

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

OTIMIZAÇÃO DA DETECÇÃO DE FORMAS DE ONDA DE CAMPOS
ELETROMAGNÉTICOS EMITIDOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

ADÔNIS FERREIRA RAIOL LEAL

TD 01 /2018

UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ADÔNIS FERREIRA RAIOL LEAL

OTIMIZAÇÃO DA DETECÇÃO DE FORMAS DE ONDA DE CAMPOS
ELETROMAGNÉTICOS EMITIDOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

TD 01 /2018

UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ADÔNIS FERREIRA RAIOL LEAL

OTIMIZAÇÃO DA DETECÇÃO DE FORMAS DE ONDA DE CAMPOS
ELETROMAGNÉTICOS EMITIDOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Tese submetida à Banca Examinadora do Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA
para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia
Elétrica na área de Sistemas de Energia.

TD 01 /2018

UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L433o Leal, Adônis Ferreira Raiol
Otimização da detecção de formas de onda de campos eletromagnéticos emitidos por descargas atmosféricas / Adônis Ferreira Raiol Leal. - 2018.
228 f. : il. color.
- Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.
Orientação: Profa. Dra. Brígida Ramati Pereira da Rocha
Coorientação: Prof. Dr. Vladimir Rakov.
1. Descargas atmosféricas. 2. Otimização. 3. Formas de onda. 4. Amazônia. 5. LDWSS. I. da Rocha, Brígida Ramati Pereira, *orient.* II. Título
-

“OTIMIZAÇÃO DA DETECÇÃO DE FORMAS DE ONDA DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EMITIDOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS”

AUTOR: ADÔNIS FERREIRA RAIOL LEAL

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

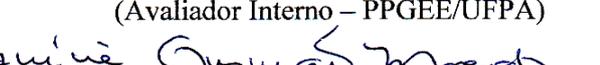
APROVADA EM: 23/01/2018

BANCA EXAMINADORA:


Prof.^a Dr.^a Brígida Ramati Pereira da Rocha
(Orientadora – UFPA)

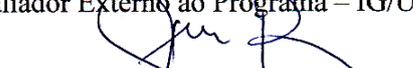

Prof. Dr. Vladimir Rakov
(Co-Orientador Externo – UF)


Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Júnior
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)


Prof.^a Dr.^a Valquiria Gusmão Macedo
(Avaliadora Externa ao Programa – FEEB/UFPA)


Prof. Dr. Arthur da Costa Almeida
(Avaliador Externo ao Programa – CCAST/UFPA)


Prof. Dr. José Ricardo Santos de Souza
(Avaliador Externo ao Programa – IG/UFPA)


Prof. Dr. José Pissolato Filho
(Avaliador Externo – UNICAMP)


Prof. Dr. José Alberto Silva de Sá
(Avaliador Externo – UEPA)

VISTO:


Prof.^a Dr.^a Maria Emília de Lima Tostes
(Coordenadora do PPGEE/ITEC/UFPA)

$B > \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ (*Be Greater than Average*)

Seja acima da média (NASA)

**Dedico este trabalho aos meus pais e avós que me
incentivam continuamente na busca do
conhecimento.**

AGRADECIMENTOS

A minha esposa, Juliana Leal, por todo o apoio e compreensão pelos momentos de ausências e momentos adversos durante a realização deste trabalho.

A minha orientadora, Dra. Brigida Ramati Pereira da Rocha, por ter me apresentado o tema “Raios” e ter acreditado na minha capacidade, tornando essa jornada possível.

Ao professor Vladimir A. Rakov, pela imensa atenção dada a minha pesquisa durante o período em que estive na Universidade da Florida (UF), além do profundo conhecimento sobre raios que ele pôde transmitir durante diversas conversas.

Ao professor Martin Uman, pela valorosa contribuição com dados de raios induzidos do International Center for Lightning Research and Testing (ICLRT) e por sua ilustre presença em minha apresentação final na UF, contribuindo com questionamentos excepcionais.

Aos professores José Pissolato Filho, José Alberto Silva de Sá, José Ricardo Santos de Souza, Valquíria Gusmão Macedo, Arthur Da Costa Almeida, Carlos Tavares Da Costa Júnior e Ivan Sebastião de Souza e Silva, por suas contribuições diretas para a realização deste trabalho.

Aos colegas de laboratório Mhan Tran, Yanan Zhu e Vijaya Sumu, pelas excelentes conversas sobre raios e ajuda na instalação do LDWSS na UF.

Um agradecimento especial a Gabriel, Ricardo Shinkai e Marcio Nirlando, por suas colaborações na fabricação e instalação do LDWSS em Belém, PA.

Aos professores e funcionários do PPGEE, UF, SIPAM e NAEA, pelos excelentes trabalhos prestados.

RESUMO

Este trabalho propõe maneiras de otimizar a detecção e o registro de formas de onda de campos elétricos radiados por descargas atmosféricas. Como resultado das técnicas de otimização desenvolvidas nesta Tese, é apresentado o “Sistema de detecção e armazenamento de formas de onda de raios” ou “*Lightning Detection and Waveform Storage System - (LDWSS)*”, como um dispositivo otimizado para o registro de campos eletromagnéticos gerados por raios. Os principais pontos aprimorados foram: custo do dispositivo; ampliação do alcance dinâmico de detecção; desenvolvimento de um sistema móvel; possibilidade de detecção multi-banda e; calibração para inferir, de forma remota, a corrente de pico dos raios detectados. O sistema desenvolvido foi validado, a partir de comparações com dados de raio induzido, no Centro Internacional para Pesquisa e Teste com Raios (*International Center for Lightning Research and Testing - ICLRT*), dados da Rede Nacional Norte Americana de Detecção de Raios (*National Lightning Detection Network - NLDN*) e dados do Observatório de Raios em Gainesville (*Lightning Observatory in Gainesville - LOG*). A principal aplicação do sistema é na investigação da física e dos efeitos das descargas atmosféricas, principalmente na região Amazônica. Como resultado da utilização do sistema obteve-se: melhor entendimento sobre as descargas intra-nuvem do tipo *Compact Intracloud Discharge - CID*; as características da altura da refletividade da ionosfera calculada utilizando formas de onda de raios intra-nuvem e nuvem-solo; a criação de um banco de dados contendo mais de oito mil formas de onda do campo elétrico de diferentes tipos de raios e; a primeira estação de registro contínuo de formas de onda de campo elétrico devido a raios na Amazônia, localizada no CENSIPAM regional Belém.

Palavras-chave: Descargas atmosféricas. Otimização. Formas de onda. Amazônia. LDWSS.

ABSTRACT

This work aims the application of optimization techniques to detect and record lightning electromagnetic waveforms. As a result of the optimization techniques developed on this Thesis, it is presented the “Lightning Detection and Waveform Storage System - (LDWSS)”. The main optimized points were: cost of the device; improvements of its detection dynamic range; development of a mobile device; possibility to detect in a multi-band way; and calibration in order to infer peak currents from remote measurements of lightning electric fields. The developed system was validated through comparison of a return stroke data in lightning triggered using the rocket-and-wire technique at the International Center for Lightning Research and Testing - ICLRT, of National Lightning Detection Network – NLDN data, and data from the Lightning Observatory in Gainesville - LOG. The main usage of the optimized system is on the investigation of lightning physics and effects, mainly in the Amazon region. As a result of using the system were obtained: a better understanding about Compact Intracloud Discharge - CID; the characteristics of ionosphere heights computed using intracloud and cloud-to-ground lightning electric field waveforms; the conception of a lightning electric field waveform database containing more than 8 thousand waveforms of different types of lightning; and the implementation of the first continuous lightning electric field measurement system in the amazon region, localized at CESIPAM, Belem, PA.

Keywords: Lightning. Optimization. Waveforms. Amazon region. LDWSS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Torres de transmissão 238 e 241 da linha de transmissão Tucuruí-Macapá-Manaus. Localizadas nas margens do Rio Amazonas, na cidade de Almeirim, estado do Pará, Brasil. Ambas possuem 300 metros de altura com um vão de 2,5 quilômetros entre elas.	21
Figura 2 - Horizonte 2017 do sistema elétrico de potência Brasileiro.	22
Figura 3 – Mapa de densidade de raios Região Norte (Brasil).	23
Figura 4 – Mapa da localização dos sensores da NALDN em 2010.	26
Figura 5 – Mapa da localização dos sensores da EUCLID em 2014.	27
Figura 6 – Mapa com a localização dos sensores utilizados no monitoramento de raios no Brasil entre 1988 e 2006.	28
Figura 7 – Mapa com a configuração dos sensores da RINDAT em 2017.	29
Figura 8 – Localização dos sensores da RDR-SIPAM.	31
Figura 9 - Uma nuvem de tempestade isolada, localizada na região central do estado do Novo México nos EUA e a ilustração de como se imagina ser a distribuição de cargas elétricas no interior e ao redor da nuvem, inferidas através de medições realizadas remotamente e no interior da nuvem.	36
Figura 10 - Teoria da Convecção	37
Figura 11 - Teoria da Precipitação.....	38
Figura 12 - Alguns tipos de Raios.....	39
Figura 13 – Ilustração do possível local de ocorrência de CIDs positivos e negativos, levando em conta a convenção de sinal da eletricidade atmosférica.	40
Figura 14 – Esquema de diferentes tipos de raios que conectam-se com o solo baseado na direção de propagação do líder e na polaridade das cargas transportadas: (a) Raios positivos descendentes (RPD); (b) Raios negativos descendentes (RND);(c) Raios positivos ascendentes (RPA); (d) Raios negativos ascendentes (RNA).	41
Figura 15 – Ilustração dos vários processos que compõem uma descarga atmosférica nuvem-solo descendente (Flash).....	42
Figura 16 – Ilustração da sequência de eventos que ocorrem em um clássico raio induzido.....	44
Figura 17 – Geometria e equações adotadas, pela aproximação, utilizando o momento do dipolo elétrico, para cálculo dos campos elétricos e densidade de fluxo magnético radiados por uma descarga atmosférica.	46
Figura 18 – Parâmetros geométricos para cálculo dos campos eletromagnéticos.	49
Figura 19 – Representação de como a corrente é injetada no canal do raio pelos modelos linha de transmissão (a), e fonte de corrente viajante (b).	53
Figura 20 – Representação gráfica do cálculo da componente vertical E_z do campo elétrico total para uma descarga de retorno a 1 km de distância, assim como representação de suas componentes eletrostática, indução e radiação.	55
Figura 21 – Representação gráfica do cálculo da componente vertical E_z do campo elétrico total para uma descarga de retorno a 10 km de distância, assim como representação de suas componentes eletrostática, indução e radiação.	55
Figura 22 – Representação gráfica do cálculo da componente vertical E_z do campo elétrico total para uma descarga de retorno a 30 km de distância, assim como representação de suas componentes eletrostática, indução e radiação.	56
Figura 23 – Representação gráfica do cálculo da componente vertical E_z do campo elétrico total para uma descarga de retorno a 50 km de distância, assim como representação de suas componentes eletrostática, indução e radiação.	56
Figura 24 – Representação gráfica do cálculo da componente vertical E_z do campo elétrico total para uma descarga de retorno a 100 km de distância, assim como representação de suas componentes eletrostática, indução e radiação.....	57
Figura 25 – Representação gráfica do cálculo da componente vertical E_z do campo elétrico total para uma descarga de retorno a 500 km de distância, assim como representação de suas componentes eletrostática, indução e radiação.....	57
Figura 26 – Típicas formas de onda de campos elétricos e magnéticos radiados por primeiras (linha sólida) e subsequentes (linha pontilhada) descargas de retorno às distâncias de 1, 2, 5, 10, 15, 50, 100 e 200 km.....	61

