivos de vídeo completos, para otimizar o espaço de armazenamento, guardando apenas os clipes de 6 segundos com os momentos relevantes. A Figura 3.5 demonstra o fluxograma do algoritmo de gestão.

Figura 3.5 – Fluxograma do algoritmo para controle do registro e de gravações.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.2 Campanha de medição de descargas atmosféricas no CENSIPAM

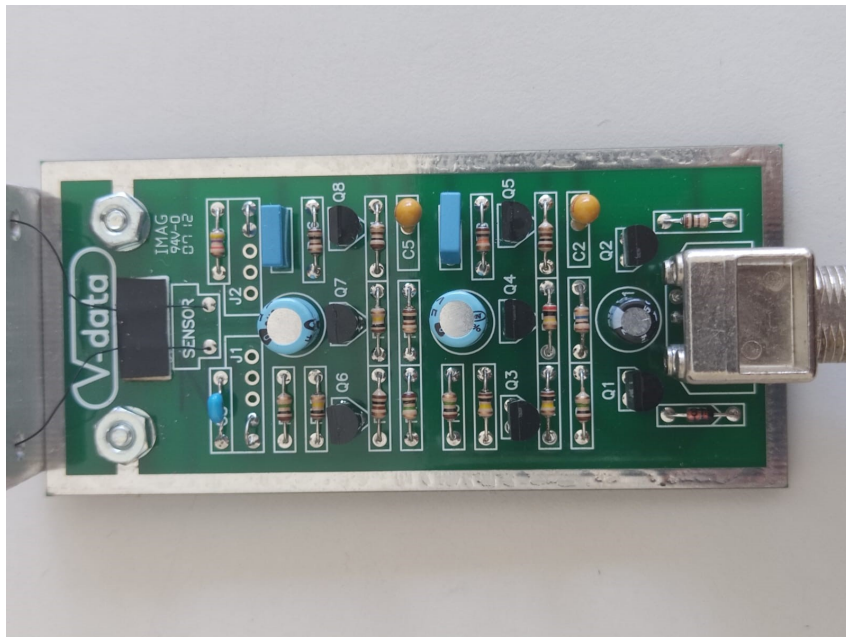
As medições realizadas são frutos de uma pesquisa do LPDA em conjunto com o INPE e o CENSIPAM, com o intuito de caracterizar os raios da região Amazônica e contribuir para o desenvolvimento de sistemas de proteção e previsão de DA. O sistema de medição, visto na Figura 3.6, é composto por uma câmera super-rápida Phantom v9.1, um sensor de intensidade luminosa, um sensor GPS NEO-6M, e um microcontrolador Raspberry Pi Pico. Este último utilizado para identificar o *trigger* pelo sensor de iluminação e capturar o *timestamp* pelo GPS. O sensor, apresentado na Figura 3.7, identifica uma alta variação da intensidade luminosa e dispara um sinal de saída, sinalizando o *trigger*, o qual, simultaneamente, é recebido pelo Raspberry e dispara a câmera. A câmera Phantom v9.1 possui *Global Shutter* e um sistema automático que finaliza uma captura após um tempo definido, dado um *trigger* de entrada, com capacidade de atingir a captura de 153846 fps, a depender da resolução de gravação. Dessa forma, a gravação obtida é referente a instantes anteriores e posteriores ao *trigger*, sendo automaticamente salva em um computador. Ao microcontrolador cabe apenas registrar o *timestamp* do instante de *trigger* em formato UTC para identificação.

Figura 3.6 – Sistema de captura de descargas atmosféricas.



Fonte: UFPA (2024)

Figura 3.7 – Sensor de intensidade luminosa.

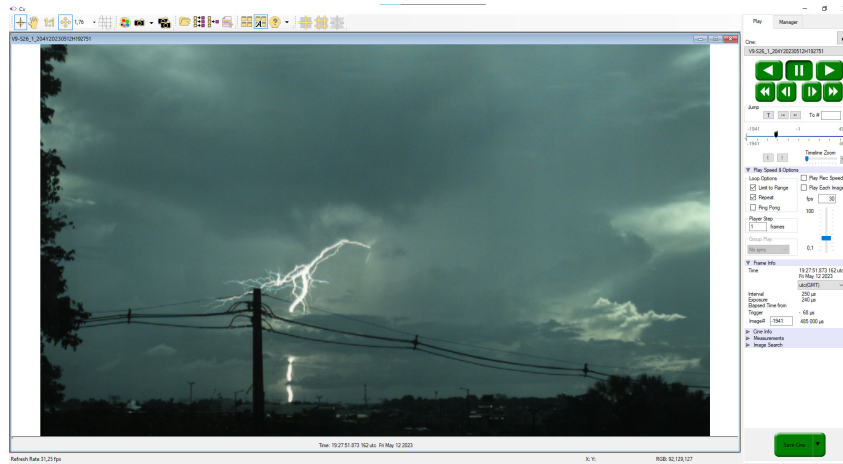


Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A análise dos vídeos é feita através do programa Phantom Camera Control disponibilizado pelo fabricante da câmera. A interface do programa, apresentada na Figura 3.8, permite assistir os vídeos de forma contínua ou 1 quadro por vez, além de variar as características da imagem, como brilho, gama e saturação, para identificar melhor a formação dos *flashes*. Os vídeos foram analisados com o uso dessas ferramentas, e posteriormente catalogados com as características que foram observadas. As cenas de interesse também podem ser salvas como imagem através do programa, para facilitar a visualização. As capturas estudadas foram gravadas no bairro de Val-de-Cães, em Belém do Pará, utilizando a resolução de 864x504 e taxa de 4000 fps. O foco de análise desse

trabalho será voltado para o aspecto de detecção e caracterização das medições realizadas no CENSIPAM.

Figura 3.8 – Interface geral do programa Phantom Camera Control.



Fonte: Autor (2025)

4 RESULTADOS

4.1 Avaliação da Captura do Protótipo

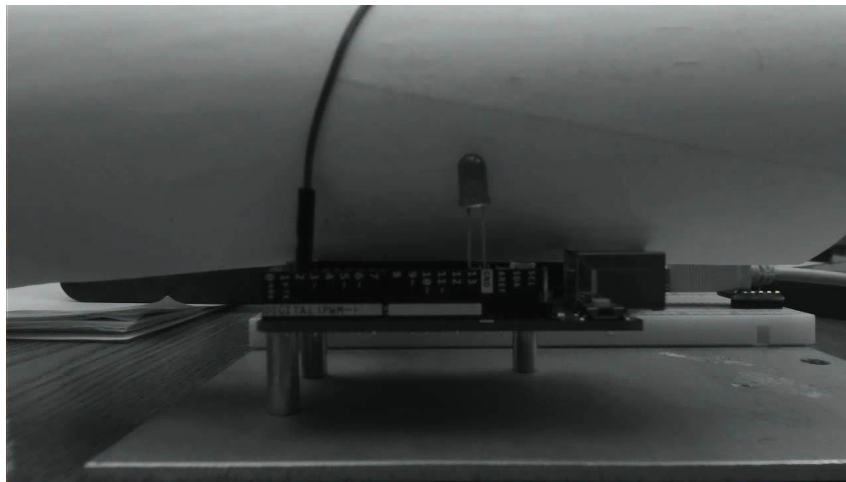
Tal qual descrito em Seção 3.1, o sistema desenvolvido foi testado sem um método de *trigger* específico para DA, de tal forma que a leitura do *trigger* pode receber sinais digitais ou analógicos com eventos bem definidos, ou seja, onde o *trigger* é facilmente diferenciável por amplitude ou duração de pulso. A avaliação da aplicabilidade do sistema levou em consideração os aspectos de:

- Captura de eventos de curta duração;
- Processamento das gravações Armazenadas;

4.1.1 Captura de eventos

Devido ao prazo de finalização deste documento, foram realizados apenas testes pontuais para identificar se os algoritmos desenvolvidos estão funcionando de forma correta. Infelizmente, na etapa atual do trabalho, não foi realizada a campanha de detecção e registro de DA, este é o objetivo do trabalho futuro a ser desenvolvido. Para simular a situação de captura, foi usado um sistema em laboratório com microcontrolador Arduino UNO e um Diodo Emissor de Luz (LED - *Light-Emitting Diode*), mostrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Captura do Arduino uno e do LED usados para testes.

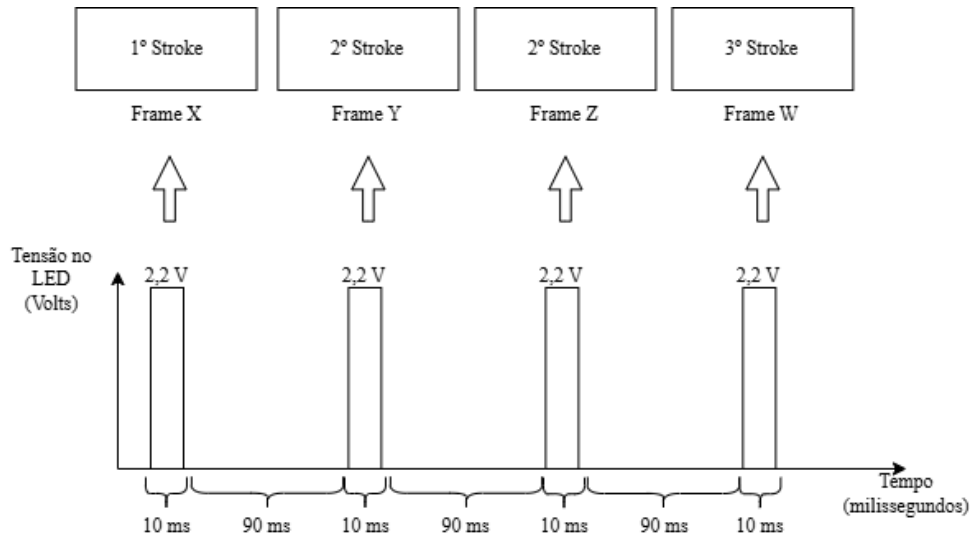


Fonte: Autor (2025).

Os componentes foram inseridos na etapa de detecção de evento, descrita na Seção 3.1, com o código sendo ajustado para operar sem aguardar um sinal de entrada e, ao invés disso, operar de forma contínua e enviar os sinais de *trigger* em intervalos de tempo definidos. Esses intervalos foram ajustados para simular uma DA com 4 *strokes* seguidos, utilizando a emissão de luz do LED no lugar do canal formado na descarga. O sinal serial de *trigger* foi ajustado para ser enviado uma vez a cada 60 segundos, iniciando a partir da primeira execução do código. No mesmo instante em que o *trigger* é sinalizado, o LED se acende por 10 *ms* e se apaga por 90 *ms*, repetindo o processo 4 vezes e se mantendo apagado na última repetição, gerando assim 4 pulsos de luz simulando os *strokes*

(Figura 4.2). Os pulsos de 10 *ms* representam os raios visíveis, enquanto o intervalo de 90 *ms* representa o intervalo entre *strokes*. Os demais aspectos do sistema microcontrolado se mantêm inalterados.

Figura 4.2 – Representação do processo de simulação do *strokes* realizado pelo código.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

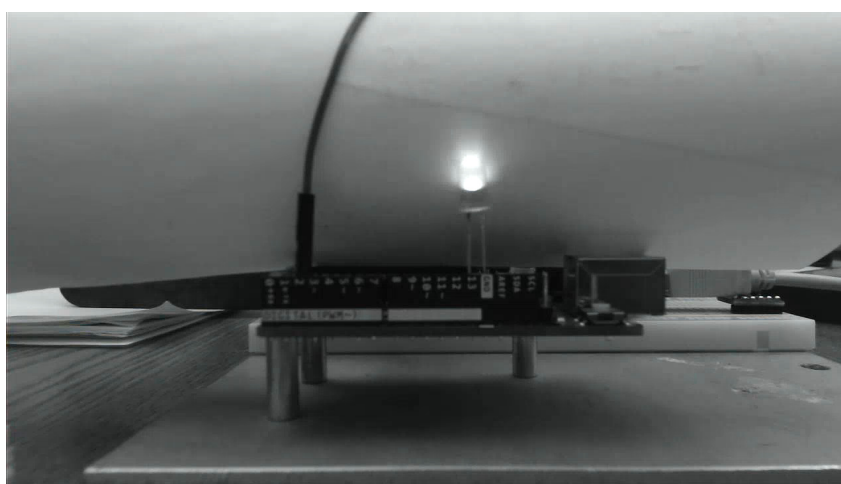
Os algoritmos para o microcontrolador e para a captura funcionam bem de forma contínua, a comunicação serial entre microcontrolador e computador se mostrou adequada e sem atrasos, assim como a detecção de *triggers* é feita durante a gravação sem interferência em ambos os processos. Foram realizadas duas gravações do sistema apresentado na Figura 4.1, uma no qual a luz do ambiente foi apagada (Figura 4.3), facilitando a visualização do LED aceso, e a outra com a luz do ambiente ligada (Figura 4.4). A primeira gravação foi acionada pelo *trigger* inicial, enquanto a segunda foi uma gravação subsequente acionada pelos *triggers* enviados durante a primeira gravação, funcionando tal qual definido no algoritmo. Foi definido um tamanho máximo de 100 *MB* para o arquivo de gravação, resultando na gravação inicial com duração de 5 minutos e 55 segundos e a gravação subsequente com duração de 5 minutos e 34 segundos. Essa diferença está relacionada à quantidade de detalhes na gravação, com a gravação feita com as luzes do ambiente apagadas (gravação inicial) consumindo menos espaço por *frame* capturado, resultando em um vídeo mais longo, enquanto o oposto ocorreu à gravação com as luzes do ambiente acesas (gravação subsequente). Com isso, obteve-se uma estimativa simples do tempo médio de captura para uma gravação de 100 *MB*, que foi de aproximadamente 5 minutos e 45 segundos, considerando os dois casos ilustrados.

Figura 4.3 – LED aceso na gravação com o ambiente escuro.



Fonte: Autor (2025).

Figura 4.4 – LED aceso na gravação com o ambiente claro.



Fonte: Autor (2025).

Ao fim do processo de gravação obteve-se uma filmagem em resolução 1280x720 e 120 fps, o que equivale à captura de 1 *frame* a cada 8,33 *ms*. Pelo algoritmo usado para controlar o brilho do LED, o período total de uma repetição é de 100 *ms* com ciclo de trabalho de 10 % (10 *ms* ligado e 90 *ms* desligado), o que indica que, com a velocidade de captura definida, o sistema é capaz de registrar de 1 a 2 *frames* do *stroke* simulado e de 10 a 11 *frames* do período entre *strokes*. Essa estimativa foi confirmada ao avaliar cada *frame* da gravação, representado na Figura 4.5, onde o nome do arquivo indica o índice do *frame* (iniciando em 0). A avaliação dos *frames* se mostrou promissora para a aplicação da gravação de DA, com a possibilidade de detecção do ponto de maior luminosidade do *stroke*, além dos *frames* de formação e dissipação.

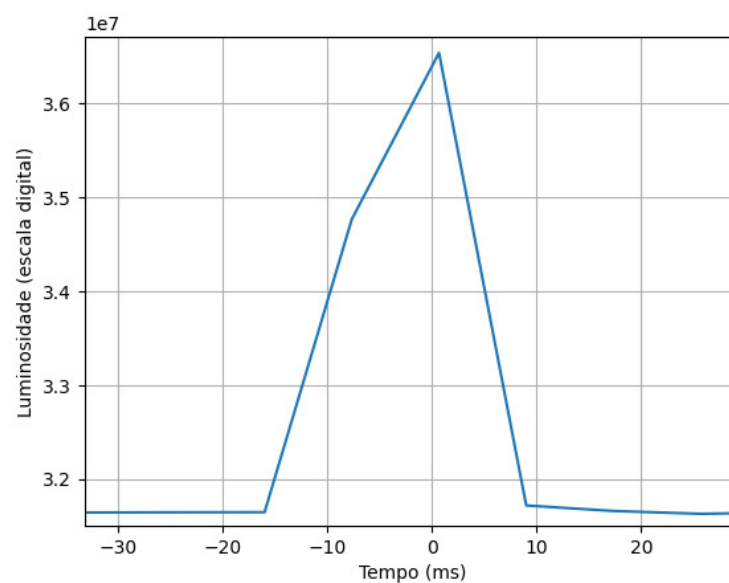
Figura 4.5 – *Frames* para um registro de *trigger* referente à 4 *strokes* (Os pares de *frames* com pontos claros são aqueles em que o LED está aceso. Entre esses pares há uma sequência de 10 *frames* com o LED apagado).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

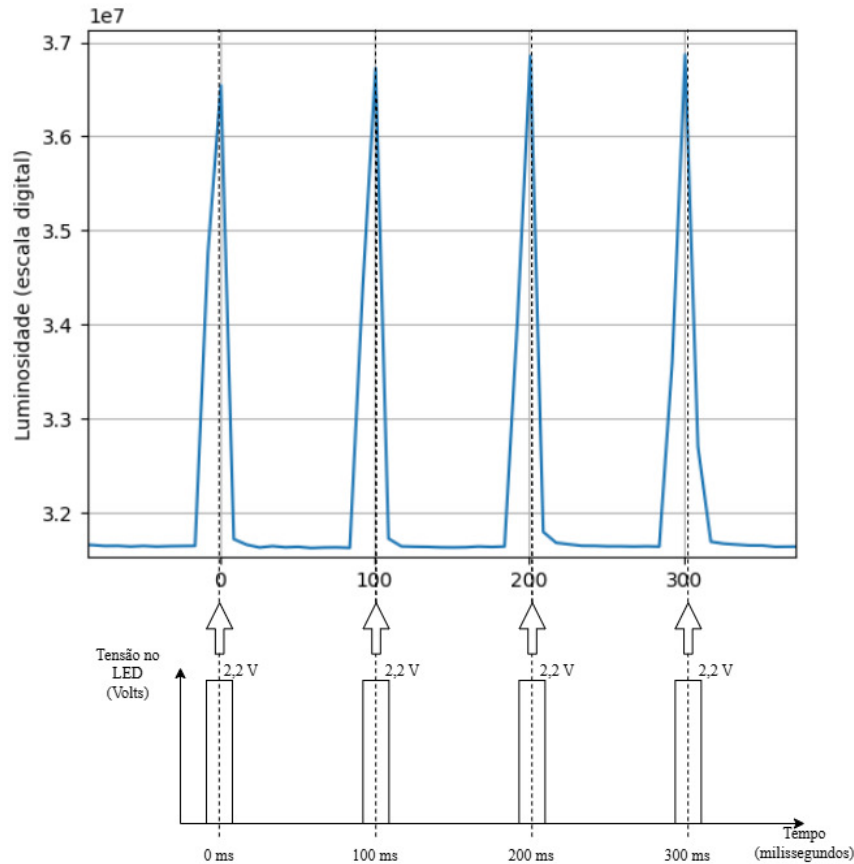
Também foi utilizado um código auxiliar para analisar de forma automática todos os *frames* e identificar aqueles com maior intensidade luminosa, mostrado na Figura 4.6 e na Figura 4.7, para tentar identificar os pontos de brilho do LED. Com os resultados, comprovou-se a assertividade da detecção dos instantes de *trigger* e a estimativa de capturas em relação ao período de operação do LED.

Figura 4.6 – Verificação dos *frames* do primeiro *trigger* (Eixo do tempo ajustado para aproximar o primeiro *stroke* da referência ($t = 0$). O Primeiro *frame* com mais luminosidade está no instante $t = -8,33 \text{ ms}$; o *frame* com maior intensidade luminosa está no instante $t = 0 \text{ ms}$).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 4.7 – Relação dos 4 primeiros *strokes* detectados (eixo do tempo ajustado) com a proposta de simulação do LED.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Posteriormente, a captura é armazenada em um diretório definido, juntamente com o arquivo de *log*, esse último sendo corretamente preenchido com os dados de *trigger* das gravações, sem influenciar os dados já existentes anteriormente no arquivo. Ao todo foram detectados 6 *triggers* em cada uma das gravações, onde o primeiro *trigger* da gravação inicial é o *trigger* de detecção inicial, já sendo esperado que este não seja capturado em vídeo (Subseção 3.1.2), e todos os demais foram *triggers* detectados durante a gravação. Na Figura 4.8 é mostrada uma planilha usada para importar e analisar os dados do arquivo de *log*, caracterizando qual o arquivo de vídeo, os *timestamps* dos *triggers* detectados em UTC, o número de *triggers* perdidos na gravação, o intervalo de tempo entre *triggers*, a média do tempo entre *trigger*, e o erro médio do tempo entre *trigger* em segundos e em porcentagem.

Figura 4.8 – Planilha com dados importados do *log* de gravações.

Vídeo title	Triggers						Perda (triggers)
Events\2025-03-22 02-35-48.mp4	2025-3-22 2-35-47	2025-3-22 2-36-47	2025-3-22 2-37-48	2025-3-22 2-38-48	2025-3-22 2-39-48	2025-3-22 2-40-49	1
Events\2025-03-22 02-41-45.mp4	2025-3-22 2-41-49	2025-3-22 2-42-50	2025-3-22 2-43-50	2025-3-22 2-44-50	2025-3-22 2-45-51	2025-3-22 2-46-51	0
Vídeo title	Intervalo entre triggers em segundos					Média	Erro Médio
Events\2025-03-22 02-35-48.mp4	60	61	60	60	61	60,4	0,4 segundos
Events\2025-03-22 02-41-45.mp4	61	60	60	61	60	60,4	0,67%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Como já mencionado para o *trigger* inicial, percebe-se que há um atraso de 1 segundo entre sua comunicação serial e o início da gravação, onde sua identificação UTC é "2-35-47" e o início da gravação é identificado como "2-35-48", o que explica a ausência de sua detecção. Todos os demais instantes de *trigger* foram condizentes com o momento em que o LED se ascende na sua primeira repetição, e para cada um dos arquivos de vídeo foi calculado um tempo médio entre os *triggers* de 60,4 segundos, bem próximo dos 60 segundos definidos. Considerando todos os intervalos de tempo calculados, obteve-se um erro médio de 0,67 % (0,4 segundos), o que também indica uma proximidade ao esperado. Essa avaliação indica um atraso de comunicação serial pouco relevantes, contudo, importantes para aperfeiçoar a aplicação do protótipo em eventos muito rápidos, podendo o erro ser amenizado com o uso de um *timestamp* com margem até milissegundos.

Alguns pontos de ajuste impediram o maior desenvolvimento do projeto, como problemas de compatibilidade de *driver* da câmera utilizada com o computador, o que impossibilitou progredir os testes como desejado para o projeto, em vista que seu funcionamento foi limitado e imprevisível, permitindo apenas poucos momentos de captura em laboratório. Contudo, os resultados obtidos são promissores e corroboram para o objetivo de pesquisas acessíveis objetivado para o projeto. Além disso, os testes feitos indicam um consumo de hardware moderado, o que se enquadra ao objetivo de usar SBC para controle do sistema, com um *Raspberry Pi 4* de 4 GB trabalhando com 70 % a 90 % de uso de hardware, e um *Raspberry Pi 5* de 8 GB trabalhando abaixo de 60 % de uso. Futuramente, pretende-se explorar o uso de outros módulos de câmera mais estáveis.