Figura 27 – Forma de onda do campo elétrico radiado por uma descarga de retorno, à uma distância de 24 km.	63
Figura 28 – Forma de onda do campo elétrico radiado por uma descarga de retorno, com a indicação dos pulsos dos colapsos preliminares.	63
Figura 29 – Forma de onda do campo elétrico radiado por uma descarga de retorno, à uma distância de 132 km, com corrente de pico de 84 kA, e indicação dos pulsos referentes ao líder escalonado.	64
Figura 30 – Forma de onda do campo elétrico radiado por uma descarga de retorno, à uma distância de 93 km e corrente de pico de 77 kA reportado pela rede NLDN. Com a indicação dos pulsos dos colapsos preliminares. ..	65
Figura 31 – Indicações da onda de chão e primeira reflexão ionosférica de uma descarga de retorno, à uma distância de 328 km.	65
Figura 32 – Diagrama esquemático do guia de onda formado entre a terra e a ionosfera, que possibilita a propagação de ondas VLF (3 – 30 KHz) emitidas por descargas atmosféricas por milhares de quilômetros através de múltiplas reflexões.	66
Figura 33 – Sferics observados no período da noite a diferentes distâncias, sendo que o mais distante contém múltiplos pulsos indicando diversas reflexões ionosféricas.	67
Figura 34 – Forma de onda do campo elétrico radiado por uma descarga de retorno positiva, à uma distância de 105 km e corrente de pico de 52 kA reportado pela rede NLDN.	68
Figura 35 – Exemplo de descarga do tipo nuvem que ocorreu de forma isolada (sem a presença de um canal que tocasse o solo), observada em Gainesville, FL. As distâncias variam entre 22 e 28 km segundo a localização fornecida pela NLDN.	69
Figura 36 – Representação da medição de campo elétrico utilizando um condutor metálico. (a) antena sem circuito externo. (b) Antena com capacitor integrador externo, considerando $C \gg C_a$	72
Figura 37 – Representações através de circuitos elétricos da relação entre o campo elétrico sentido pela antena e a tensão de saída V_{out} . (a) Representação com o circuito equivalente de Thevenin para a antena. (b) Representação com o circuito equivalente de Norton para a antena.	74
Figura 38 – Estrutura interna de um Field Mill.	76
Figura 39 –(a) Antena Flat-plate nivelada com o solo. (b) Antena flat-plate elevada. (c) Antena flat-plate elevada e no topo de uma edificação.	78
Figura 40 –Diferentes topologias de antenas flat-plate utilizadas para medição de campo elétrico no LOG. (a) Antena flat-plate elevada. (b) antena flat-plate nivelada com o chão.	79
Figura 41 – Localização dos sensores no experimento de Mosaddeghi, et al (2007).	80
Figura 42 –Registro das medições de campo magnético, sendo as linhas solidas azuis relativas aos campos medidos no topo do prédio e as linhas tracejadas vermelhas ao nível do solo.	80
Figura 43 – Registro das medições de campo elétrico, sendo as linhas solidas azuis relativas aos campos medidos no topo do prédio e as linhas tracejadas vermelhas ao nível do solo.	81
Figura 44 –Histograma da razão do campo elétrico pelo campo magnético referente a 43 descargas de retorno registradas em 2008 em Gainesville, Florida. MG representa a Média Geométrica e N o número total de eventos.	83
Figura 45 – Ilustração do princípio de operação de uma antena Loop.	84
Figura 46 – Diagrama de Campo Bidimensional de um Antena Loop.	85
Figura 47 – Representação através de circuitos elétricos da relação entre a densidade de fluxo magnético sentido pela antena e a tensão de saída V_{out} . Sendo a antena representada pelo seu equivalente de Thevenin.	86
Figura 48 –Antenas loop cruzadas. ϑ é o ângulo indicado pela razão entre as tensões induzidas pelo campo magnético H nas bobinas Leste-Oeste (VLO) e Norte-Sul (VNS).	87
Figura 49 –Determinação do local de incidência de um raio com três sensores MDF.	88
Figura 50 – Exemplo de antenas loop cruzadas fabricadas pela empresa Global Atmospheric, que ficou em operação nos altos da reitoria da UFPA. Sendo o primeiro sistema de localização e detecção de raios na região.	89
Figura 51 –Ilustração da localização de descargas atmosféricas utilizando o método TOA com 3 sensores.	90
Figura 52 – Exemplo do uso do TOA em Belém-PA.	91
Figura 53 –Exemplo de antenas utilizadas na técnica de interferometria para localização de raios.	92
Figura 54 – Diagrama de blocos de duas antenas conectadas a pré-amplificadores com ganhos distintos.	96

Figura 55 – Antena Telescópica com interfase BNC adotada como elemento sensor do sistema de detecção de raios.....	98
Figura 56 – Microcontrolador PSoC 5.....	99
Figura 57 – Arquitetura do Microcontrolador PSoC 5.....	100
Figura 58 – Módulo GPS 6M.....	101
Figura 59 – Foto do Lightning Observatory in Gainesville – LOG 1.....	103
Figura 60 – Foto do Lightning Observatory in Gainesville – LOG 2.....	103
Figura 61 – Foto de parte do Sistema desenvolvido instalado no LOG.....	104
Figura 62 –Diagrama de blocos do “Sistema de detecção e armazenamento de formas de onda de raios” na literatura internacional ele é conhecido como “Lightning Detection and Waveform Storage System” (LDWSS).....	108
Figura 63 –Antena whip e pré-amplificador do LDWSS instalado no LOG.....	109
Figura 64 –Esquema elétrico da antena e do pré-amplificador do LDWSS.....	109
Figura 65 – Diagrama de blocos do PGA.....	112
Figura 66 –Diagrama filtro programável passa-faixa.....	113
Figura 67 – Exemplo de um flash contendo 4 descargas de retorno, sendo que o painel superior apresenta seu registro contínuo pelo sistema de medição de campo elétrico no LOG e o painel inferior as mesmas descargas de retorno registradas pelo LDWSS.....	116
Figura 68 – Exemplo de uma mesma descarga de retorno registrada em duas bandas de frequência distintas.....	117
Figura 69 – Exemplo de uma mesma descarga de retorno registrada pelo sistema de alto ganho, e apresentando saturação e distorção, e registrada pelo sistema de baixo ganho apresentando a forma real do sinal.....	118
Figura 70 – Exemplo do registro de pulsos de colapsos preliminares registrados pelo sistema de alto e baixo ganho simultaneamente.....	118
Figura 71 – Formas de onda (inicial) do campo elétrico gerado pela mesma descarga de retorno e registrada pelo LOG (a) e pelo LDWSS (b).....	119
Figura 72 – Campo elétrico registrado no LOG em V/m versus Campo elétrico registrado pelo LDWSS em unidades do digitalizador u.d referente a 26 descargas de retorno negativas.....	120
Figura 73 – Um dos dois trens de pulsos de colapsos preliminares que antecederam descargas de retorno negativas. Os círculos verdes indicam os pontos de medição do campo elétrico para comparação.....	121
Figura 74 – Campo elétrico registrado no LOG em V/m versus Campo elétrico registrado pelo LDWSS em unidades do digitalizador u.d referente a 39 pontos máximos e 18 pontos mínimos de 2 trens de pulsos de colapsos preliminares.....	122
Figura 75 – Formas de onda (a) da corrente diretamente medida na base do canal em Camp Blanding -CB e (b) do campo elétrico registrado pelo LDWSS no LOG a 45 km do canal.....	124
Figura 76 – Magnitude das correntes de pico inferidas pela equação empírica de Rakov e campo elétrico registrado pelo LDWSS versus correntes de pico relatadas pela NLDN.....	126
Figura 77 – Localização dos 965 CIDs analisados neste estudo, são representadas pelos pontos vermelhos. O círculo pontilhado delimita o raio de 500 km do local de instalação do sensor.....	127
Figura 78 – Fluxograma ilustrando o algoritmo semiautomático utilizado para filtrar CIDs.....	128
Figura 79 – Forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo, espectrograma e espectro de frequência de um CID que ocorreu à 200 km do sensor. O pico de frequência em aproximadamente 150 kHz está relacionado a ruídos do sistema.....	128
Figura 80 – Critérios de isolamento dos CIDs. (a) Critérios temporais. (b) Critérios espaciais.....	132
Figura 81 – Histograma da diferença temporal entre o CID e o evento após sua ocorrência.....	134
Figura 82 – Histograma da diferença espacial entre o CID e o evento após sua ocorrência.....	134
Figura 83 – Localização de todos os 82 eventos analisados.....	136
Figura 84 – Representação esquemática da propagação, de um sinal eletromagnético gerado por um raio, entre o guia de onda formado pela ionosfera e a Terra considerando a geometria esférica da Terra.....	137
Figura 85 – Representação esquemática da propagação, de um sinal eletromagnético gerado por um raio, entre o guia de onda formado pela ionosfera e a Terra considerando a geometria plana da Terra.....	138
Figura 86 – Esquema de medição dos dois métodos utilizados para medir o atraso no tempo de chegada t_1 entre a onda direta e a primeira onda céu, para raios nuvem-solo.....	138

Figura 87 – Representação esquemática da propagação, de um sinal eletromagnético gerado por um CID, entre o guia de onda formado pela ionosfera e a Terra considerando a geometria plana da Terra.	139
Figura 88 – Esquema de medição da diferença dos tempos de chegada t_1 e t_2 entre a onda direta e a (B) primeira e (C) segunda ondas céu.	140
Figura 89 – Imagem de satélite indicando as condições meteorológicas durante o registro dos 60 eventos. Os pontos vermelhos representam a localização de descargas atmosféricas reportado pela rede STARNET para o mesmo intervalo temporal. O sensor está localizado no centro do círculo delimitado pelo círculo azul.	142
Figura 90 – Formas de onda dos 60 eventos registrados. No painel superior temos os eventos na banda ULF-VLF e no painel inferior em VLF.	143
Figura 91 – Formas de onda dos eventos identificados com a polaridade reversa.	143
Figura 92 – Formas de onda da componente vertical E_z do campo elétrico total, calculadas utilizando o modelo de linha de transmissão (TL) para a corrente no canal e assumindo a corrente padrão (CIGRE) para a primeira descarga de retorno. O traçado azul representa E_z a 10 km, vermelho a 20 km, verde a 30 km, amarelo a 40 km e magenta a 50 km.	145
Figura 93 – Formas de onda da componente vertical E_z do campo elétrico registradas pelo LDWSS e armazenadas no banco de dados. O traçado azul representa a média das formas de onda registradas a 10 km, vermelho a 20 km, verde a 30 km, amarelo a 40 km e magenta a 50 km.	145
Figura 94 – Histograma da distribuição de raios (-CG) quanto a distância.	146
Figura 95 – Histograma da distribuição de raios (+CG) quanto a distância.	147
Figura 96 – Histograma da distribuição de raios (CID) quanto a distância.	147
Figura 97 – Relação entre a média aritmética da corrente de pico e intervalos de distância de 50 km, variando de 0 a 500 km. Para raios nuvem-solo negativos.	148
Figura 98 – Relação entre a média aritmética da corrente de pico e intervalos de distância de 50 km, variando de 0 a 500 km. Para raios nuvem-solo positivos.	148
Figura 99 – Relação entre a média aritmética da corrente de pico e intervalos de distância de 50 km, variando de 0 a 500 km. Para CIDs.	149
Figura 100 – Ilustração da subdivisão dos agrupamentos gerados para descargas nuvem-solo positivas e negativas para cada intervalo de distância.	150
Figura 101 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 50 km variando de 0 a 250 km para primeiras descargas de retorno em raios nuvem-solo negativos (-CG) observados no período diurno.	152
Figura 102 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 50 km variando de 0 a 250 km para primeiras descargas de retorno em raios nuvem-solo negativos (-CG) observados no período noturno.	153
Figura 103 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 50 km variando de 0 a 250 km para descargas de retorno subsequentes em raios nuvem-solo negativos (-CG) observados no período diurno.	153
Figura 104 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 50 km variando de 0 a 250 km para descargas de retorno subsequentes em raios nuvem-solo negativos (-CG) observados no período noturno.	154
Figura 105 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 50 km variando de 250 a 500 km para primeiras descargas de retorno em raios nuvem-solo negativos (-CG) observados no período diurno.	154
Figura 106 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 50 km variando de 250 a 500 km para primeiras descargas de retorno em raios nuvem-solo negativos (-CG) observados no período noturno.	155
Figura 107 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 50 km variando de 250 a 500 km para descargas de retorno subsequentes em raios nuvem-solo negativos (-CG) observados no período diurno.	155
Figura 108 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 50 km variando de 250 a 500 km para descargas de retorno subsequentes em raios nuvem-solo negativos (-CG) observados no período noturno.	156
Figura 109 – Comparação entre as formas de primeiras e subsequentes descargas de retorno negativas (-CG) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 10 e 25 km.	157
Figura 110 – Comparação entre as formas de primeiras e subsequentes descargas de retorno negativas (-CG) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 50 e 60 km.	157

Figura 111 – Comparação entre as formas de primeiras e subsequentes descargas de retorno negativas (-CG) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 100 e 110 km.....	158
Figura 112 – Comparação entre as formas de primeiras e subsequentes descargas de retorno negativas (-CG) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 150 e 160 km.....	158
Figura 113 – Comparação entre as formas de primeiras e subsequentes descargas de retorno negativas (-CG) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 200 e 250 km.	159
Figura 114 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 100 km variando de 0 a 500 km para primeiras descargas de retorno em raios nuvem-solo positivos (+CG) observados no período diurno.	160
Figura 115 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 100 km variando de 0 a 500 km para primeiras descargas de retorno em raios nuvem-solo positivos (+CG) observados no período noturno.	160
Figura 116 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 100 km variando de 0 a 500 km para descargas de retorno subsequentes em raios nuvem-solo positivos (+CG) observados no período diurno.	161
Figura 117 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 100 km variando de 0 a 500 km para descargas de retorno subsequentes em raios nuvem-solo positivos (+CG) observados no período noturno.	161
Figura 118 – Comparação entre as formas de primeiras descargas de retorno positivas (+CG) observadas no período diurno e noturno no intervalo de distância entre 50 e 60 km.	162
Figura 119 – Comparação entre as formas de primeiras descargas de retorno positivas (+CG) observadas no período diurno e noturno no intervalo de distância entre 130 e 180 km.	163
Figura 120 – Comparação entre as formas de primeiras descargas de retorno positivas (+CG) observadas no período diurno e noturno no intervalo de distância entre 290 e 300 km.	163
Figura 121 – Comparação entre as formas de primeiras e subsequentes descargas de retorno positivas (+CG) observadas no período diurno no intervalo de distância entre 50 e 80 km.	164
Figura 122 – Comparação entre as formas de primeiras e subsequentes descargas de retorno positivas (+CG) observadas no período diurno no intervalo de distância entre 230 e 250 km.	164
Figura 123 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 100 km variando de 0 a 500 km para raios (CID).	165
Figura 124 – Comparação entre as formas de onda média para raios (CID) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 0 e 100 km.....	166
Figura 125 – Comparação entre as formas de onda média para raios (CID) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 100 e 200 km.....	166
Figura 126 – Comparação entre as formas de onda média para raios (CID) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 200 e 300 km.....	167
Figura 127 – Comparação entre as formas de onda média para raios (CID) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 300 e 400 km.....	167
Figura 128 – Exemplo de uma forma de onda representativa de um Super +IN, com indicações de algumas características como: Overshoot de polaridade inversa (OPI), Meio ciclo inicial (MCI) e par de reflexão ionosférica.	169
Figura 129 – Exemplo de formas de onda de um CID em um Super +IN detectados a distâncias semelhantes entre 149 e 154 km.....	170
Figura 130 – Exemplo de formas de onda de um CID em um Super +IN detectados a distância de 234 km.	171
Figura 131 – Exemplo de formas de onda de um CID em um Super +IN detectados a distâncias semelhantes. .	172
Figura 132 – Exemplo de formas de onda de um CID em um Super +IN detectados a distâncias semelhantes. .	173
Figura 133 – Possível local de ocorrência dos Super IN.....	175
Figura 134 – Mapa de localização do LDWSS em Belém, PA.	176
Figura 135 – Local de instalação do LDWSS no prédio do Censipam, regional Belém.....	177
Figura 136 – Sistema de digitalização e notebook instalados no Censipam, regional Belém.....	177
Figura 137 – Comparação entre formas de onda de campos elétricos gerados por pulsos de colapsos preliminares (PB) registrados na Florida, U.S (primeira coluna, traçado em azul) e registrados no Pará, BR (segunda coluna, traçado em verde). O evento detectado quando o LDWSS estava operando no LOG apresenta informações da distância de detecção e corrente de pico do evento detectado.	178

Figura 138 – Comparação entre formas de onda de campos elétricos gerados por raios nuvem-solo negativos registrados na Florida, U.S (primeira coluna, traçado em azul) e registrados no Pará, Brasil (segunda coluna, traçado em verde). Os eventos detectados quando o LDWSS estava operando no LOG apresentam informações da distância de detecção e corrente de pico do evento detectado.	179
Figura 139 – Comparação entre formas de onda de campos elétricos gerados por raios nuvem-solo positivos registrados na Florida, U.S (primeira coluna, traçado em azul) e registrados no Pará, BR (segunda coluna, traçado em verde). Os eventos detectados quando o LDWSS estava operando no LOG apresentam informações da distância de detecção e corrente de pico do evento detectado.	180
Figura 140 – Exemplos de CIDs registrados pelo LDWSS em operação na região amazônica.	181
Figura 141 – Comparação entre formas de onda de campos elétricos gerados por super raios intra-nuvem positivos registrados na Florida, U.S (primeira coluna, traçado em azul) e registrados no Pará, BR (segunda coluna, traçado em verde). O evento detectado quando o LDWSS estava operando no LOG apresenta informações da distância de detecção e corrente de pico do evento detectado.	181

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1. Principais modelos de engenharia para a corrente de retorno de um raio nuvem-solo.</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 2. Modelos de linha de Transmissão para $t \geq z'/v_f$.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 3. Modelos do tipo fonte de corrente viajante para $t \geq z'/v_f$.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 4. Características da performance de diferentes tipos de redes de detecção de raios modernas, de acordo com sua respectiva banda de operação.</i>	<i>94</i>
<i>Tabela 5. Estatísticas da razão entre o pico de campo elétrico em V/m (LOG) e o pico de campo elétrico em unidade do digitalizador d.u (LDWSS)</i>	<i>122</i>
<i>Tabela 6. Comparação da corrente de pico de uma descarga de retorno calculada utilizando equações empíricas de conversão de campo-em-corrente com a corrente de pico medida na base do canal e a reportada pela NLDN.</i>	<i>125</i>
<i>Tabela 7. Classificação das formas de onda de campos elétricos produzidos por CIDs (1).....</i>	<i>129</i>
<i>Tabela 8. Classificação das formas de onda de campos elétricos produzidos por CIDs (2).....</i>	<i>130</i>
<i>Tabela 9. Classificação das formas de onda de campos elétricos produzidos por CIDs (3).....</i>	<i>131</i>
<i>Tabela 10. Porcentagem de CIDs para cada categoria de isolamento, considerando os 8 critérios adotados.</i>	<i>133</i>
<i>Tabela 11. Contexto de ocorrência detalhado do CIDs considerando o parâmetro temporal 500 ms e espacial 10 km.</i>	<i>133</i>
<i>Tabela 12. Porcentagem de CIDs para cada categoria de isolamento, considerando diferentes faixas de corrente.</i>	<i>135</i>
<i>Tabela 13. Estatísticas da estimativa da altura da reflexão ionosférica utilizando formas de onda do campo elétrico de raios NS e CIDs.....</i>	<i>141</i>
<i>Tabela 14. Porcentagem de super ICs para cada categoria de isolamento, considerando os 8 critérios adotados.</i>	<i>174</i>
<i>Tabela 15. Contexto de ocorrência detalhado do CIDs considerando o parâmetro temporal 500 ms e espacial 10 km.</i>	<i>174</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Tema e Problema	20
1.2	Objetivos	32
1.2.1	Objetivo geral	32
1.2.2	Objetivos específicos	33
1.3	Estrutura do trabalho	33
2	NUVENS DE TEMPESTADE, TIPOS DE RAIOS E SEUS PROCESSOS	35
2.1	Distribuição das cargas elétricas em nuvens de tempestade	35
2.2	Mecanismos de eletrificação de nuvens	36
2.2.1	Teoria da convecção	36
2.2.2	Teoria da precipitação	37
2.3	Tipos de Raios	39
2.4	Componentes de um raio negativo descendente	41
2.5	Raios induzidos (Raios Trigados)	43
3	CÁLCULO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS RADIADOS POR RAIOS E EQUAÇÕES PARA ESTIMAR SUA CORRENTE DE PICO	45
3.1	Equações para cálculo de campo elétrico e magnético associado a raios	45
3.2	Equações de conversão de campo em corrente	58
3.2.1	Equações teóricas	58
3.2.2	Equações empíricas	59
4	COMPORTAMENTO DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS ASSOCIADOS A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	61
4.1	Raios nuvem-solo negativos e seus componentes	62
4.2	Descarga nuvem-solo observada a curta distância	62
4.3	Descarga nuvem-solo observada a longa distância	64
4.4	Raios a distâncias muito longas (reflexão ionosférica)	66
4.5	Raios positivos	67
4.6	Raios Nuvem	68
5	MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS PARA DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE RAIOS	71
5.1	Métodos de detecção de raios	71
5.1.1	Medição de campo elétrico.....	71
5.1.2	Cuidados com a calibração de sensores de campo elétrico	77
5.1.3	Medição de campo magnético	83

5.2	Métodos de localização de raios	86
5.2.1	MDF	87
5.2.2	TOA	89
5.2.3	Interferometria	92
6	METODOLOGIA	93
6.1	Identificação dos parâmetros a serem otimizados e aprimorados	93
6.2	Meios de otimização	96
6.2.1	Ampliação do alcance dinâmico de medição	96
6.2.2	Flexibilidade na largura de banda de detecção	97
6.2.3	Antena capacitiva de fácil aquisição	97
6.2.4	Sistema de digitalização especialista	98
6.2.5	Identificação temporal do evento detectado	100
6.2.6	Sistema de fácil transporte e instalação (móvel)	101
6.3	Validação dos dados registrados	102
6.3.1	Primeiro método de validação	102
6.3.2	Segundo método de validação	105
7	SISTEMA DE DETECÇÃO E ARMAZENAMENTO DE FORMAS DE ONDA DE RAIOS “LIGHTNING DETECTION AND WAVEFORM STORAGE SYSTEM - (LDWSS)”	107
7.1	Antena <i>whip</i> e pré-amplificador	109
7.2	Circuito de condicionamento de sinais analógicos.....	110
7.2.1	Amplificador de ganho programável (PGA)	111
7.2.2	Filtro programável	112
7.3	Sistema de digitalização	114
7.4	Sistema de armazenamento baseado em computador	114
7.5	Modos de funcionamento	115
7.5.1	Canal único	115
7.5.2	Banda dupla	116
7.5.3	Alcance dinâmico	117
7.6	Calibração do LDWSS	119
8	APLICAÇÃO / UTILIZAÇÃO DO LDWSS NA INVESTIGAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	124
8.1	Estimação da corrente de pico de raios nuvem-solo artificiais e naturais.	124
8.2	Classificação de CIDs	127
8.3	Contexto de ocorrência dos CIDs.....	132

8.4	Investigação da interação de raios NS (-CG) e IN (CID) com a ionosfera.....	135
8.4.1	Cálculo da altura da reflexão ionosférica a partir de raios nuvem-solo	136
8.4.2	Cálculo da altura da reflexão ionosférica a partir de CIDs.....	139
8.4.3	Resultados.....	140
8.5	Investigação da diferença entre formas de ondas detectadas em diferentes bandas de frequência.....	141
8.6	Banco de dados de formas de onda do campo elétrico de descargas atmosféricas.....	144
8.6.1	Assinatura de formas de onda do campo elétrico gerado por raios no domínio do tempo e da frequência.	149
8.7	Super descargas nuvem (Super +IN)	168
8.7.1	Principais diferenças entre CIDs e as super descargas nuvem positivas	169
8.7.2	Local de ocorrência dos Super +IN no interior das nuvens.....	174
8.8	Instalação e operação do LDWSS na região Amazônica	176
9	CONCLUSÃO	182
	REFERÊNCIAS	185
	APÊNDICE A - COMPORTAMENTO DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS ASSOCIADOS A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS REGISTRADOS PELO LDWSS	192
	APÊNDICE B – FORMAS DE ONDA DO CAMPO ELÉTRICO RADIADO POR RAIOS A DIFERENTES DISTÂNCIAS NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA.	200

1 INTRODUÇÃO

Uma descarga atmosférica pode ser definida como um transiente eletromagnético de alta corrente (geralmente dezenas de quiloampères) que atravessa o ar, transferindo cargas entre a atmosfera e a Terra ou entre diferentes partes da atmosfera. Na literatura nacional podemos encontrar a nomenclatura “raio” para o termo descarga atmosférica, na literatura internacional o termo utilizado tanto para descarga atmosférica quanto para raio é “*lightning*”. A principal fonte dos raios no planeta Terra são as nuvens denominadas cumulonimbus, ou simplesmente nuvens de tempestade.

1.1 Tema e Problema

Estima-se que a taxa de incidência de raios no planeta esteja entre algumas dezenas a 100 raios por segundo. Somente no Brasil estima-se a ocorrência de aproximadamente 58 milhões de raios por ano, pela média dos anos de 2000 a 2009. Desse total, quase um quinto incidiu no estado do Amazonas (11 milhões/ano), seguido pelos estados do Pará (7,38 milhões/ano) e Mato Grosso (6,81 milhões/ano) (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO, 2013), todos na Amazônia Legal. Segundo o ranking dos 10 municípios brasileiros com maior incidência de raios por km², disponibilizado pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), 8 (oito) desses municípios encontram-se no estado do Pará. Apesar das atuais altas taxas de incidência de raios, espera-se que esses números aumentem em cerca de 50%, devido ao aquecimento global no século XXI (ROMPS et al., 2014).