4.1.2 Processamento de gravações armazenadas

Os testes com processamento se mostraram efetivos, sendo necessário apenas a execução do *script* desenvolvido para que todas as gravações registradas (que ainda não foram processadas) sejam editadas e armazenadas em arquivos menores e específicos para cada *trigger* identificado, enquanto a gravação original é excluída. Ao ser executado para processar as duas gravações apresentadas anteriormente, o código demorou aproximadamente 12 segundos e gerou 6 clipes para cada gravação (1 para cada *trigger* registrado no *log*), assim, processando um clipe a cada 2 segundos. Na Figura 4.9 é mostrada a planilha com dados dos *triggers* incrementada com as estatísticas de processamento, onde é apresentado o tamanho de cada arquivo processado em *megabytes* (MB) e a porcentagem de quantos MB de armazenamento são preservados após o processamento.

Figura 4.9 – Planilha com dados do *log* e dados de pós-processamento.

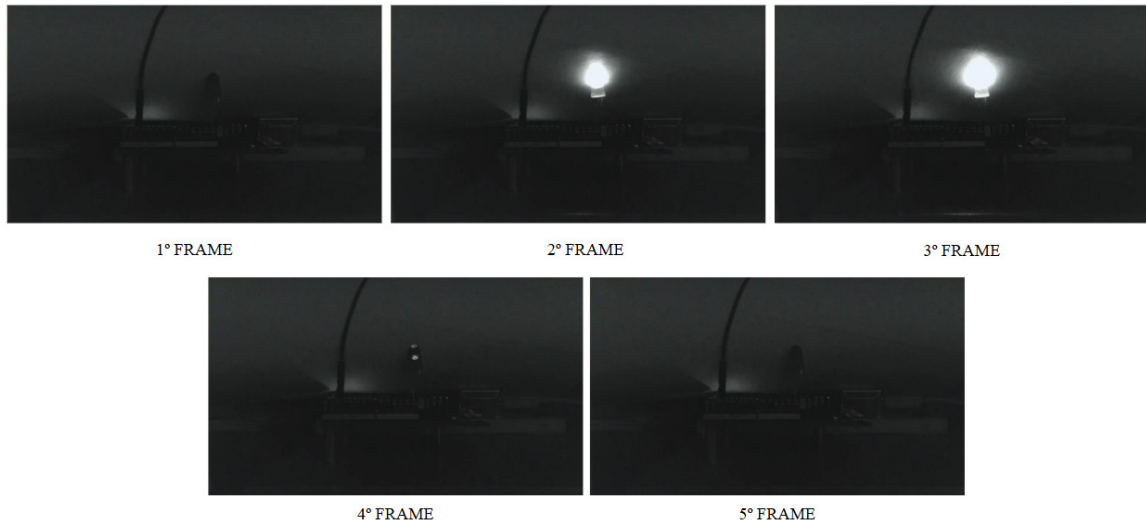
Video title	Triggers						Perda (triggers)
Events\2025-03-22 02-35-48.mp4	2025-3-22 2-35-47	2025-3-22 2-36-47	2025-3-22 2-37-48	2025-3-22 2-38-48	2025-3-22 2-39-48	2025-3-22 2-40-49	1
Events\2025-03-22 02-41-45.mp4	2025-3-22 2-41-49	2025-3-22 2-42-50	2025-3-22 2-43-50	2025-3-22 2-44-50	2025-3-22 2-45-51	2025-3-22 2-46-51	0
Video title	Intervalo entre triggers em segundos					Média	Erro Médio
Events\2025-03-22 02-35-48.mp4	60	61	60	60	61	60,4	0,4 segundos
Events\2025-03-22 02-41-45.mp4	61	60	60	61	60	60,4	0,67%
Video title	Tamanho dos arquivos de trigger pós-processamento (MB)						Redução Total de MB (%)
Events\2025-03-22 02-35-48.mp4	2,5	2,11	2,1	2,15	2,16	2,37	86,61%
Events\2025-03-22 02-41-45.mp4	2,38	2,35	2,35	2,46	2,28	2,28	85,90%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Como definido no algoritmo, cada clipe tem duração de 6 segundos, com o objetivo de pegar os 3 segundos anteriores e os 3 posteriores de um *trigger*. Mais uma vez foi feita a avaliação dos *frames* um a um, agora para os clipes pós-processamento, onde verificou-se a totalidade de 720 *frames* por clipe, equivalente aos 120 fps por 6 segundos definidos. Na

Figura 4.10 é demonstrada uma sequência de *frames* referentes a um dos *strokes* simulados e sua progressão no clipe. Os resultados corroboram com o que foi visto anteriormente, onde é possível perceber 3 *frames* registrando o *stroke* simulado, e ressaltam a possibilidade de melhor desenvolvimento do sistema para aplicação no registro de DA reais.

Figura 4.10 – Sequência de *frames* da simulação de *stroke* com o LED.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A média de espaço de armazenamento dos arquivos da gravação inicial foi de 2,23 MB, enquanto para a gravação subsequente foi de 2,35 MB, o que já era esperado pela diferença de detalhes em cada gravação. Cada arquivo equivale de 2,1 % a 2,4 % do arquivo original, enquanto a porcentagem de armazenamento total preservado calculada na planilha foi de 86,61 % e 85,90 % para a primeira e segunda gravação, respectivamente. Uma terceira gravação de uma cena estática foi realizada em laboratório, definido para o tamanho de 3 GB, para avaliar a redução de armazenamento. A gravação registrou o tempo de 2 horas, 57 minutos e 55 segundos. Os vídeos processados ficaram com tamanho médio de 3,5 MB, o que indica a preservação de 99,88 % do espaço originalmente consumido nesse caso. Além disso, o espaço de uma única captura equivale ao espaço de aproximadamente 878 vídeos processados, sendo necessário 878 *strokes* em um único registro para que os vídeos processados atingissem os mesmos 3 GB do vídeo original, mostrando que o resultado é fundamental para a otimização de um sistema com alto volume de dados.

4.2 Campanha de medições no CENSIPAM

Os vídeos capturados na estação do CENSIPAM foram analisados e organizados em uma planilha, onde foram explicitadas características observadas, como: tipo de descarga (NS descendente e IN), pontos de contato com o solo, descargas de retorno e duração em milissegundos. As características analisadas foram apresentadas na Subseção 2.2.2. Um registro de DA NS descendente é mostrado na Figura 4.11, e um registro de DA IN é mostrado na Figura 4.12.

Figura 4.11 – Descarga nuvem-solo descendente capturada em vídeo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 4.12 – Descarga intranuvem capturada em vídeo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na Figura 4.13 observa-se no cabeçalho, escrito em inglês, os seguintes elementos em ordem: local de registro; modelo da câmera utilizada; tipo de descarga (*downward* referente à descendente, e *intra-cloud* referente à intra-nuvem); ano de registro; mês de registro; dia de registro; hora de registro; minuto de registro; segundo de registro; índice do *frame* do *stroke* no programa; índice do ponto de contato da descarga; índice do *stroke* referente ao ponto de contato; duração do *stroke*. O índice de ponto de contato serve para identificar com quantos pontos o *flash* se conectou, enquanto os índices de *strokes* servem para identificar quantos *strokes* atingiram um mesmo ponto de contato. Também pode-se observar que alguns espaços da tabela de dados estão preenchidos com "X", isso foi feito quando o evento não é totalmente visível na gravação ou quando a definição da característica referente não é exata (Figura 4.14). Além disso, as colunas *milisecond* e *microsecond* (milissegundos e microssegundos, respectivamente) não foram utilizadas, pois não foi possível fazer o registro de DA com margem de tempo abaixo de segundos. Foram

estudados 47 vídeos referentes ao período de 9 de março até 3 de novembro do ano de 2023. A partir do agrupamento estatístico desses dados, foi possível comparar a relação observada no CENSIPAM com diferentes localidades já estudadas na literatura.

Figura 4.13 – Organização em planilha das capturas de descargas estudadas.

Local	Camera	Type	Year	Month	Day	Hour	Minute	Second	Millisecond	Microsecond	Frame	Contact Point	Stroke Order	CC (ms)
Belém	V9.1	X	2023	3	9	18	2	58	X	X	4	1	1	1
Belém	V9.1	X	2023	3	9	18	2	58	X	X	75	1	2	X
Belém	V9.1	downward	2023	3	9	18	2	58	X	X	358	2	3	24
Belém	V9.1	X	2023	3	9	18	2	58	X	X	501	1	4	X
Belém	V9.1	X	2023	3	9	18	2	58	X	X	564	1	5	1
Belém	V9.1	X	2023	3	9	18	2	58	X	X	840	1	6	1
Belém	V9.1	X	2023	3	9	18	2	58	X	X	1009	1	7	3
Belém	V9.1	intra-cloud	2023	4	17	16	2	37	X	X	-1579	X	X	2
Belém	V9.1	intra-cloud	2023	4	17	16	2	37	X	X	-1395	X	X	7
Belém	V9.1	intra-cloud	2023	4	17	16	2	37	X	X	-863	X	X	8
Belém	V9.1	downward	2023	4	17	16	2	38	X	X	0	1	1	15
Belém	V9.1	intra-cloud	2023	4	17	16	2	38	X	X	482	X	X	54
Belém	V9.1	downward	2023	4	22	21	51	19	X	X	-1	1	1	3
Belém	V9.1	downward	2023	4	24	13	36	10	X	X	-1	1	1	13
Belém	V9.1	downward	2023	4	24	13	36	10	X	X	403	1	2	21
Belém	V9.1	downward	2023	4	24	13	36	10	X	X	639	1	3	5
Belém	V9.1	downward	2023	4	24	13	36	10	X	X	816	1	4	143
Belém	V9.1	downward	2023	4	24	13	36	10	X	X	1432	1	5	4
Belém	V9.1	downward	2023	4	24	13	37	36	X	X	-1	1	1	14
Belém	V9.1	downward	2023	4	24	13	37	36	X	X	271	1	2	9
Belém	V9.1	downward	2023	4	24	13	37	37	X	X	436	1	3	4
Belém	V9.1	downward	2023	4	24	13	37	37	X	X	687	1	4	7
Belém	V9.1	downward	2023	4	24	13	37	37	X	X	835	1	5	75
Belém	V9.1	downward	2023	4	24	13	37	37	X	X	1346	1	6	5
Belém	V9.1	downward	2023	4	24	13	37	37	X	X	1584	1	7	14
Belém	V9.1	downward	2023	4	24	13	37	37	X	X	1732	1	8	281
Belém	V9.1	downward	2023	5	1	15	45	31	X	X	0	1	1	44
Belém	V9.1	downward	2023	5	1	15	45	31	X	X	532	1	2	95
Belém	V9.1	downward	2023	5	1	15	45	31	X	X	1742	1	3	83
Belém	V9.1	downward	2023	5	2	16	27	51	X	X	-1	1	1	16
Belém	V9.1	intra-cloud	2023	5	2	16	27	51	X	X	150	X	1	3
Belém	V9.1	intra-cloud	2023	5	2	16	27	51	X	X	241	X	2	7
Belém	V9.1	intra-cloud	2023	5	2	16	27	51	X	X	310	X	3	6
Belém	V9.1	intra-cloud	2023	5	2	16	27	51	X	X	365	X	4	11
Belém	V9.1	downward	2023	5	2	16	27	51	X	X	430	2	1	8
Belém	V9.1	downward	2023	5	2	16	27	52	X	X	598	1	2	26

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 4.14 – Momento de captura de DA sem visibilidade do canal.