A ocorrência de um raio envolve a criação de um canal ionizado (plasma) carregando dezenas de quiloampères de corrente elétrica, que pode atingir uma temperatura de 30.000° K. Devido a essa característica, pode tornar-se uma ameaça para diversos serviços - como aviação, transmissão e distribuição de energia elétrica, sistemas de comunicação - e até mesmo para a vida humana. Por outro lado, a ocorrência de raios influencia no balanço global de NO_x (Óxidos de nitrogênio, como NO e NO₂) controlando grandemente a quantidade de ozônio na atmosfera, (RAKOV; UMAN, 2003).

No Brasil, um dos setores mais afetados pela incidência de raios é o setor elétrico. Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2007), o prejuízo anual desse setor estava avaliado em cerca de R\$ 600 milhões, seguido pelas empresas de telecomunicações, com cerca

de R\$ 100 milhões, e pelas empresas seguradoras e de eletroeletrônicos, com cerca de R\$ 50 milhões cada. No setor elétrico os raios podem causar queima de equipamentos, desligamento de linhas de transmissão e aumento das despesas de manutenção.

O setor elétrico brasileiro está em plena expansão para atender a demanda nacional, principalmente na Região Norte. A Região Amazônica encontra-se no centro deste crescimento, pois possui grandes reservatórios de água, os quais são a principal fonte de geração de energia elétrica no país. Recentemente, algumas usinas hidrelétricas entraram em operação na Região Amazônica, como: Usina Hidrelétrica de Belo Monte; Usina Hidrelétrica Santo Antônio; Usina Hidrelétrica de Jirau e; Usina Hidrelétrica Teles Pires. Outras usinas encontram-se em fase de planejamento e licitação, como é o caso das usinas do complexo do Tapajós.

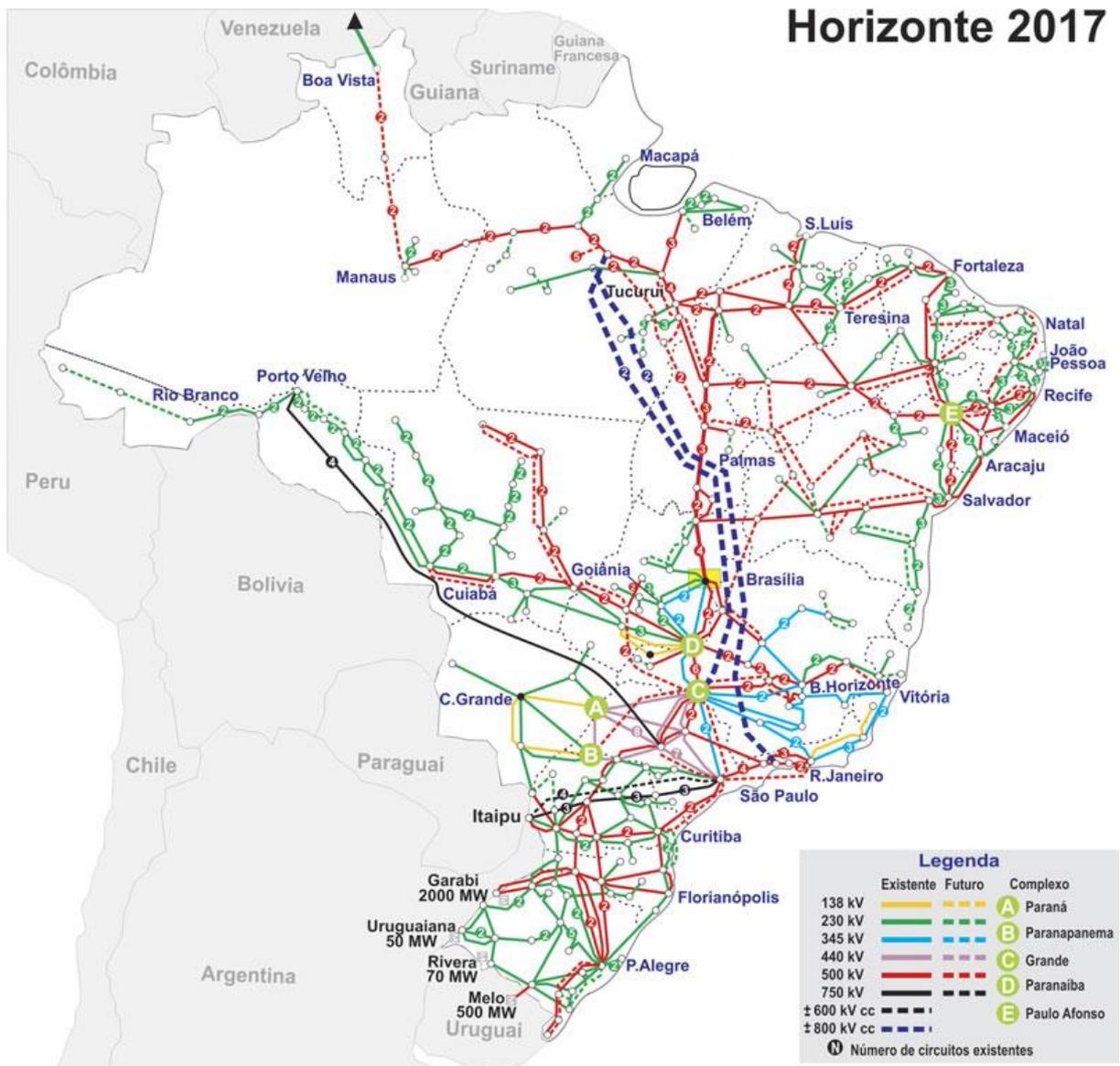
Essas usinas hidrelétricas estão distantes, tanto dos grandes centros de consumo do país como entre elas, além de serem localizadas dentro da Floresta Amazônica. Por esses motivos, altas torres de transmissão de energia tornam-se necessárias para transpor os rios e a floresta, objetivando causar o mínimo impacto possível à fauna e flora local. As torres podem atingir alturas de até 300 m (Figura 1), segundo a ELETRONORTE. Recentemente foram instaladas linhas de transmissão interligando a UHE de Tucuruí às cidades de Manaus e Macapá, como pode-se observar na Figura 2. Para tal feito foi necessária a construção de torres, para as linhas de transmissão, com alturas suficientes para transpor as copas das árvores e grandes rios. Estão previstas linhas de transmissão entre Manaus e Boa Vista, e uma grande linha de transmissão em 800 kV, em corrente contínua, entre a UHE de Tucuruí e o Complexo Grande (Figura 2).

Figura 1 – Torres de transmissão 238 e 241 da linha de transmissão Tucuruí-Macapá-Manaus. Localizadas nas margens do Rio Amazonas, na cidade de Almeirim, estado do Pará, Brasil. Ambas possuem 300 metros de altura com um vão de 2,5 quilômetros entre elas.



Fonte: Vanilton (2006).

Figura 2 - Horizonte 2017 do sistema elétrico de potência Brasileiro.



Fonte: ONS (2017).

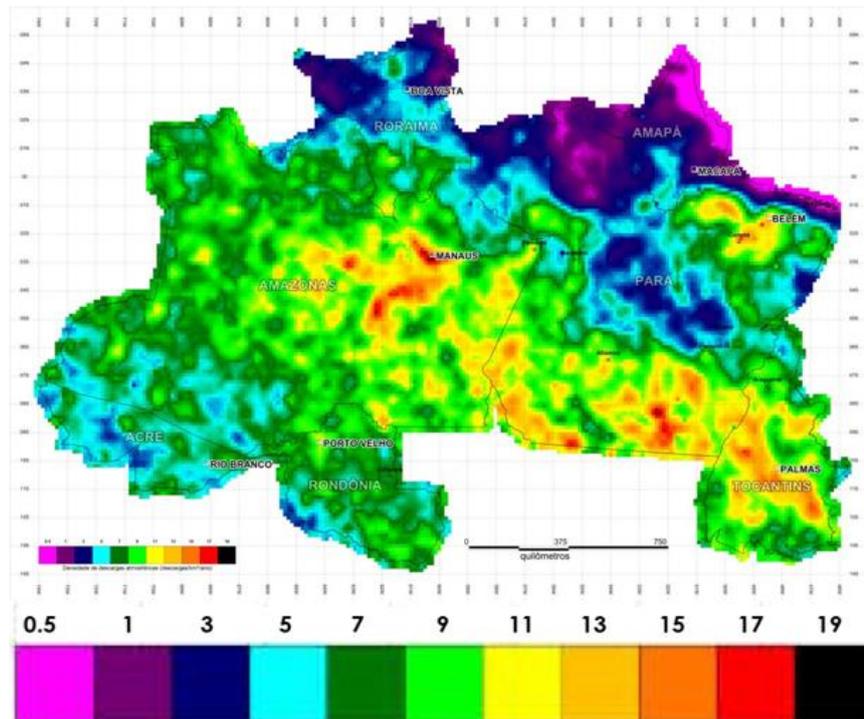
Essas novas torres de transmissão, com certeza estão mais propícias a serem atingidas por raios. Segundo Eriksson (1987), podemos calcular a quantidade de raios que irá atingir uma torre com altura maior que 20 m, pela seguinte equação:

$$N = 24 \times 10^{-6} H_s^{2.05} N_g \quad (1)$$

Onde H_s representa a altura da torre em metros e N_g representa a densidade de raios na região da torre em km^2/ano .

Figura 3 – Mapa de densidade de raios Região Norte (Brasil).

Mapa de densidade de raios Região Norte (Brasil)



Densidade de descargas atmosféricas (Descarga/km²/ano)

Fonte: INPE (2017).

De acordo com a equação 1, e considerando a torre mais alta (300 m), bem como uma densidade de raios na região de instalação da torre, de 11 km²/ano, tem-se que a torre será atingida por aproximadamente 30 raios por ano.

Outro parâmetro importante é a quantidade de raios que irá atingir, não somente as torres, mas a linha de transmissão como um todo. A taxa de incidência de raios em linhas de transmissão N_s , dada em raios por 100 km, foi estabelecida pela norma internacional IEEE std 1243-1997. A equação relacionada a essa norma encontra-se abaixo:

$$N_s = \frac{N_g(28h^{0,6} + b)}{10} \quad (2)$$

$$h = H_s - 2d/3 \quad (3)$$

Onde N_g é a densidade de raios em km^2/ano , h é a altura efetiva da torre em metros, encontrado pela equação (3), na qual d representa a vergadura do condutor, e b é a distância entre os condutores de guarda aterrados (DE SÁ, 2011).

Para o caso da linha de transmissão Tucuruí-Manaus, por exemplo, assumindo uma densidade de raios constante ao longo da linha, de aproximadamente 9 raios/ km^2/ano , e uma altura média de 70 m para as torres, tem-se que a linha será atingida por 4.464 raios por ano.

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (2023), que é o vigente no país, o sistema interligado de transmissão da Região Norte do Brasil atende os estados do Pará, Maranhão, Tocantins, e parte do estado do Amazonas. Além das cargas industriais nos estados do Pará e Maranhão, esse sistema é suprido quase integralmente pela energia gerada na UHE de Tucuruí, e durante o período seco recebe energia das regiões Sudeste/Centro-Oeste e Sul, por meio da interligação Norte-Sudeste/Centro-Oeste. No período úmido, os excedentes de energia da Região Norte são enviados tanto para a Região Nordeste como para as regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul.

Tendo em vista as “previstas” altas taxas de incidência de raios em torres e linhas de transmissão de energia na Amazônia, e considerando o papel essencial das torres e linhas de transmissão no desenvolvimento do país, é, portanto, fundamental o monitoramento e investigação dos raios nessa região, pois no período úmido (quando ocorre maior incidência de raios na região) o sistema está fornecendo energia para boa parte do país.

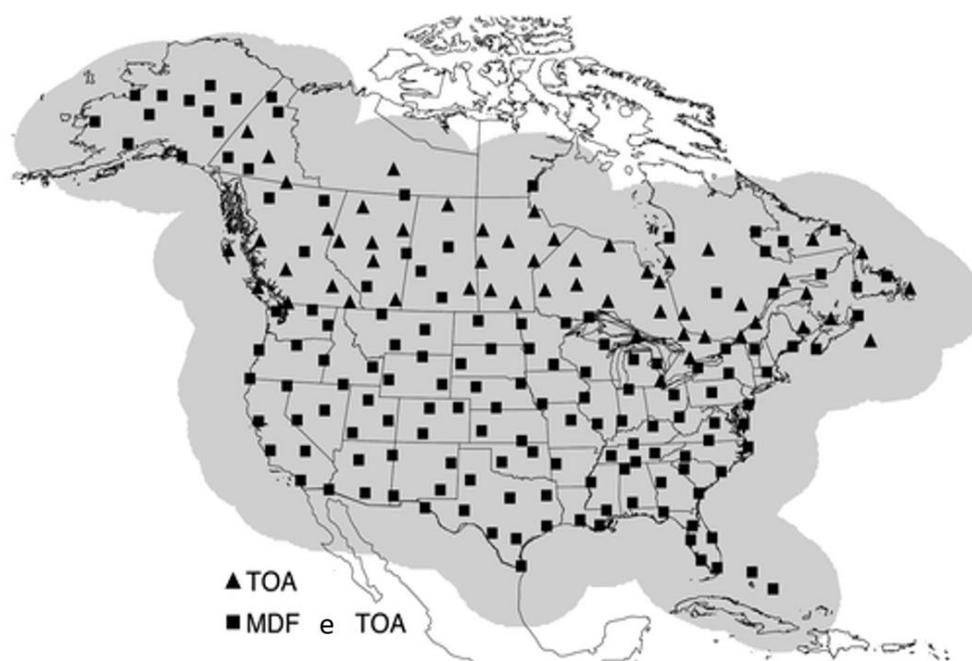
O monitoramento de raios é realizado através dos Sistemas de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas, também conhecidos pela sigla LLS, do inglês “*Lightning Location System*”, que se utilizam da medição dos campos eletromagnéticos gerados por descargas atmosféricas. Atualmente existem numerosos LLS que usam diferentes tipos de sensores e técnicas de detecção, permitindo detectar a atividade elétrica entre as nuvens e a terra, entre nuvens e o ar e entre nuvens e nuvens. Tais sistemas possibilitam, não apenas recuperar a distribuição geográfica e de frequência das incidências dos raios em uma escala global, mas também permitem detalhar informações individuais de pulsos “*strokes*” e relâmpagos “*flashes*”, por meio de reconstrução tridimensional do desenvolvimento do canal da descarga, conforme observado pelos atuais LMA (“*Lightning Mapping Arrays*”) (RISON et al., 1999), (THOMAS, 2004) e (DEFER et al., 2015).

Monitoramento de raios no Mundo

As principais redes que monitoram raios no mundo são a norte americana “*North American Lightning Detection Network*” (NALDN) e a europeia “*European Cooperation for Lightning Detection*” (EUCLID).

A NALDN foi criada em 1998, e é uma rede comercial de detecção de raios composta pela junção da Rede Nacional de Detecção de Raios dos EUA - “*National Lightning Detection Network*” (NLDN), que opera desde 1987 - com a Rede Canadense de Detecção de Raios, “*Canadian Lightning Detection Network*” (CLDN), inaugurada nesse mesmo ano. A NALDN foi desenvolvida para fornecer informações sobre raios, detectando e localizando com precisão a maioria das descargas de retorno nuvem-solo e uma pequena fração de raios produzidos por descargas nas nuvens. A NALDN permite monitorar a atividade de raios em tempo real, para uso na proteção de florestas da América do Norte, para aplicações forenses - como nas indústrias de energia elétrica e seguros - e para uma ampla gama de aplicações em previsão de tempo e climatologia. A NLDN dos EUA é de propriedade da empresa Vaisala, enquanto a CLDN é de propriedade da estatal “*Environment Canada*”. Ambas estão completamente interconectadas, com todo o processamento de dados realizado pela Vaisala no Centro de Controle da Rede em Tucson, Arizona, EUA. Em abril de 2010 a NALDN contava com cerca de 200 sensores (Figura 4), utilizando-se da técnica de detecção indicação de direção magnética, “*Magnetic Direction Finder*” (MDF), e/ou da técnica do tempo de chegada, “*Time Of Arrival*” (TOA) (ORVILLE et al., 2011).

Figura 4 – Mapa da localização dos sensores da NALDN em 2010.



Fonte: Orville et al. (2011).

A EUCLID iniciou suas atividades a partir da cooperação de vários países (Áustria, França, Alemanha, Itália, Noruega e Eslovênia). Esses países interligaram suas redes nacionais de detecção, com o objetivo de fornecer aos usuários finais informações de alta qualidade e homogeneidade em escala europeia. Desde então, outros países como Espanha, Portugal, Finlândia e Bélgica aderiram à rede. Em dezembro de 2014, a rede EUCLID empregava 149 sensores (Figura 5), 7 LPATS, 10 IMPACT, 31 IMPACT ES/ESP e 101 LS700x (SCHULZ et al., 2016). Todos os diferentes tipos de sensores, fabricados pela empresa Vaisala, estão operando na mesma faixa de frequência com ganhos e sensibilidade de sensores calibrados individualmente, a fim de considerar as condições locais de instalação de cada sensor. Seu principal centro de processamento fica em Viena, na Áustria, operado pela estatal “*Austrian Lightning Detection and Information System*” (ALDIS).

Figura 5 – Mapa da localização dos sensores da EUCLID em 2014.



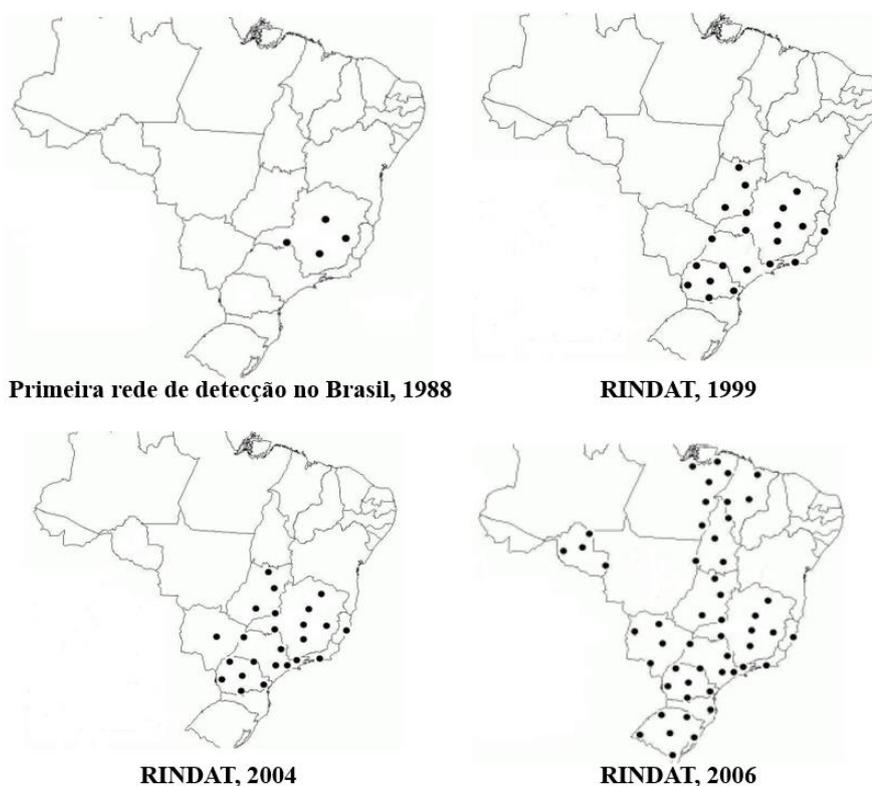
Fonte: Schulz et al. (2016).

Monitoramento de raios no Brasil

No Brasil, a primeira rede de detecção operando em LF, com apenas quatro sensores, foi implementada pela Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), em 1988, constituindo-se também no primeiro sistema de localização de raios da América do Sul (PINTO JUNIOR, 2017). Em 1996, foi a vez da Companhia Paranaense de Eletricidade (COPEL) ter o seu sistema. Dois anos depois a empresa Furnas Centrais Elétricas S.A deu início ao projeto de aquisição e implantação do SISDAT – Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas – que entrou em operação em agosto de 1998. Neste mesmo ano, um convênio de cooperação técnico-científico, firmado entre a CEMIG e COPEL, através do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) e Furnas, tornou possível a integração dos sistemas de detecção de descargas atmosféricas operados por estas empresas formando a Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas (RIDAT) (BENETTI et al., 2004). Posteriormente, em 2004, o INPE passou a fazer parte da rede, a qual veio a se chamar Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT) (PINTO JR., 2005). Em 2005, a rede contava com 25 sensores, mas no ano seguinte foi integrada a duas novas redes que estavam em início de operação, uma do

projeto Sistema Integrado de Detecção de Descargas Atmosféricas e Eventos Meteorológicos Críticos (SIDDEM), que atuava nas regiões Sul e Centro-oeste, e outra do projeto Sistema de Vigilância da Amazônia (SIVAM), com foco na Amazônia Oriental e parte do Nordeste. A Figura 6 demonstra a evolução no monitoramento de raios em território nacional entre os anos 1988 e 2006. Atualmente, a RINDAT possui 42 sensores (Figura 7) (NACCARATO et al., 2016).

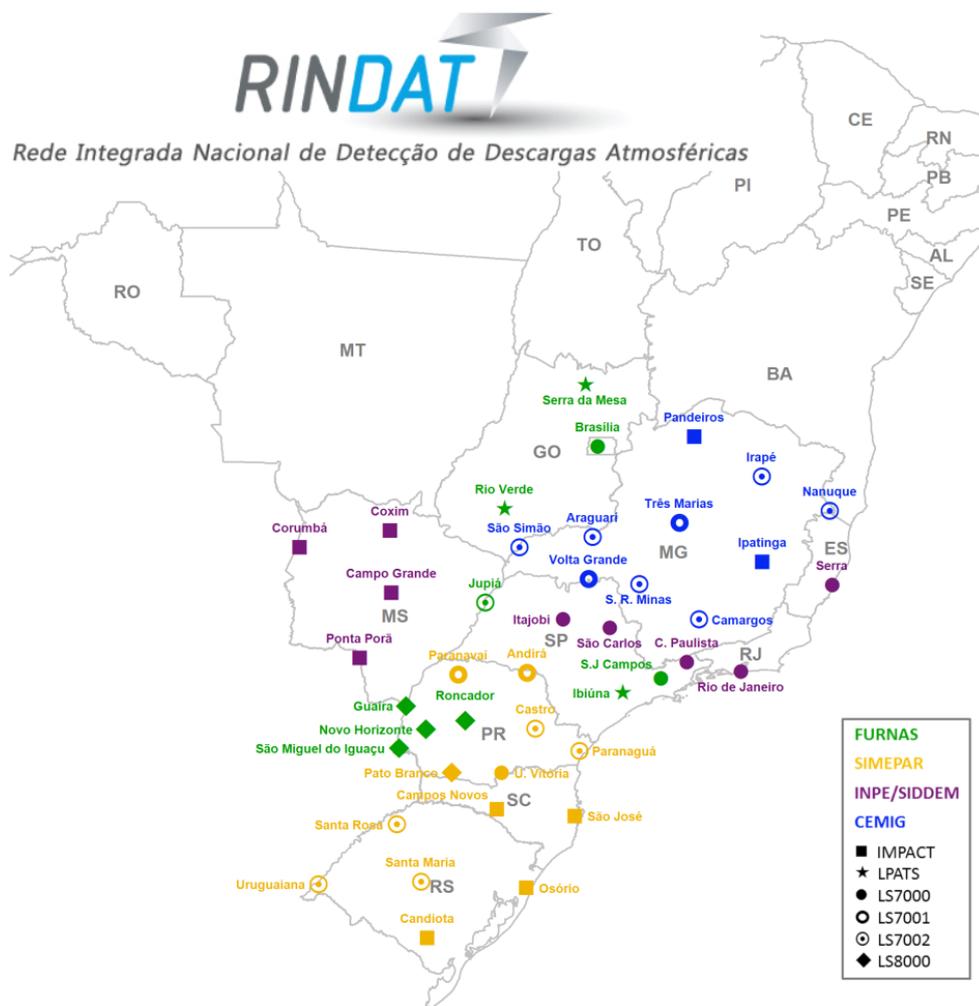
Figura 6 – Mapa com a localização dos sensores utilizados no monitoramento de raios no Brasil entre 1988 e 2006.



Fonte: Adaptado de Pinto Jr. et al. (2006).

Em agosto de 2011, foi inaugurada a BrasilDAT pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do INPE, em parceria com a empresa Earth-Networks, cujo principal objetivo é o monitoramento em tempo real das descargas atmosféricas nuvem-solo e intra-nuvem. Essa pode ser considerada a terceira maior rede nacional de detecção de descargas atmosféricas do mundo e a maior da região tropical do planeta, com os seus atuais 56 sensores espalhados pelas regiões Sul, Sudeste, Centro-oeste e Nordeste do Brasil (PINTO JUNIOR, 2017).