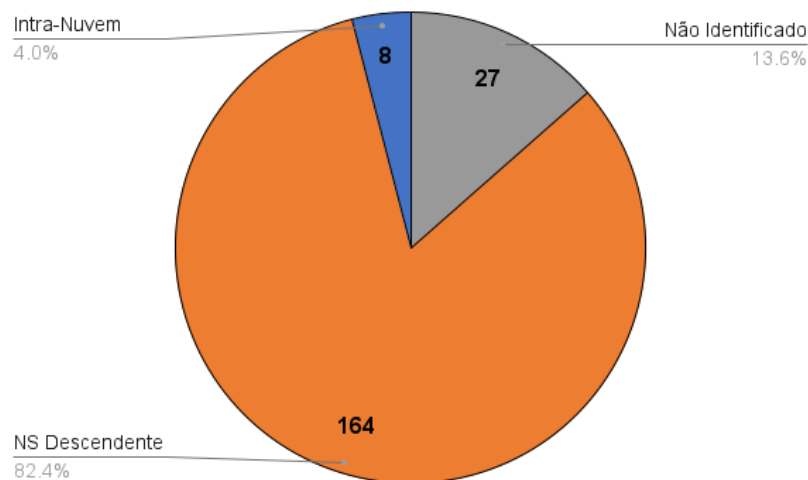
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2.1 Classificação dos tipos de descarga

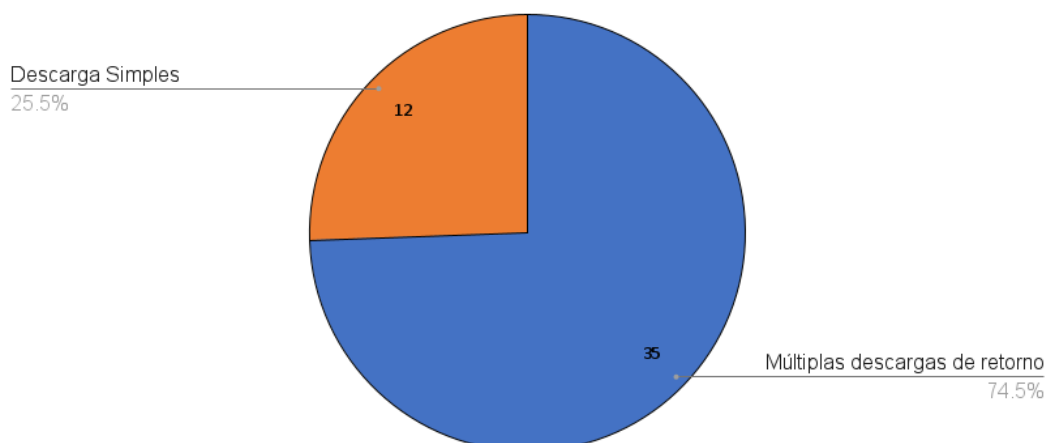
Os dados estudados totalizam 47 *flashes* e 199 descargas, das quais 82,4 % são descargas NS descendentes e 4 % são pulsos de descargas IN que ocorrem durante o *flash*. Aos 13,6 % restantes, referem-se às descargas que não foram capturadas corretamente pela câmera, por isso, são inconclusivas ou não visíveis (Figura 4.15). É evidente que esse valor elevado também se dá pela natureza do sistema usado para capturas, a qual é mais apta à

captura de descargas NS, contudo, essa estatística chama a atenção para estudos futuros, ainda mais ao considerar que também foi possível registrar DA do tipo IN com a estação. Do total de *flashes* registrados, identificou-se 187 contatos com o solo, dos quais foi possível caracterizar 12 *flashes* de descargas simples (25,5 %) e 35 *flashes* com descargas de retorno subsequentes (74,5 %), como mostrado na Figura 4.16. Essa estatística se aproxima do observado por Leal et al. (2021) na região de Belém, onde 30 % das descargas NS estudadas foram identificadas como descargas simples. Estudos mostram que de 19,5 % até 21 % das descargas em regiões tropicais são descargas simples (RAKOV; UMAN, 2003; COORAY; JAYARATNE, 1994), o que está relativamente abaixo do observado nesses estudos. Belém se encontra em uma região tropical úmida, e suas DA são fortemente influenciadas pelo inverno amazônico, corroborando para valores mais elevados nessa análise. Estudos no estado de Johor na Malásia, região majoritariamente tropical superúmido, indicam uma média de descargas simples de 27 %, que supera o presente estudo e se aproxima a estudos anteriores em Belém, o que é esperado devido ao tipo de clima tropical das duas regiões (WOOI et al., 2016). Esta aproximação apresenta um ponto de análise importante para a região Amazônica, pois a característica climática de Johor é marcada por chuvas o ano todo, e ainda assim os estudos da região de Belém se aproximam estatisticamente do que é observado em Johor. Esses fatores não são definitivos, mas fortalecem a necessidade de desenvolver mais estudos na região amazônica.

Figura 4.15 – Contagem de descargas divididas por classificação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

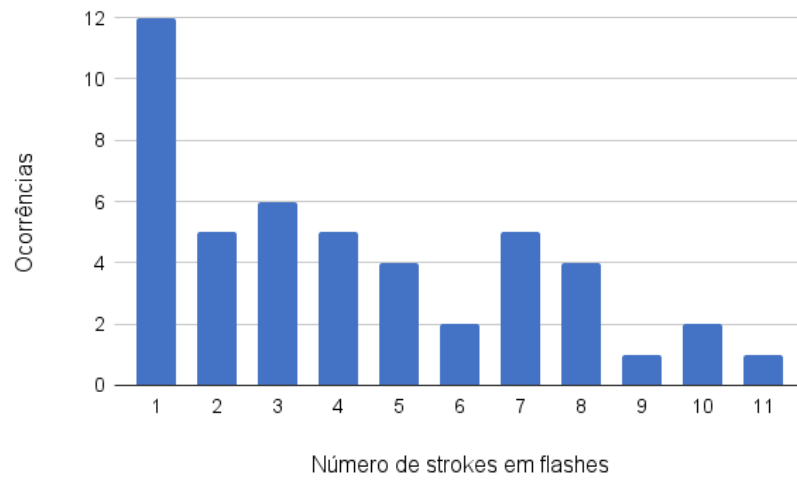
Figura 4.16 – Total de *flashes* com descargas simples e com múltiplas descargas de retorno.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2.2 Número de *strokes* registrados por *flashes*

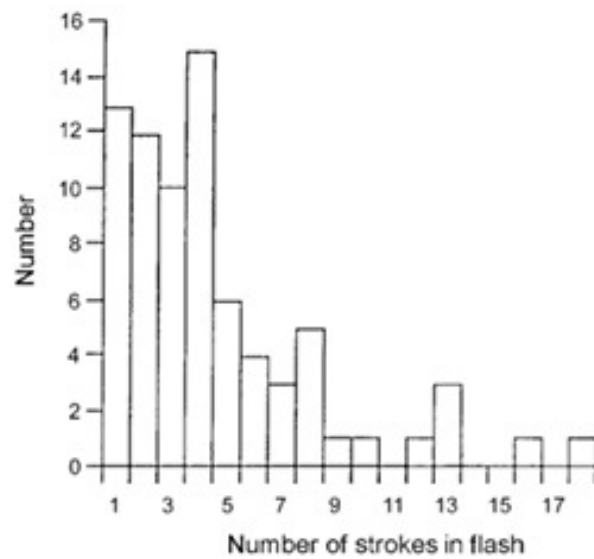
No histograma da Figura 4.17 pode-se observar a distribuição geral do número de *strokes* em cada *flash* analisado, excluindo as descargas IN, com uma média de 4,23 *strokes* por *flash*, e uma máxima de 11 *strokes*. Essa análise se aproxima dos estudos feitos por Rakov e Uman (1990) com 76 *flashes* registrados na Flórida, onde a média obtida foi de 4,6 *strokes* por *flash* com máxima de 18 *strokes* (Figura 4.18), e pelo estudo de Cooray e Jayaratne (1994) na região tropical do Sri Lanka, onde obteve-se uma média de 4,5. Contudo, o estudo contrasta com a média de 6,4 obtida por Brook, Kitagawa e Workman (1962) com 83 *flashes* registrados no Novo México, e máxima de 26 *strokes* (Figura 4.19). Estudos anteriores em Belém também indicam uma média inferior à obtida, de aproximadamente 3,1 (LEAL et al., 2021), e máxima relativa próxima de 19 *strokes* (Figura 4.20). A diferença entre os valores obtidos em Leal et al. (2021) e o presente estudo pode estar relacionada ao uso de diferentes instrumentos na coleta de dados de DA. Em Leal et al. (2021) eles usaram medição do campo elétrico (ondas de rádio), enquanto nesse trabalho foi utilizado registro óptico. Em vista disso, uma comparação direta não é indicada. Já o Novo México, por possuir um clima subtropical seco, é de se esperar uma média menor em comparação aos outros locais, o que pode ser um indicativo da diferença de *flashes* analisados em cada estudo, assim como outras características climáticas, o que ressalta a necessidade de um número de registros maior para melhor avaliar o conjunto de dados. Não obstante, o padrão da distribuição de dados no histograma se assemelha àqueles dos estudos anteriores, o que indica uma análise concisa para o conjunto de registros atual.

Figura 4.17 – Histograma da contagem de *strokes* por *flash* (média: 4,23).



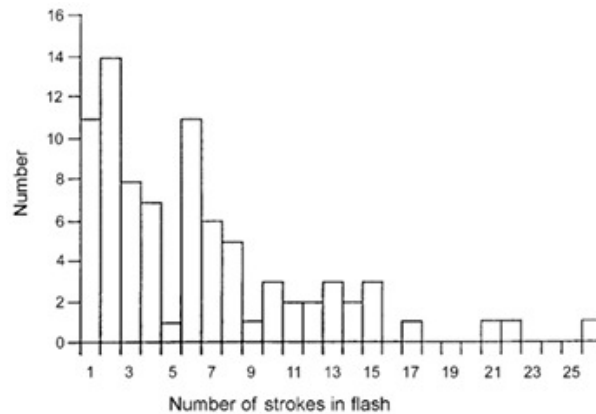
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 4.18 – Contagem de *strokes* por *flash* na Flórida (média: 4,6).



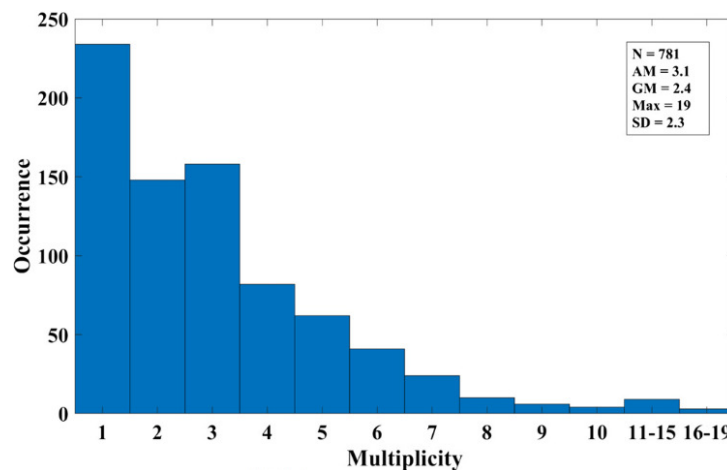
Fonte: Adaptado de Rakov e Uman (1990).

Figura 4.19 – Contagem de *strokes* por *flash* no Novo México (média: 6,4).



Fonte: Adaptado de Brook, Kitagawa e Workman (1962).

Figura 4.20 – Contagem de *strokes* por *flash* em Belém (média: 3,1).