Figura 7 – Mapa com a configuração dos sensores da RINDAT em 2017.

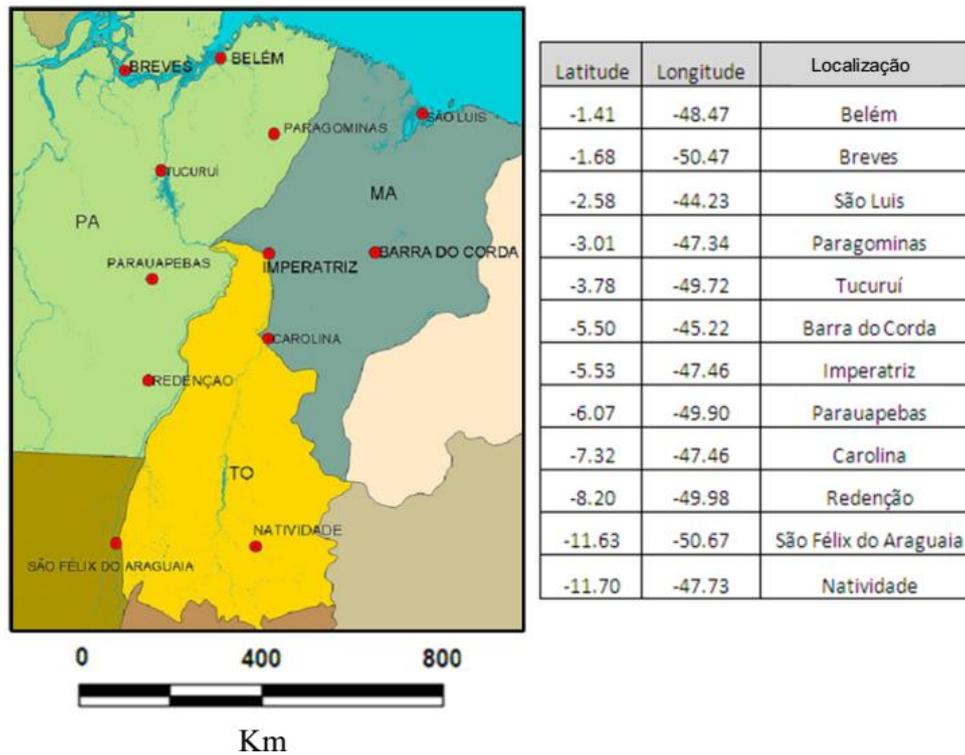


Fonte: NACCARATO et al (2016).

Monitoramento de raios na Amazônia

Na Amazônia, o primeiro sistema de detecção de raios foi um sensor do tipo LLPTSS 430, da empresa “*Lightning Location and Protection Inc.*” (LLP), instalado em 1994 no campus da Universidade Federal do Pará (UFPA), em Belém-PA (DENTEL, 2013). Esse sensor possibilitou o início dos primeiros estudos sobre a atividade de raios na região, através da detecção dos campos elétricos e magnéticos produzidos pelas descargas no período de 1995 a 1998. O sensor fornecia a distribuição espacial e temporal das ocorrências, intensidades e polaridades do sinal detectado (ROCHA; SOUZA; COSTA, 1996), (SOUZA et al., 1997), (SOUZA; ROCHA; CARREIRA, 1999). Nesses primeiros trabalhos já havia um indicativo de tratar-se de uma zona do planeta de alta densidade de raios e com intensidades de correntes

muito elevadas, apesar dos mapas de densidade serem de baixa resolução e limitados para a região de Belém. Posteriormente, houve o início da instalação da primeira rede de detecção em LF na região, através do projeto SIVAM, com todos os sensores instalados nas localidades e na topologia ilustrada na Figura 8. A Rede de Detecção de Raios do Sistema de Proteção da Amazônia (RDRSIPAM), era constituída por uma central de processamento de dados de descargas atmosféricas (modelo LP2020), situada na cidade de Belém-PA, e 12 sensores do tipo LPATS IV, fabricados pela empresa “Global Atmospheric” (atualmente Vaisala), distribuídos nas cidades de Belém-PA, Breves-PA, Tucuruí-PA, Paragominas-PA, Parauapebas-PA, Redenção-PA, São Luís-MA, Imperatriz-MA, Barra do Corda-MA, Carolina-MA, São Félix do Araguaia-MT e Natividade-TO. Essa rede tinha a capacidade de localizar e determinar as características dos eventos de raios entre nuvem e solo, assim como, interno as nuvens. A RDR-SIPAM entrou em operação plena um ano após o início das atividades do Centro Regional de Belém (CR-BE), o qual foi inaugurado em 2004, e permaneceu em funcionamento até os primeiros meses de 2010, quando contava com apenas 4 sensores em atividade. Nesta ocasião, houve mudança de tecnologia e topologia na infraestrutura do segmento espacial do Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM), estatal proprietária da rede, o que inviabilizou as comunicações pela interface analógica desses sensores. Além disso, a descontinuidade da série LPATS IV pelo fabricante, dificultou bastante a manutenção dos sensores inoperantes (SHINKAI, 2016).

Figura 8 – Localização dos sensores da RDR-SIPAM.

Fonte: De Sá (2011).

Após o fim da RDR-SIPAM, a pesquisa sobre raios na Amazônia continuou devido ao ingresso do CENSIPAM na rede STARNET (“*Sferics Timing and Ranging Network*”), através das regionais de Belém e Manaus. Essa rede iniciou em 1997 como um modelo experimental de 5 antenas rádio receptoras, na faixa de frequência VLF, entre 7 e 15 kHz, instaladas ao longo da costa leste dos EUA e em Porto Rico. As antenas foram desenvolvidas pela empresa Resolution Display Inc. Essa rede experimental operou até 1998. Em 2003, 4 antenas rádio receptoras foram instaladas no continente Africano formando uma rede chamada ZEUS, do Observatório Nacional de Atenas (NOA). Essa rede possibilitou o monitoramento das tempestades sobre os continentes Europeu e Africano até 2005 (CHRONIS; ANAGNOSTOU, 2006). Em 2006 foi implantada a rede STARNET na América do Sul, a partir do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da COELCE (Companhia Energética do Ceará) com a UECE (Universidade Estadual do Ceará) e a USP (Universidade de São Paulo) com a instalação de 2 sensores no Brasil (em Fortaleza e Cachoeira Paulista), 1 no Caribe (em Guadalupe, França) e um sensor de teste em São Paulo. Depois 6 novos sensores foram instalados no Brasil: Campo Grande em 2007; Curitiba e São Martinho da Serra em 2008 (em parceria com o SIMEPAR); Brasília e Manaus em 2009 (este último em parceria com o CENSIPAM); São Paulo em 2010 e; Belém em 2012 (também em parceria com o CENSIPAM). O sensor de

Curitiba foi deslocado para Brasília durante o ano 2009. Desde o fim de 2012 a rede STARNET está operando com um total de 9 sensores desenvolvidos pela *Resolution Display Inc.* Em 2013 foram instalados dois outros sensores: um no Cabo Verde e o outro em Ilhéus. A cobertura da rede STARNET é hoje global na América do Sul (DENTEL, 2013).

Conforme exposto acima, atualmente não existem sistemas de monitoramento de descargas atmosféricas em LF operando na Amazônia. Os únicos sistemas que conseguem monitorar a atividade elétrica na Amazônia são de longo alcance, ou seja, tem baixa eficiência de localização e detecção, além de não distinguirem entre descargas nuvem-solo e nuvem-nuvem.

A atual conjuntura econômica do Brasil faz com que produtos importados recebam altas taxas de importação, tornando a aquisição de equipamentos para a investigação de descargas atmosféricas algo muito dispendioso. Logo, o domínio da tecnologia possibilita o desenvolvimento de sistemas em território nacional, reduzindo consideravelmente os custos para a investigação deste fenômeno natural.

Dessa forma, esta tese propõe a otimização – no sentido de produzir condições apropriadas, melhoradas – de diversos parâmetros associados a detecção de formas de onda de campos eletromagnéticos emitidos por descargas atmosféricas. Como resultado das otimizações desenvolvidas, este trabalho apresenta o “Sistema de detecção e armazenamento de formas de onda de raios” ou “*Lightning Detection and Waveform Storage System - (LDWSS)*” para suprir as necessidades de detecção e registro de raios na Região Amazônica.

1.2 Objetivos

Para responder à problemática da pesquisa, foram selecionados os objetivos (geral e específicos) relacionados a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver e testar ferramentas de hardware e software que auxiliem na otimização e aprimoramento da detecção de descargas atmosféricas, com o intuito de prover informações para melhorar os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, bem como entender melhor a física dos raios na Região Amazônica.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um sistema de baixo custo para detecção de descargas atmosféricas, que possa ser produzido em grande quantidade para cobrir grande parte da Amazônia;
- Projetar e desenvolver um sistema de digitalização com resolução temporal sincronizada por GPS;
- Desenvolver um sistema com um amplo alcance dinâmico, a fim de registrar eventos a curtas e longas distâncias;
- Projetar e desenvolver mecanismos de armazenamento otimizado das formas de onda digitalizadas de um raio;
- Calibrar os valores de campo elétrico medidos pelo sistema;
- Aplicar equações de conversão campo-em-corrente para estimar a corrente de pico dos raios detectados;
- Elaborar um banco de dados com formas de onda de diferentes tipos de descargas atmosféricas tais como, raios nuvem-solo negativos, raios nuvem-solo positivos e raios intra-nuvem;
- Aplicar o sistema desenvolvido em diversos campos da investigação de descargas atmosféricas, principalmente na Região Amazônica.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em nove capítulos. O primeiro capítulo traz uma introdução ao tema, identificando a problemática e justificando a sua escolha. Além disso, são apresentados o objetivo geral, objetivos específicos e a distribuição do conteúdo abordado na tese.

O segundo capítulo aborda os conceitos sobre a formação das nuvens de tempestade, como as cargas elétricas se distribuem no interior de uma nuvem de tempestade, quais os diferentes tipos de raios conhecidos pela ciência, quais processos físicos que ocorrem durante um raio descendente nuvem-solo e as etapas que ocorrem em raios induzidos utilizando a técnica de foguete-fio.

O terceiro capítulo expõe a utilização de equações aproximadas e exatas para calcular os campos elétricos e magnéticos radiados por uma descarga atmosférica. Neste mesmo capítulo é abordada ainda a aplicação de equações de conversão de campo-em-corrente, para

estimação da corrente de pico de raios, a partir de medições remotas de campos elétricos ou magnéticos.

O quarto capítulo apresenta o comportamento dos campos eletromagnéticos associados a descargas atmosféricas, exemplificando por meio de diversas formas de onda encontradas na literatura de referência.

O quinto capítulo descreve a utilização de diferentes métodos, aplicados na detecção e localização de descargas atmosféricas, utilizando como princípio fundamental a radiação eletromagnética gerada por elas.

O sexto capítulo aborda a metodologia empregada na otimização do registro e detecção dos campos eletromagnéticos radiados por descargas atmosféricas.

O sétimo capítulo apresenta o projeto e desenvolvimento de um sistema de baixo custo denominado “Sistema de detecção e armazenamento de formas de onda de raios” ou “*Lightning Detection and Waveform Storage System - (LDWSS)*” para a detecção e armazenagem de formas de onda da componente vertical do campo elétrico emitido por um raio. Ainda neste capítulo é demonstrado a calibração deste sistema, realizada na Universidade da Florida.

O oitavo capítulo descreve a utilização do LDWSS na investigação de descargas atmosféricas, tais como: observação de novos tipos de CIDs, nunca relatados anteriormente na literatura; interação de diferentes tipos de raios com a ionosfera; observação de descargas atmosféricas em bandas distintas de frequência; apresentação de um expressivo banco de dados, contendo mais de oito mil formas de onda da componente vertical do campo elétrico de diferentes tipos de descargas atmosféricas, observadas em um intervalo de 6 a 500 km e; observação de super raios intra-nuvem. Este capítulo finaliza apresentando a instalação e operação do LDWSS na Amazônia.

O nono e último capítulo apresenta as conclusões da pesquisa juntamente com sugestões, consideradas essenciais para a continuidade do tema pesquisado em trabalhos futuros. Completando a tese, seguem as referências utilizadas no trabalho.

2 NUVENS DE TEMPESTADE, TIPOS DE RAIOS E SEUS PROCESSOS

Este capítulo aborda algumas características elétricas das nuvens de tempestade, e o modo como ocorre o carregamento elétrico dessas nuvens. Em seguida, serão abordados os tipos de raios que podem ocorrer na atmosfera, assim como os diferentes processos que os envolvem.