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

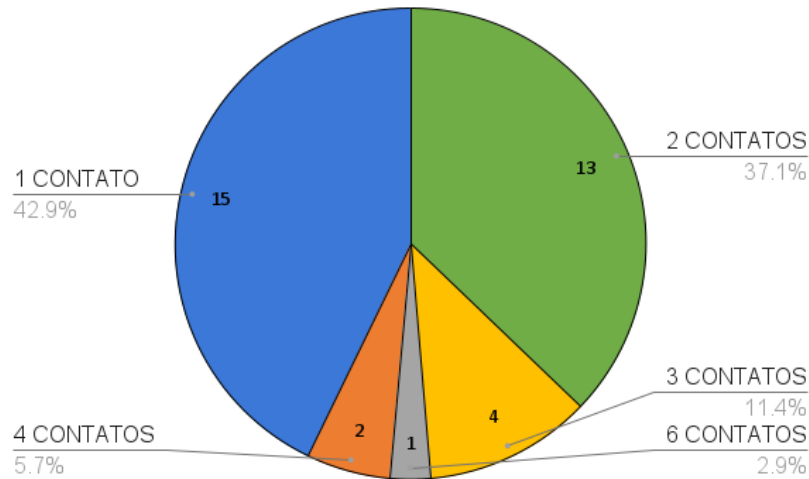
Demais estudos no Brasil apontam a média de *strokes* por *flash* de 3,8 até 4,6, a menor média referente ao estado de São Paulo, e a maior média, e mais próxima ao presente estudo, referente ao Vale do Paraíba (BALLAROTTI et al., 2012; SABA; BALLAROTTI; JR., 2006; SARAIVA et al., 2010). O clima predominante no Vale do Paraíba é mesotérmico úmido com fortes chuvas no verão, porém, a região tem forte influência da Alta Subtropical do Atlântico durante o ano todo, o que dificulta a formação de nuvens Cb. A aproximação dos dados apresentados chama a atenção para ambos os estudos, do Vale do Paraíba e o presente estudo de Belém, para correlacionar os fatores que influenciam na média de *strokes* por *flash* ser aproximada nestas localidades.

4.2.3 Pontos de contato com o solo por *flash*

Na Figura 4.21 é mostrado que foram identificadas 15 DA onde as descargas de retorno atingiram um único ponto de contato (42,9 %), 13 DA que atingiram 2 pontos de contato (37,1 %), 4 DA que atingiram 3 pontos de contato (11,4 %), 2 DA que atingiram 4 pontos de contato (5,7 %) e 1 DA que atingiu 6 pontos de contato (2,9 %). Na Figura 4.22

é mostrado um registro feito de um *flash* que, com base na taxa de captura da câmera, aparenta ter 2 canais simultâneos de alta intensidade, assim, com dois pontos de contato simultâneos.

Figura 4.21 – Quantidade de *flashes* dividido por ponto de contato.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 4.22 – *Flash* com dois canais simultâneos.



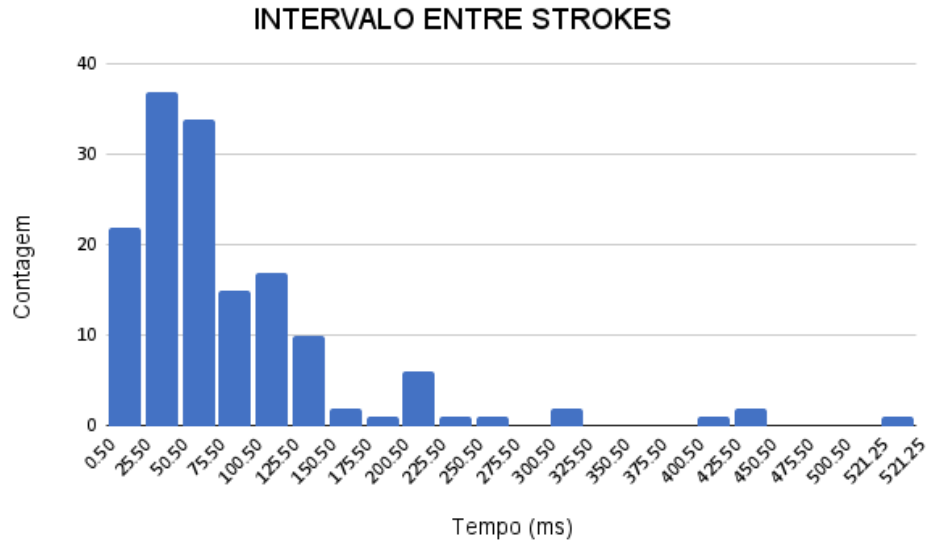
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2.4 Intervalo entre *strokes*

O tempo em milissegundos entre *strokes* apresentado na Figura 4.23 foi calculado utilizando os registros da câmera, que tem um intervalo mínimo de 0,25 *ms* por *frame* de vídeo. A média aritmética calculada foi de 86,26 *ms*, com mínima de 0,5 *ms* e máxima de 521,25 *ms*. A distribuição dos dados no histograma se aproxima de estudos da região (Figura 4.24), assim como a média aritmética, a qual é de aproximadamente 90 *ms* (LEAL et al., 2021). Estudos na região sudeste do Brasil, realizados por Saba, Ballarotti e Jr. (2006) e Ballarotti et al. (2012), apontam intervalo médio de 83 *ms* e 92 *ms*, respectivamente,

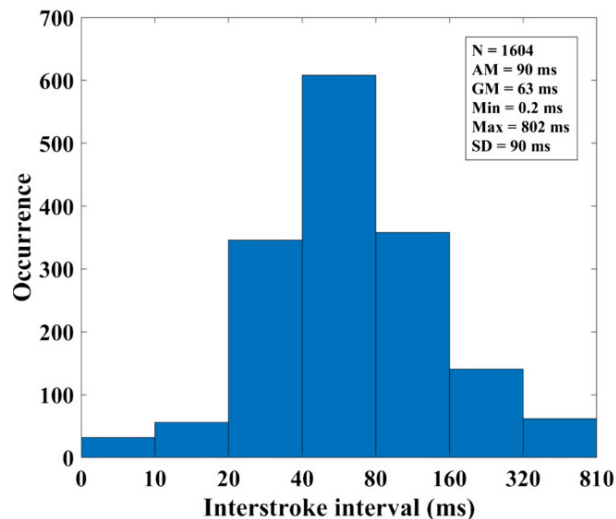
enquanto Zhu et al. (2015) identificaram um intervalo médio de 80 *ms* na Flórida. Todos os estudos apontam para valores próximos, sem grandes variações referentes ao clima ou localização geográfica, assegurando a acurácia dessas análises obtidas com os dados capturados e indicando alinhamento com os dados literários.

Figura 4.23 – Histograma do tempo entre *strokes* (média: 86,26 *ms*).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 4.24 – Tempo entre *strokes* em Belém (média: 90 *ms*).



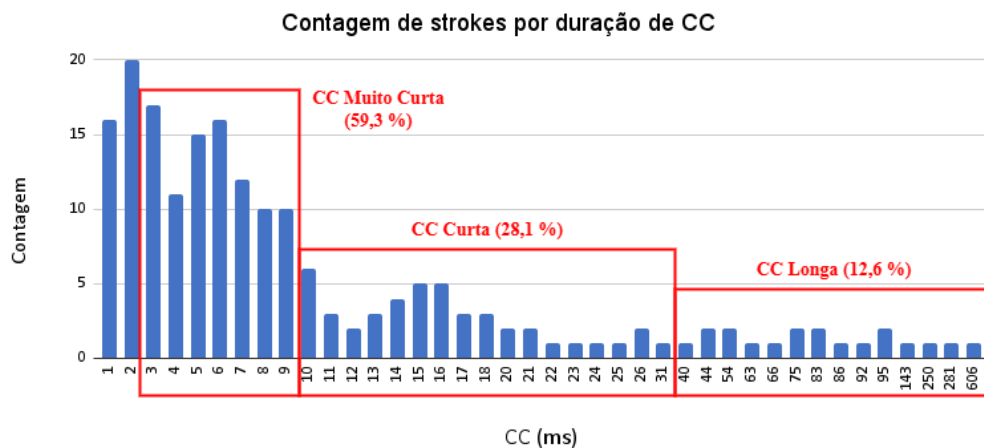
Fonte: Adaptado de Leal et al. (2021).

4.2.5 Duração de *strokes* e de corrente contínua

A duração das descargas caracterizadas foi definida pelo intervalo visível da descarga em vídeo, sendo limitado pelo campo de visão e pela taxa de captura da câmera. A partir das análises realizadas, mostrada na Figura 4.25, obteve-se uma duração média

de 19,037 *ms*, onde foi observada a descarga mais rápida com apenas 1 *ms* de duração, e a mais longa com 606 *ms*. Segundo estudo feito por Stolzenburg et al. (2022), a duração média das DA na América do Norte varia entre 15 *ms* e 22 *ms*, o que se equipara ao presente estudo. A duração da DA visível está diretamente relacionada ao fluxo de corrente contínua (CC) passando pelo canal iônico, a qual é dividida em CC de longa duração (acima de 40 *ms*), CC de curta duração (entre 10 e 40 *ms*) e CC de duração muito curta (entre 3 e 10 *ms*) (SHINDO; UMAN, 1989; BALLAROTTI; SABA; JR., 2005). Considerando os *strokes* com duração superior ou igual a 3 *ms*, a média de CC calculada foi 23 *ms*, com mínima de 3 *ms* e máxima de 606 *ms*. Segundo (MATOS; LEAL; SABA, 2023) a média obtida em Belém entre 2019 e 2022 foi 15,2 *ms*, enquanto em São Paulo foi obtido 17,6 *ms*, com máximas de 120 *ms* e 180 *ms*, respectivamente. No Vale do Paraíba foi observado por (BALLAROTTI et al., 2012) uma duração média de CC de 31 *ms* e máxima de 741 *ms*, sendo o mais longo registro na literatura mundial. O presente estudo apresenta valores mais elevados em relação aos estudos anteriores da região, além de se aproximar dos estudos do Vale do Paraíba. A CC com duração de 606 *ms* ultrapassa outros grandes registros da literatura, como o valor de 550 *ms* apresentado por Mazur, Krehbiel e Shao (1995) e a faixa de 520 a 560 *ms* de Ogawa (1995).

Figura 4.25 – Distribuição de *strokes* pela duração em milissegundos.

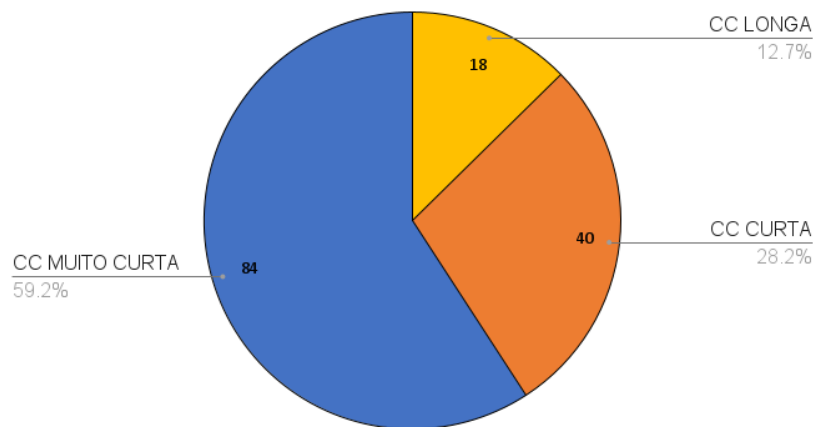


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Do total de *flashes* analisados, 43 detecções (91,5 %) apresentaram uma componente CC de qualquer duração (muito curta, curta ou longa) visível em gravação, equivalente à 142 dos *strokes* deste estudo (71,4 %), estimativas coerentes aos estudos no Brasil, que apontam um valor de 78 a 97 % para *flashes* e de 55 a 97 % para *strokes* (MEDEIROS; SABA, 2012; SCHUMANN; SABA, 2012). Na Figura 4.26 pode-se verificar que mais de 28 % dos *strokes* têm duração curta, enquanto 12,7 % possuem duração longa. Esses valores estão muito acima da literatura, que indica valores próximos a 2 % para componente CC de duração longa (MATOS; LEAL; SABA, 2023; BALLAROTTI et al., 2012; RAKOV; UMAN, 1990). Os indicativos não são definitivos, em vista do uso de apenas detecção óptica de DA, enquanto estudos anteriores combinam diferentes métodos, como sensores de campo eletromagnético e detecção por satélite, o que pode indicar a diferença percebida. No entanto, percebe-se a importância de incentivar e progredir tal pesquisa na região, pois são dados de grande necessidade para a prevenção de danos referentes a DA, em vista de

que a componente CC é grande responsável por danos sérios em equipamentos e estruturas, como queima e ruptura de cabos, danos em painéis fotovoltaicos e em Sistemas de Proteção de Descargas Atmosféricas (SPDA), além de ser capaz de iniciar incêndios, principalmente em áreas de mata (MATOS; LEAL; SABA, 2023; BALLAROTTI et al., 2012; IEEE, 2009). Em acordo com a literatura, a região Amazônica se apresenta especialmente vulnerável aos danos de componentes CC, com isso, um sistema de detecção óptico de descargas atmosféricas se mostra eficiente para compor estudos e para a detecção da componente CC.

Figura 4.26 – Classificação da duração de CC capturadas.

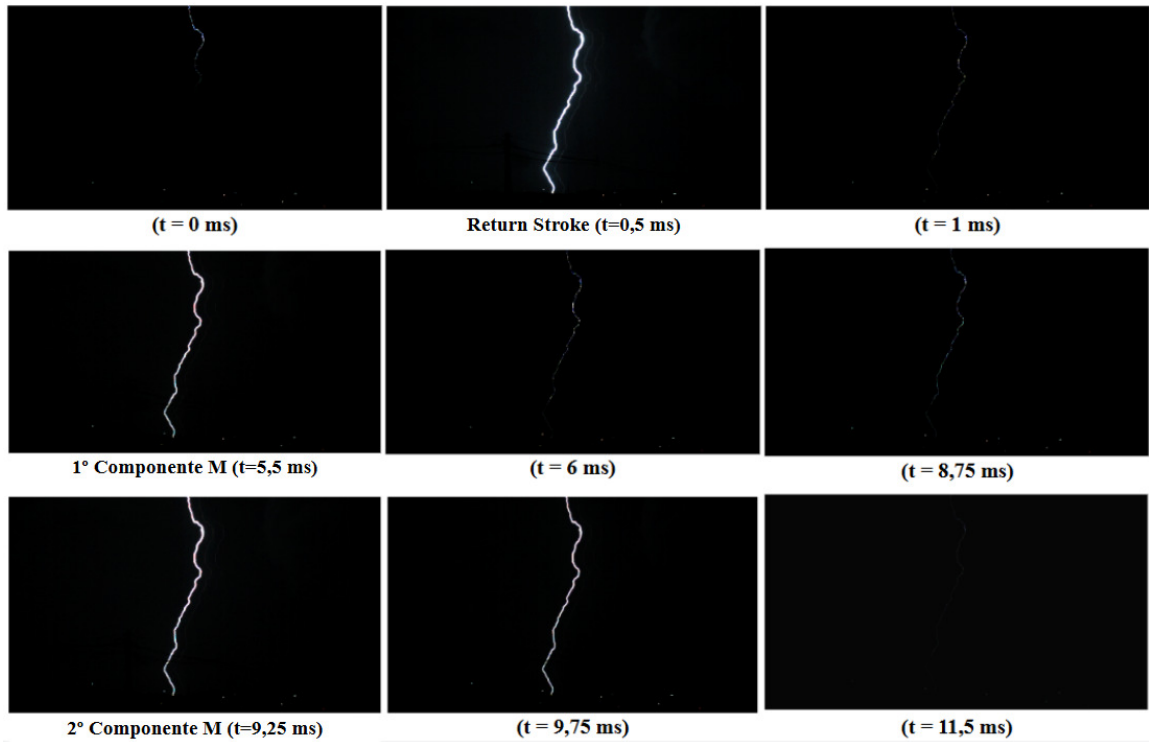


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2.6 Componente M

Dentro do que é perceptível nos registros em vídeo, foram detectados 5,025 % das descargas registradas em Belém apresentando componente M, definido como sendo variações da luminosidade do raio durante o período de CC, provocando um novo pico de luminosidade no *stroke* já existente, o que implica a superposição de duas ondas com propagação opostas (CAMPOS, 2007; GODOI, 2020; DENTEL, 2013). Essa é uma estatística semelhante ao observado em estudos realizados em Vitória, na Austrália (DORPH et al., 2022), onde esse tipo de fenômeno foi calculado como 5 % a 7 % de participação do total nas análises. Na Figura 4.27 esse registro é exemplificado com um canal que gerou 3 picos de intensidade seguidos em um *stroke* com duração total de 31 *ms*. Vale ressaltar que essas observações não são definitivas, pois houveram poucos casos detectados, e não foram de total visibilidade pela câmera, sendo necessário o uso das ferramentas de filtro de vídeo para melhor identificar o processo do *stroke*. Contudo, observa-se a possibilidade desse tipo de sistema para estudos de componente M.

Figura 4.27 – Descarga registrada com 3 *strokes* seguidos.

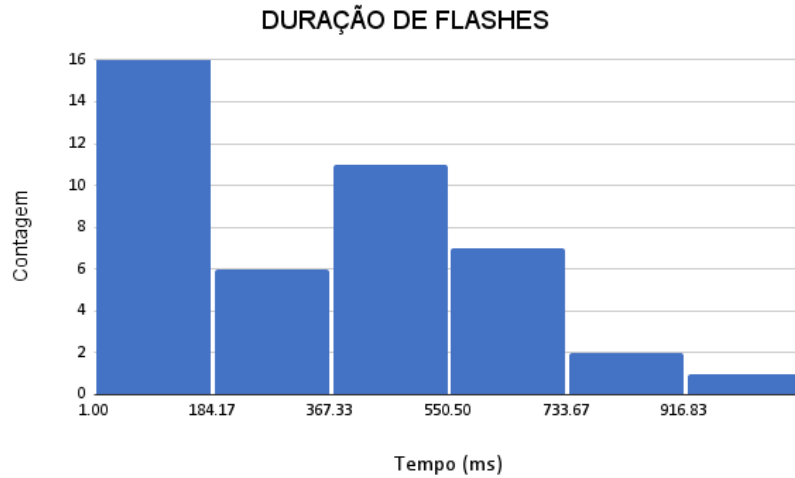


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2.7 Duração de *flashes*

Em relação aos *flashes*, identificou-se uma duração média de 336 *ms*, com mínima de 1 *ms* e máxima de 1,08 *s* (Figura 4.28). Essa análise supera a média de 283 *ms* das regiões tropicais e de estudos anteriores de Belém, que apontam uma média de aproximadamente 262 *ms*, e também é maior que a média de 163 *ms* no sudeste brasileiro (LEAL et al., 2021; SABA; BALLAROTTI; JR., 2006). Contudo, novamente observa-se que o Vale do Paraíba apresenta dados que superam os do presente estudo, com duração média do *flash* de 423 *ms* (BALLAROTTI et al., 2012), enquanto os estudos de Zhu et al. (2015) apontam aproximação com o observado na Flórida, com média de 329 *ms* de duração. Estes dois últimos pontos fortalecem o que já foi apresentado anteriormente, enquanto a diferença com estudos passados no Brasil reforça o intuito do presente trabalho para desenvolver mais estudos na região.

Figura 4.28 – Histograma da duração de flashes em milissegundos.

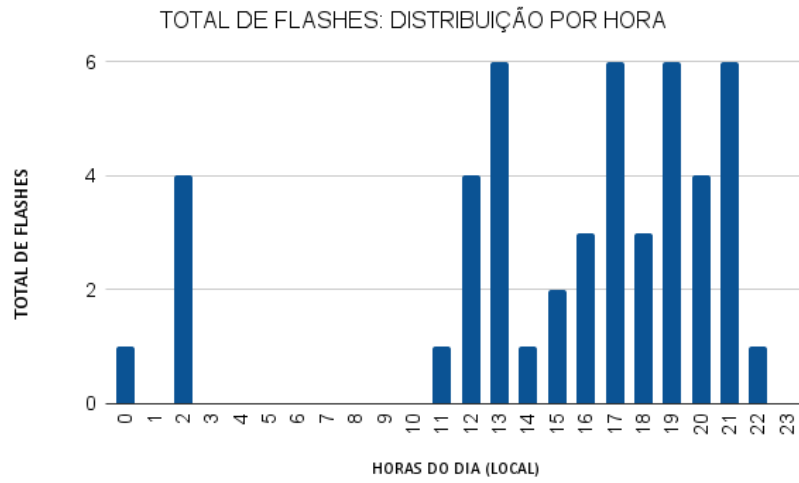


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

4.2.8 Distribuição de descargas nas horas do dia

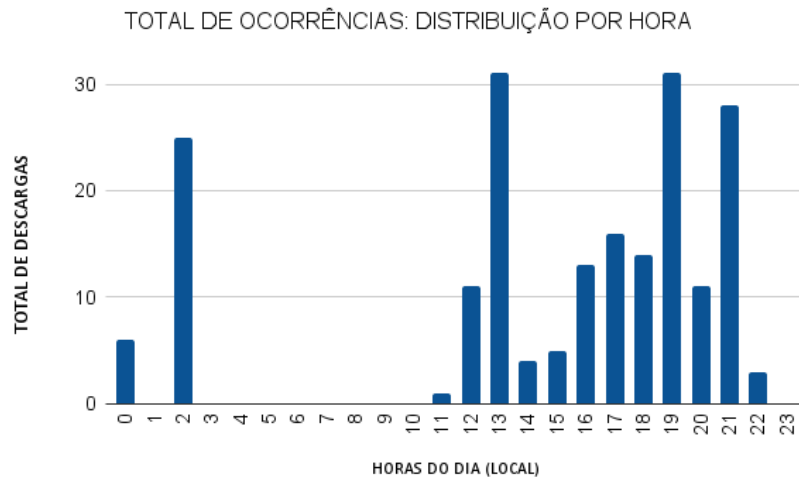
Na distribuição temporal, foi identificada a predominância de DA no período da noite e madrugada (de 19 horas até 4 horas), totalizando 52,26 % das capturas, enquanto no período da tarde (de 12 horas até 18 horas) ocorreram 47,23 % das capturas, e no período da manhã (de 5 horas até 11 horas) houveram menos de 1 % das capturas. Essas observações não se diferenciam tanto do esperado, pois em regiões de clima temperado a maior parte das descargas ocorrem no final da tarde e início da noite (HOLZWORTH et al., 2019), tal qual visto na Figura 4.29 e na Figura 4.30. Para além disso, o estudo de Leal e Rocha (2015) (Figura 4.31) apresenta uma distribuição de dados que se assemelha àquela do presente estudo, contudo, há uma menor incidência de descargas a noite quando comparado ao período vespertino. Em outro estudo, realizado por Matos (2022), a disposição não é tão semelhante quanto a anterior (Figura 4.32), e apresenta grande diferença especialmente no início da tarde e durante a noite, onde não apresenta os picos de eventos registrados no presente estudo. Mostram-se necessárias análises com diferentes capturas de dados para avaliar a mudança da distribuição de descargas no decorrer dos anos, além de mensurar a precisão das capturas do sistema nesse âmbito.