2.1 Distribuição das cargas elétricas em nuvens de tempestade

As nuvens de tempestade, denominadas de “cumulonimbus” são a principal fonte de descargas atmosféricas no planeta Terra. As outras possíveis fontes são as tempestades de areia, matéria suspensa acima de vulcões e explosões nucleares.

Através de medições de campo elétrico, associado a cargas elétricas em nuvens de tempestade, e medições das variações de campo elétrico, associado a neutralização de parte destas cargas por descargas atmosféricas, foi desenvolvido um modelo de organização das cargas elétricas no interior de uma nuvem cumulonimbus. O modelo mais utilizado atualmente é o tripolo vertical (Figura 9). Esta configuração de cargas é composta por um centro de carga positivo no topo, um centro negativo no meio e outro centro positivo menor, na parte inferior da nuvem. Os centros de cargas do topo e do meio, são geralmente chamados de centros principais e possuem a mesma magnitude. Na periferia superior da nuvem observa-se uma fina camada de cargas negativas.

Figura 9 - Uma nuvem de tempestade isolada, localizada na região central do estado do Novo México nos EUA e a ilustração de como se imagina ser a distribuição de cargas elétricas no interior e ao redor da nuvem, inferidas através de medições realizadas remotamente e no interior da nuvem.



Fonte: Adaptado de Krehbiel (1986).

2.2 Mecanismos de eletrificação de nuvens

A eletrificação das nuvens pode ser abordada em dois tipos de escala, macro e micro. Em parte, isso se deve ao fato de que a estrutura elétrica de uma nuvem de tempestade é bastante complexa, sendo resultado de processos microfísicos, que atuam em escalas de quilômetros, e processos microfísicos, que atuam em escalas de milímetros, ambos ocorrendo simultaneamente dentro e fora da nuvem. Atualmente, existem duas teorias, que são mais aceitas no meio científico, a teoria da convecção e a teoria da precipitação, essas duas teorias serão abordadas nos itens a seguir.

2.2.1 Teoria da convecção

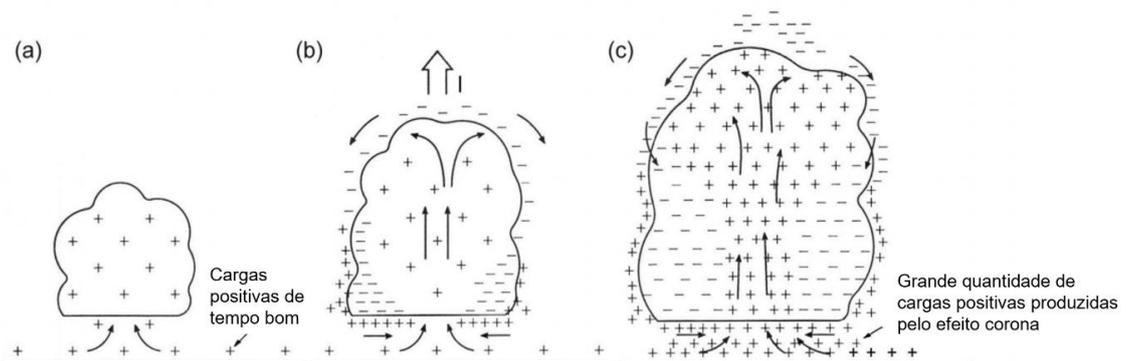
A Terra possui um campo elétrico de tempo bom, variável durante o dia, que pode alcançar valores da ordem de 120 V/m . Este campo elétrico acumula íons positivos na baixa troposfera. Com as térmicas, estes íons positivos são transportados para o interior das nuvens de tempestade, resultando na eletrificação positiva da nuvem, conforme a Figura 10(a).

Com o crescimento vertical da nuvem, ela atinge os níveis mais altos da troposfera e começa a atrair íons negativos, tornando seus limites superiores carregados de forma negativa, de acordo com a Figura 10(b).

Em seguida, com a evolução da nuvem, os íons negativos são deslocados para as laterais e posteriormente, mediante correntes descendentes de ar, acumulam-se nas regiões baixas da nuvem, tornando mais elevado o fluxo de íons positivos para o interior da nuvem e aumentando o diferencial elétrico entre centros de cargas positivas (predominantemente em níveis superiores da nuvem) e centros de cargas negativas (predominantemente em níveis inferiores da nuvem de tempestade), conforme ilustra a Figura 10(c).

A região próxima ao todo da nuvem se forma por partículas, majoritariamente constituídas por íons positivos, irá atrair, da ionosfera para o topo da nuvem, íons negativos, tornando a nuvem eletricamente equilibrada (MACGORMAN; RUST, 1998).

Figura 10 - Teoria da Convecção



Fonte: Adaptado de Krehbiel (1986).

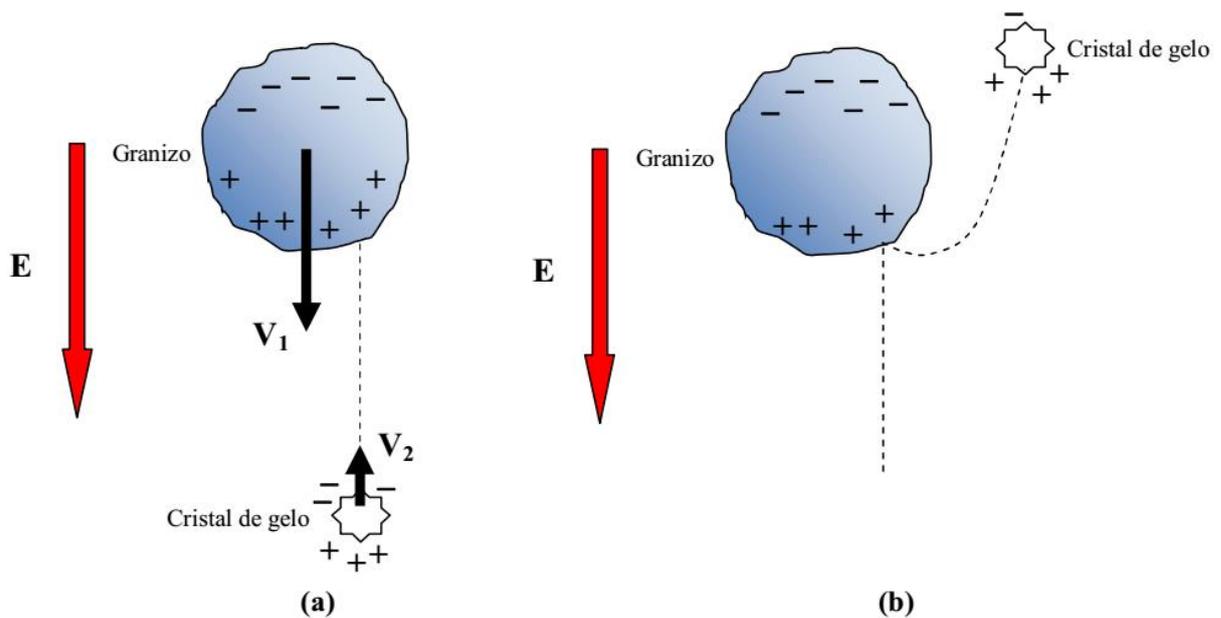
2.2.2 Teoria da precipitação

A teoria da precipitação é sustentada por dois processos, o processo de indução e o de formação de colisões entre cristais de gelo. A hipótese do processo indutivo de eletrificação ocorre em função de colisões entre partículas no interior da nuvem. Pequenos granizos e cristais de gelo no interior do campo elétrico inicial da nuvem são induzidos (polarização), conforme a Figura 11(a), e ao se colidirem transferem cargas elétricas, produzindo um excesso de cargas negativas no granizo e falta de cargas negativas no cristal de gelo, de acordo com a Figura 11(b). Como as partículas menores estarão sob o efeito do movimento de ascensão, o topo da

nuvem se carregará positivamente, enquanto a parte inferior da nuvem ficará negativa, formando um dipolo.

Porém, esse processo de eletrificação sozinho não seria capaz de criar os centros de cargas diferenciais das nuvens de tempestade (MACGORMAN; RUST, 1998), uma vez que o campo elétrico de tempo bom é insuficiente para criar o campo elétrico inicial. Então, outro processo para o início do campo elétrico torna-se necessário.

Figura 11 - Teoria da Precipitação



Fonte: Adaptado de Jayaratne (2008).

A hipótese do processo de formação por colisões entre cristais de gelo consiste em gotículas de água que são elevadas, resfriando-se e alcançando um estado de super-resfriamento, atingindo a formação de cristais de gelo. Da colisão desses cristais com as gotículas de água super-resfriadas, cargas elétricas são geradas, trata-se de eletrificação por contato, onde os cristais de gelo perdem elétrons, tornando-se positivos, e as gotículas de água super-resfriadas ganham elétrons, tornando-se negativas (COTTON; ANTHES, 1989).

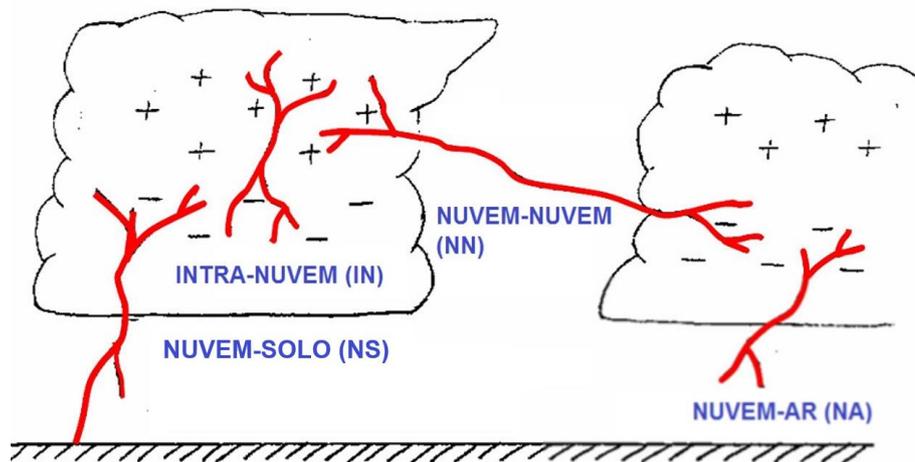
Em temperaturas abaixo de um limiar, as polaridades são revertidas, explicando a existência de região de cargas positivas na base das nuvens, e na área de precipitação tem a predominância de cargas negativas (COTTON; ANTHES, 1989).

As gotas de água super-resfriadas, por serem mais pesadas, acabam se acumulando na base da nuvem, enquanto os cristais de gelo, sendo mais leves, acumulam-se no topo da nuvem, formando um dipolo.

2.3 Tipos de Raios

Os tipos de raios mais relatados são: nuvem-solo (NS); intra-nuvem (IN); nuvem-nuvem (NN) e; nuvem-ar (NA). Tais raios encontram-se ilustrados na Figura 12. Outras variações de raios são também observadas, porém com menos frequência, como os jatos azuis, os *sprites* vermelhos, e os raios bola.

Figura 12 - Alguns tipos de Raios



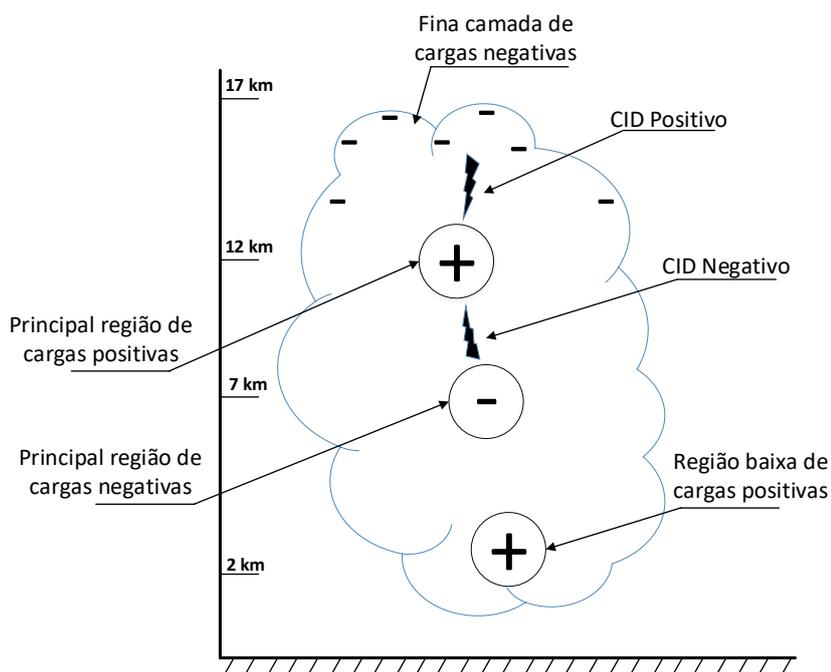
Fonte: Adaptado de Rakov e Uman (2003).