Figura 4.29 – Gráfico da distribuição de *flashes* nas horas do dia.



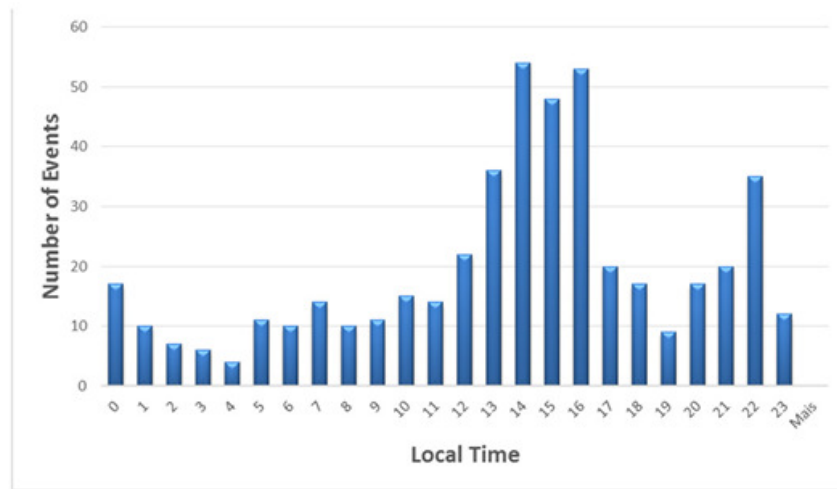
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 4.30 – Gráfico da distribuição de descargas nas horas do dia.



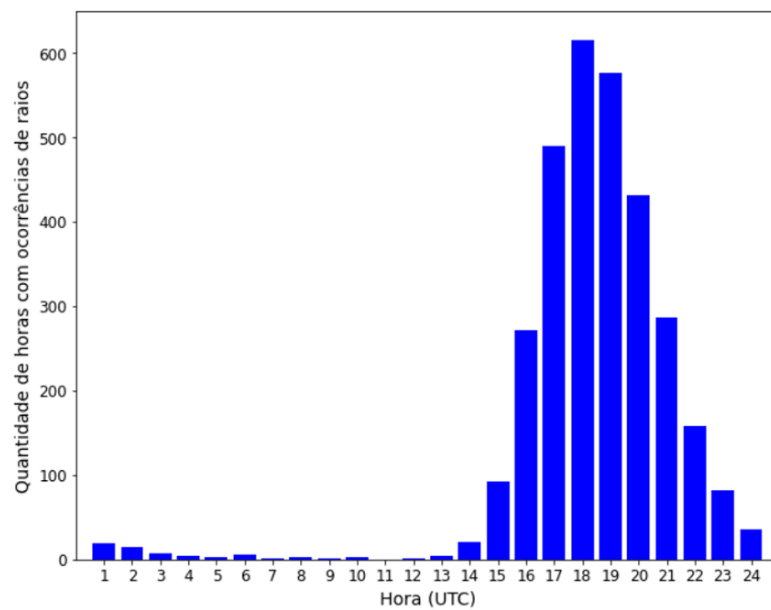
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 4.31 – Distribuição de descargas nas horas do dia em Belém.



Fonte: Leal e Rocha (2015)

Figura 4.32 – Quantidade de horas com descargas em Belém.



Fonte: Matos (2022)

Apesar da predominância de registros no período noturno condizer com o esperado para a Região Norte, a incidência de DA matutinas ser inferior a 1 % é abaixo da média esperada, o que pode indicar uma diferença específica para a cidade de Belém ou para o local de observação, como observado no estudo de Matos (2022), onde das 9 cidades que compõem a Amazônia brasileira, Belém é a que apresenta a menor taxa de DA no período da manhã.

5 CONCLUSÃO

O propósito deste estudo foi desenvolver e avaliar um sistema automatizado para a aquisição de imagens de DA, empregando algoritmos de processamento para capturar e armazenar eficazmente os eventos documentados. O estudo revelou que a estratégia sugerida é viável e traz vantagens consideráveis em comparação com métodos convencionais, tanto em relação ao custo quanto à eficácia operacional. O uso de um sistema microcontrolado e a incorporação de programas como o FFmpeg permitiram a obtenção de gravações em alta taxa de quadros por segundo, assegurando a identificação exata dos momentos em que acontecem as descargas atmosféricas. Os testes conduzidos mostraram que o sistema criado consegue guardar somente os trechos relevantes, diminuindo consideravelmente a quantidade de dados a serem analisados e o espaço de armazenamento necessário.

Adicionalmente, a campanha de medições conduzida no CENSIPAM auxiliou na compreensão da distribuição temporal e espacial dos registros realizados, proporcionando novas percepções sobre a frequência e as particularidades das descargas atmosféricas na região analisada. Também foram identificadas características das descargas atmosféricas que chama a atenção para a região Amazônica, e dados estatísticos que indicam descargas cada vez mais frequentes, ressaltando a importância de estudos futuros. Ademais, o sistema utilizado para as capturas ressalta a importância de equipamentos adequados para o estudo de DA, e a necessidade de desenvolver mais pesquisas e explorar mais as características das regiões de Belém e da Amazônia.

As informações recolhidas e examinadas podem servir de fundamento para melhorias em sistemas de monitoramento meteorológico e ações preventivas para reduzir os efeitos das tempestades atmosféricas em infraestruturas e comunidades vulneráveis. O uso de sensores de custo reduzido e processamento automático propostos no projeto, torna essa abordagem viável para aplicação em diversas áreas, o que pode expandir a supervisão e auxiliar na criação de políticas públicas focadas na segurança elétrica e na redução de riscos. Para futuras pesquisas, recomenda-se a melhoria do sistema de registro através da incorporação de novos sensores, tais como medidores de campo eletromagnético e sensores ópticos de alta precisão, visando uma detecção mais eficaz dos fenômenos atmosféricos. Ademais, a instalação de um sistema de comunicação sem fio possibilitaria a conexão de várias estações de monitoramento, permitindo a avaliação simultânea de eventos sob diversas perspectivas. O uso de técnicas de inteligência artificial para classificar automaticamente as descargas registradas é outra opção que pode aprimorar a análise dos dados recolhidos.

Assim, conclui-se que a pesquisa realizada é uma contribuição significativa para o estudo das descargas atmosféricas, proporcionando uma solução acessível para o acompanhamento desses fenômenos naturais. A persistência do estudo, juntamente com a aplicação das melhorias sugeridas, pode potencializar o efeito da metodologia sugerida e aprofundar o entendimento científico acerca da ocorrência e das particularidades das descargas atmosféricas no Brasil e globalmente.

6 TRABALHOS FUTUROS

Em vista do projeto descrito em Seção 3.1, destacam-se os seguintes pontos para dar continuidade:

- Desenvolver sensores de *trigger* que capturem características como: campo eletromagnético, intensidade luminosa e intensidade sonora;
- Adequar o recebimento das capturas dos sensores para o sistema microcontrolado, dividindo o sinal de *trigger* dos demais sinais analógicos capturados da DA;
- Ajustar os códigos para usar margem UTC até milissegundos.
- Adicionar um método de comunicação sem fio para longas distâncias na estação de captura que permita a comunicação entre estações e entre um computador central e as estações;
- Adaptar o algoritmo de captura para que sejam armazenados os instantes que antecedem o primeiro *trigger*;
- Desenvolver a estação com os equipamentos estudados e realizar capturas;
- Estudar formas de desenvolver o processamento de capturas para classificação automatizada de DA, idealmente com a aplicação de visão computacional através do FFmpeg;

Ao estudo das capturas realizadas no CENSIPAM, destacam-se os seguintes pontos para aprofundar o estudo:

- Agrupar um maior número de capturas, por um intervalo de tempo maior, para assim ter estatísticas mais sólidas das DA;
- Utilizar diferentes pontos de captura ou, um conjunto de câmeras, para poder registrar diferentes áreas e um número maior de descargas;

REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, R. I.; DIAS, M. A. F. S. Características microfísicas da precipitação convectiva e estratiforme associadas à oscilação de larga no sudoeste da amazônia. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**. [S.l.]: SBMET, 2004. Citado na página 16.
- BALLAROTTI, M. G.; MEDEIROS, C.; SABA, M. M. F.; SCHULZ, W.; JR., O. P. Frequency distributions of some parameters of negative downward lightning flashes based on accurate-stroke-count studies. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 117, n. D6, 2012. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2011JD017135>>. Citado 5 vezes nas páginas 41, 42, 44, 45 e 46.
- BALLAROTTI, M. G.; SABA, M. M. F.; JR., O. P. High-speed camera observations of negative ground flashes on a millisecond-scale. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 23, 2005. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2005GL023889>>. Citado na página 44.
- BROOK, M.; KITAGAWA, N.; WORKMAN, E. J. Quantitative study of strokes and continuing currents in lightning discharges to ground. **Journal of Geophysical Research (1896-1977)**, v. 67, n. 2, p. 649–659, 1962. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JZ067i002p00649>>. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 41.
- CAMPOS, L. Z. de S. **Estudos dos fatores que influenciam a ocorrência de corrente contínua em relâmpagos naturais**. 2007. Disponível em: <<http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/07.31.13.09/doc/Leandro%20Zanella.pdf>>. Acesso em: 27 de fevereiro de 2025. Citado 4 vezes nas páginas 13, 18, 20 e 45.
- COORAY, V. **An Introduction to Lightning**. [S.l.]: Springer, 2015. ISBN 9789401789370. Citado na página 17.
- COORAY, V.; JAYARATNE, K. P. S. C. Characteristics of lightning flashes observed in sri lanka in the tropics. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 99, n. D10, p. 21051–21056, 1994. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/94JD01519>>. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- COTES, C.; JUVAN-BEAULIEU, I. **Rolling Shutter vs Global Shutter sCMOS Camera Mode**. 2020. Disponível em: <<https://andor.oxinst.com/learning/view/article/rolling-and-global-shutter>>. Acesso em: 12 de março de 2025. Citado na página 23.
- DENTEL, L. M. **Modelagem e sistemas de detecção de descargas atmosféricas na amazônia**. 211 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Pará, Belém, 2013. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/5829>>. Citado na página 45.
- DORPH, A.; MARSHALL, E.; PARKINS, K. A.; PENMAN, T. D. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 2022. Disponível em: <<https://nhess.copernicus.org/articles/22/3487/2022/>>. Citado na página 45.
- DWYNER, J. R.; UMAN, M. A. The physics of lightning. **Physics Reports**, Elsevier, v. 534, n. 4, p. 147–241, jan 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037015731300375X?via%3Dihub>>. Citado na página 18.

FERREIRA, E. R.; LEAL, A. F. R.; MATOS, W. L. N.; ALMEIDA, G. O.; SHINKAI, R.; LOPES, M. N. G. Lightning deaths and injuries in the brazilian amazon region in the period of 2009-2019. **International Symposium on Lightning Protection**, p. 1–8, oct 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/339402864_Lightning_deaths_and_injuries_in_the_Brazilian_Amazon_Region_in_the_period_of_2009-2019>. Citado na página 14.

FERRO, M. A. da S. **Características dos relâmpagos nuvem-solo negativos que apresentam múltiplos canais**. 245 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/11.10.13.47/doc/publicacao.pdf>>. Citado na página 18.

FILHO, S. V. **Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia**. [S.l.]: Artliber Editora, 2005. Citado na página 20.

FRAULOB, H. M. **Raios ascendentes e sua detecção por sistemas de localização de descargas**. 2014. Disponível em: <<http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/07.09.18.38/doc/Halph%20Macedo%20Fraulob.pdf>>. Acesso em: 05 de março de 2025. Citado na página 13.

GODOI, I. A. de C. **Características das descargas atmosféricas não-detectadas pela rede brasileira de detecção de descargas atmosféricas (BRASILDAT)**. 2020. Disponível em: <<http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/01.25.14.53/doc/PIBIC%20-%20Igor%20Augusto%20de%20Carvalho%20Godoi%20-%20Relat%20Final...pdf>>. Acesso em: 30 de março de 2025. Citado na página 45.

HOLZWORTH, R. H.; MCCARTHY, M. P.; BRUNDELL, J. B.; JACOBSON, A. R.; RODGER, C. J. Global distribution of superbolts. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 2019. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019JD030975>>. Citado na página 47.

IBGE. **Região da Amazônia Legal Brasileira**. 2022. Disponível em: <https://geoftp.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/estrutura_territorial/amazonia_legal/2022/Mapa_da_Amazonia_Legal_2022_sem_sedes.pdf>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2025. Citado na página 14.

IEEE. Ieee standard for testing and performance for optical ground wire (opgw) for use on electric utility power lines - redline. **IEEE Std 1138-2009 (Revision of IEEE Std 1138-1994) - Redline**, p. 1–62, 2009. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5981357>>. Citado na página 45.

INPE. **Estágios da Tempestade**. 2020. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/tempestades/evolucao.php>>. Acesso em: 24 de fevereiro de 2025. Citado na página 18.

IRIBARNE, J. V.; CHO, H. R. Atmospheric physics. **Nature**, v. 284, p. 88, mar 1980. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/284088a0>>. Citado na página 13.

JR., O. P.; PINTO, I. R. A. P. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. INPE, 2000. ISBN 85-901719-1-4. Disponível em: <<http://urlib.net/ibi/6qtX3pFwXQZsFDuKxG/DPTCE>>. Citado na página 20.

JUNIOR, G. B. M.; CONTINI, E.; NAVARRO, Z. **Caracterização da Amazônia Legal e Macrotendências do Ambiente Externo**. [S.l.]: Embrapa Estudos e Capacitação, 2011. (Embrapa Estudos e Capacitação. Documentos de Apoio, 1ª Edição). Citado na página 14.

LEAL, A.; MATOS, W.; FERREIRA, E.; FERREIRA, G.; LOPES, M.; ROCHA, B. Characteristics of negative cloud-to-ground flashes observed in the brazilian amazon region. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 126, 08 2021. Citado 6 vezes nas páginas 38, 39, 41, 42, 43 e 46.

LEAL, A. F. R. **Otimização da Detecção de Formas de Onda de Campos Eletromagnéticos Emitidos por Descargas Atmosféricas**. 228 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Pará, Pará, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11001>>. Citado na página 20.

LEAL, A. F. R.; ROCHA, B. R. P. da. A low cost lightning data logger using gps time and sd card memory to the amazon region. **2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA)**, p. 318–321, 09 2015. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 49.

LIMA, K. C. **Estudo das descargas de retorno e componentes M e sua detecção por sistemas de localização de relâmpagos**. 2005. 118 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2005. Disponível em: <https://guaiaca.ufpel.edu.br/bitstream/handle/prefix/3990/Dissertacao_Kellen_Carla_Lima.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Citado na página 16.

LUDLAM, F. H.; MASON, B. J. The physics of clouds. **GeophysicsII**, Springer, v. 10, n. 48, p. 479–540, 1957. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-45881-1_9>. Citado na página 17.

MATOS, W.; LEAL, A.; SABA, M. Use of satellite data for identification of lightning continuing current in the southeast and north regions of brazil. **International Conference on Grounding Lightning Physics and Effects**, v. 10, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/370818830_USE_OF_SATELLITE_DATA_FOR_IDENTIFICATION_OF_LIGHTNING_CONTINUING_CURRENT_IN_THE_SOUTHEAST_AND_NORTH_REGIONS_OF_BRAZIL>. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.

MATOS, W. L. N. **Previsão de ocorrência de raios utilizando dados de estações meteorológicas de superfície e técnicas de aprendizado de máquina**. 2022. Citado 3 vezes nas páginas 18, 47 e 49.

MAZUR, V.; KREHBIEL, P. R.; SHAO, X.-M. Correlated high-speed video and radio interferometric observations of a cloud-to-ground lightning flash. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 100, n. D12, p. 25731–25753, 1995. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/95JD02364>>. Citado na página 44.

MEDEIROS, C.; SABA, M. M. F. Presence of continuing currents in negative cloud-to-ground flashes. **International Conference on Lightning Detection**, Denver, Colorado, 2012. Disponível em: <<http://plutao.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/plutao/2012/06.21.19.05/doc/Presence%20of%20Continuing%20Current%20in%20Negative%20Cloud-to-Ground%20Flashes.pdf>>. Citado na página 44.

MONTANYÀ, J.; LÓPEZ, J.; van der Velde, O.; SOLÀ, G.; ROMERO, D.; MORALES, C.; VISACRO, S.; SABA, M.; GOODMAN, S.; WILLIAMS, E.; PETERSON, M.; PINEDA, N.; ARCANJO, M.; ARANGUREN, D. Potential use of space-based lightning detection in electric power systems. **Electric Power Systems Research**, v. 213, p. 108730, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779622007891>>. Citado na página 20.

NACCARATO, K. P. **Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do Sistema de Localização de Tempestades**. 2001. 165 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001. Disponível em: <<http://marte3.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2002/03.28.19.09/doc/publicacao.pdf>>. Citado 5 vezes nas páginas 16, 17, 18, 19 e 21.

NACCARATO, K. P. **Análise das características dos relâmpagos na região sudeste do Brasil**. 362 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/09.28.19.00/doc/publicacao.pdf>>. Citado na página 17.

OGAWA, T. **Lightning currents**. [S.l.]: CRC Press, 1995. (Handbook of Atmospheric Electrodynamics, Volume I). ISBN 9780203719503. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 44.

P., V. **The Lightning Book**. [S.l.]: Cambridge MA: MIT Press, 1961. Citado na página 13.

PAIVA, A. R. de. **Estudo das descargas de retorno e componentes M e sua detecção por sistemas de localização de relâmpagos**. 2015. 106 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015. Disponível em: <<http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.05.11.19/doc/publicacao.pdf>>. Citado na página 13.

RAKOV, V. A. **Fundamentals of lightning**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2016. ISBN 9781107072237. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 18.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Long continuing current in negative lightning ground flashes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 95, n. D5, p. 5455–5470, 1990. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JD095iD05p05455>>. Citado 3 vezes nas páginas 39, 40 e 44.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: Physics and Effects**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003. Citado na página 38.

ROMERO, F. **Avaliação do comportamento dos campos eletromagnéticos gerados por descargas atmosféricas nuvem-terra**. 2007. 155 f. Dissertação (Mestrado - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-26032007-162159/publico/FabioRomero_Dissertacao_de_mestrado.pdf>. Citado na página 20.

ROMERO, T. Pesquisa do inpe e nasa mostra regiões do mundo com maior incidência de raios. **Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo**, jul 2003. Acesso em: 28 fev. 2025. Disponível em: <<https://agencia.fapesp.br/pesquisa-do-inpe-e-nasa-mostra-regioes-do-mundo-com-maior-incidencia-de-raios/295>>. Citado na página 13.

SABA, M. M. F. **Estudo de condutividade, campo elétrico e relâmpagos associados a nuvens de tempestade**. 180 p. Tese (Doutorado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1997. Disponível em: <<http://marte3.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1905/2005/07.29.05.49.50/doc/publicacao.pdf>>. Citado na página 19.

SABA, M. M. F.; BALLAROTTI, M. G.; JR., O. P. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 111, n. D3, 2006. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2005JD006415>>. Citado 3 vezes nas páginas 41, 42 e 46.

SARAIVA, A. C. V.; SABA, M. M. F.; JR., O. P.; CUMMINS, K. L.; KRIDER, E. P.; CAMPOS, L. Z. S. A comparative study of negative cloud-to-ground lightning characteristics in são paulo (brazil) and arizona (united states) based on high-speed video observations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 115, n. D11, 2010. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2009JD012604>>. Citado na página 41.

SCHUMANN, C. **Estudo dos raios ascendentes a partir de observações de câmeras de alta resolução temporal e de medidas de campo elétrico**. 152 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe/pt-br/area-conhecimento/posgraduacao/ges/repositorio-de-arquivos/teses/tese_carina_schumann_2016.pdf>. Citado na página 21.

SCHUMANN, C.; SABA, M. M. Continuing current intensity in positive ground flashes. **2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP)**, p. 1–5, 2012. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6344260?section=abstract>>. Citado na página 44.

SHINDO, T.; UMAN, M. A. Continuing current in negative cloud-to-ground lightning. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 94, n. D4, p. 5189–5198, 1989. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JD094iD04p05189>>. Citado na página 44.

SILVA, T. P. da. **Estudo dos raios intranuvem através de câmeras de alta velocidade e de sensores de campo elétrico**. 2022. xx + 76 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/inpe/pt-br/area-conhecimento/posgraduacao/ges/repositorio-de-arquivos/dissertacoes/dissertacao_tagianne_2022.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

STOLZENBURG, M.; MARSHALL, T. C. Electric field and charge structure in lightning-producing clouds. In: _____. **Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Modern Lightning Research**. Springer Netherlands, 2009. p. 57–82. ISBN 978-1-4020-9079-0. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9079-0_3>. Citado na página 18.

STOLZENBURG, M.; MARSHALL, T. C.; KARUNARATHNE, S.; KARUNARATHNA, N.; WARNER, T. A.; ORVILLE, R. E. Competing and cutoff leaders before “upward

illumination"-type lightning ground strokes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 2022. Disponível em: <<https://nhess.copernicus.org/articles/22/3487/2022/>>. Citado na página 44.

TANG, J. **Descarga Atmosférica Nuvem-Solo Ascendente**. 2023. Disponível em: <<https://www.jimtangphoto.com/portfolio/monsoon>>. Acesso em: 05 de março de 2025. Citado na página 21.

TEIXEIRA, K. Onde tem mais descargas elétricas no brasil? estudo revela quais são os estados com maior incidência de raios. **Meteored | Tempo.com**, mai 2024. Acesso em: 28 fev. 2025. Disponível em: <<https://www.tempo.com/noticias/actualidade/onde-tem-mais-descargas-eletricas-no-brasil-estudo-revela-quais-sao-os-estados-com-maior-incidencia-html#:~:text=82%25%20das%20vÃntimas%20fatais%20sÃo,proximidade%20de%20portas%20e%20janelas.>> Citado na página 13.

UFPA. **Sistema de Captura de Descargas Atmosféricas**. 2024. Disponível em: <<https://ufpa.br/pesquisadores-da-ufpa-registram-raios-com-multiplas-conexoes-em-alta-velocidade-na-amazon>>. Acesso em: 04 de março de 2025. Citado na página 27.

UMAN, M. A. **The lightning discharge**. [S.l.]: Academic Press, 1987. ISBN 9780127083506. Citado na página 18.

UMAN, M. A.; KRIDER, E. P. Natural and artificially initiated lightning. **Science**, American Association for the Advancement of Science., v. 246, n. 4929, p. 457–464, oct 1989. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/6051247_Natural_and_Artificially_Initiated_Lightning>. Citado na página 18.

WOOI, C.-L.; ABDUL-MALEK, Z.; AHMAD, N.-A.; El Gayar, A. I. Statistical analysis of electric field parameters for negative lightning in malaysia. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 146, p. 69–80, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136468261630133X>>. Citado na página 38.

ZHU, Y.; RAKOV, V. A.; MALLICK, S.; TRAN, M. D. Characterization of negative cloud-to-ground lightning in florida. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 136, p. 8–15, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682615300328>>. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 46.