Os raios intra-nuvem (IN) ocorrem no interior de uma mesma nuvem de tempestade, os nuvem-nuvem (NN) ocorrem entre nuvens diferentes e os nuvem-ar (NA) partem de uma nuvem e terminam na própria atmosfera, sem alcançar uma outra nuvem ou o solo. Esses três tipos de raios juntos contribuem com cerca de 75% dos raios que ocorrem no planeta, eles podem ser denominados descargas nuvem, as quais são definidas como aquelas em que o canal da descarga não atinge o solo (RAKOV; UMAN, 2003). Essas descargas são propensas a ocorrer nas fronteiras do centro de carga negativo da nuvem, formando uma espécie de ponte entre os centros de carga negativo e positivo. Porém, não se limitam a essa topologia de ocorrência.

Existe um tipo especial de raio intra-nuvem, que se imagina ser o maior gerador natural de radiação HF-VHF (3-300 MHz) na Terra. Tal raio é referido como descarga compacta intra-nuvem (conhecido na literatura como *Compact Intracloud Discharge* - CID). Os CIDs receberam esse nome devido sua extensão espacial relativamente pequena (algumas centenas de metros) (SMITH et al., 1999). Esses tipos de descargas tendem a ocorrer em altitudes elevadas (a maioria acima de 10 km). A Figura 13 ilustra os locais de possível ocorrência de

CIDs no interior das nuvens. Eles tendem a produzir menos luminosidade que outros tipos de descargas atmosféricas e são conhecidos por produzir um único pulso no registro de seu campo elétrico, na faixa VLF-LF, tendo uma típica largura de pulso entre 10 e 30 us, e amplitudes de 10 V/m a 100km. Sua amplitude, na maioria das vezes, é superior a de um raio nuvem-solo detectado à mesma distância. Um de seus mistérios é o fato de ocorrer em 72% das vezes de forma isolada, tanto espacial quanto temporal (NAG et al., 2010).

Figura 13 – Ilustração do possível local de ocorrência de CIDs positivos e negativos, levando em conta a convenção de sinal da eletricidade atmosférica.



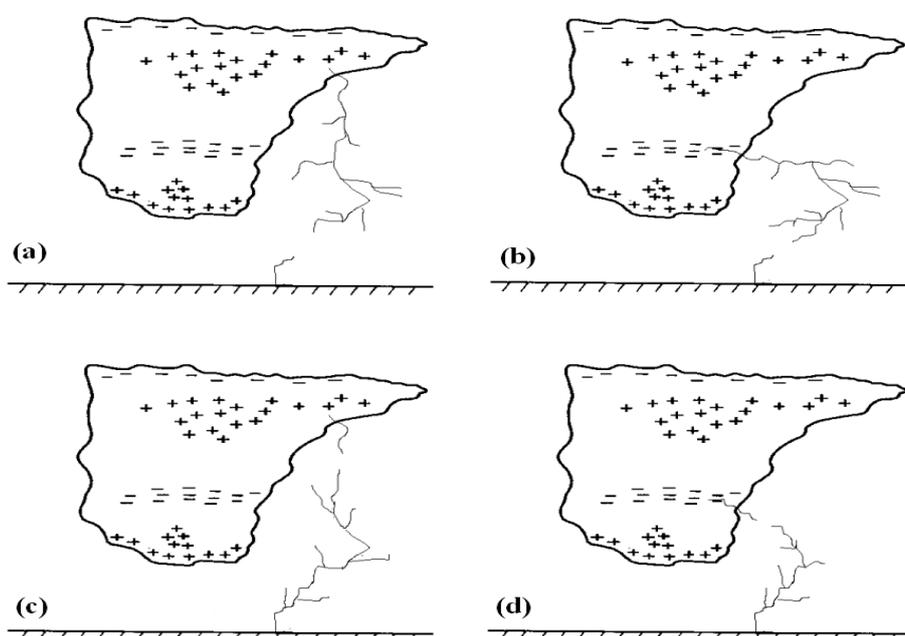
Fonte: Do autor.

Os raios nuvem-solo, são caracterizados por descargas que, partindo de uma nuvem, atingem a superfície da Terra ou vice-versa. Eles representam cerca de 25% do total da atividade de raios no planeta. As descargas nuvem-solo estão entre aquelas de maior interesse para o homem, devido aos efeitos diretamente relacionados aos danos humanos e materiais (COORAY, 2008).

Os raios NS são classificados em 4 subgrupos: raios negativos descendentes (RND); raios negativos ascendentes (RNA); raios positivos descendentes (RPD) e; raios positivos ascendentes (RPA). Cerca de 90% dos raios NS são raios negativos descendentes, neles cargas negativas são efetivamente transportadas para o solo, e seu processo se inicia na nuvem, se desenvolvendo até o solo. O esquemático dos RND, e dos demais tipos de raios NS, podem ser

vistos na Figura 9. Os raios descendentes apresentam ramificações da nuvem em direção ao solo, já os raios ascendentes, do solo em direção as nuvens, imagina-se que os raios ascendentes ocorram somente a partir de objetos altos, maiores que 100 m, como torres de comunicação e prédios. Existem também os raios bipolares que, sequencialmente, transferem cargas positivas e negativas durante o mesmo evento.

Figura 14 – Esquema de diferentes tipos de raios que conectam-se com o solo baseado na direção de propagação do líder e na polaridade das cargas transportadas: (a) Raios positivos descendentes (RPD); (b) Raios negativos descendentes (RND); (c) Raios positivos ascendentes (RPA); (d) Raios negativos ascendentes (RNA).



Fonte: Adaptado de Rakov e Uman (2003).

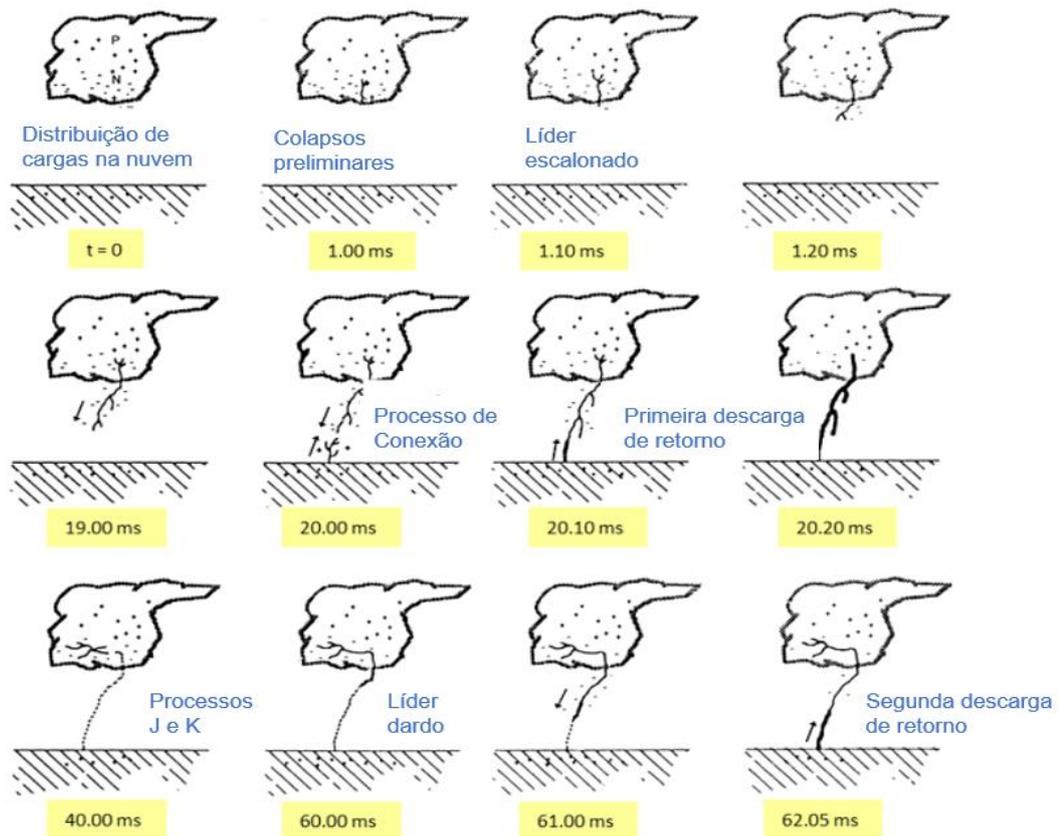
2.4 Componentes de um raio negativo descendente

Muitos processos ocorrem durante uma descarga atmosférica. Dentre os raios que envolvem o solo, os que ocorrem em maior proporção são os raios negativos descendentes, logo, são os mais descritos na literatura. Por isso, discute-se neste tópico os processos que envolvem um raio negativo descendente.

Um RND é composto basicamente por um líder, se movendo no sentido descendente, e uma descarga de retorno, se movendo no sentido ascendente. O líder ocorre na forma de passos discretos, por esse motivo é conhecido como líder escalonado (“*stepped-leader*”). O líder geralmente é precedido por colapsos preliminares (“*Preliminary breakdown - PB*”) que

ocorrem em forma de pulsos e podem ser definidos como um processo intra-nuvem, que inicia ou permite que o movimento do líder escalonado se inicie em direção ao solo. O líder escalonado forma um canal de plasma carregado negativamente, que se move da nuvem até o solo com uma velocidade média de 2×10^5 m/s. À medida que o líder escalonado vai se aproximando do solo, surge uma ou diversas ramificações de líderes carregados positivamente (líder conectante) que se movem no sentido contrário. Os líderes que se movem no sentido solo-nuvem podem ter sua origem no próprio solo ou em objetos aterrados, como árvores, prédios, torres ou outras estruturas. Quando uma das ramificações do líder ascendente e do líder descendente se conectam, geralmente a dezenas de metros do solo, uma enorme onda de corrente, conhecida como corrente de retorno ou descarga de retorno (“*return stroke - RS*”) flui entre o solo e o centro de cargas na nuvem através do canal de plasma. Quando a primeira descarga de retorno chega até a nuvem, processos intra-nuvem, conhecidos como J e K, ocorrem. Os processos J resultam na redistribuição das cargas na nuvem e os processos K são transientes, que ocorrem em processos J lentos.

Figura 15 – Ilustração dos vários processos que compõem uma descarga atmosférica nuvem-solo descendente (Flash).



Fonte: Adaptado de Uman (1987).

Após essa atividade intra-nuvem, frequentemente um novo líder, conhecido como dardo (“*dart-leader*”) ou líder dardo-escalonado, flui no canal previamente feito pelo líder-escalonado. Esse novo líder não apresenta passos de descontinuidade. Conforme o líder dardo-escalonado se aproxima do solo, um processo de conexão semelhante ao do líder escalonado ocorre, porém de forma mais rápida e bem mais próximo do solo (aproximadamente 10 m). Esse processo de conexão é seguido pela descarga de retorno subsequente (“*subsequent return stroke*”) e novamente neutraliza o centro de carga na nuvem. Tais processos podem se repetir diversas vezes em um mesmo raio. Uma descarga atmosférica nuvem-solo pode conter dezenas de descargas de retorno, o conjunto de todas essas etapas é denominado na literatura de “*flash*” (relâmpagos), e está ilustrado na Figura 15.

2.5 Raios induzidos (Raios Trigados)

Um raio pode ser iniciado de forma induzida “trigada”, ou seja, iniciado artificialmente a partir do lançamento de um pequeno foguete, puxando um fio aterrado até uma nuvem carregada eletricamente. Quando o foguete alcança uma velocidade entre 150 a 200 m/s, e está a uma altura entre 200 e 300 m, o campo aumentado próximo ao bico do foguete lança um líder, carregado positivamente, que se propaga para cima, em direção à nuvem. Esse líder positivo, que se propaga para cima, vaporiza o fio de cobre que está sendo puxado pelo foguete e cria uma forma de ponte entre a nuvem e o solo, assim estabelecendo uma corrente contínua inicial, com a duração de algumas centenas de milissegundos, e transportando cargas negativas da nuvem para as instalações do lançamento do foguete. Após o término da corrente contínua inicial, um ou mais líderes-dardo descendentes, seguidos de descargas de retorno ascendentes, percorrem o canal criado pelo fio amarrado ao foguete. Os líderes-dardo, seguidos pelas descargas de retorno que ocorrem em raios induzidos, são similares aos observados em raios naturais, embora o processo inicial destes seja diferente.

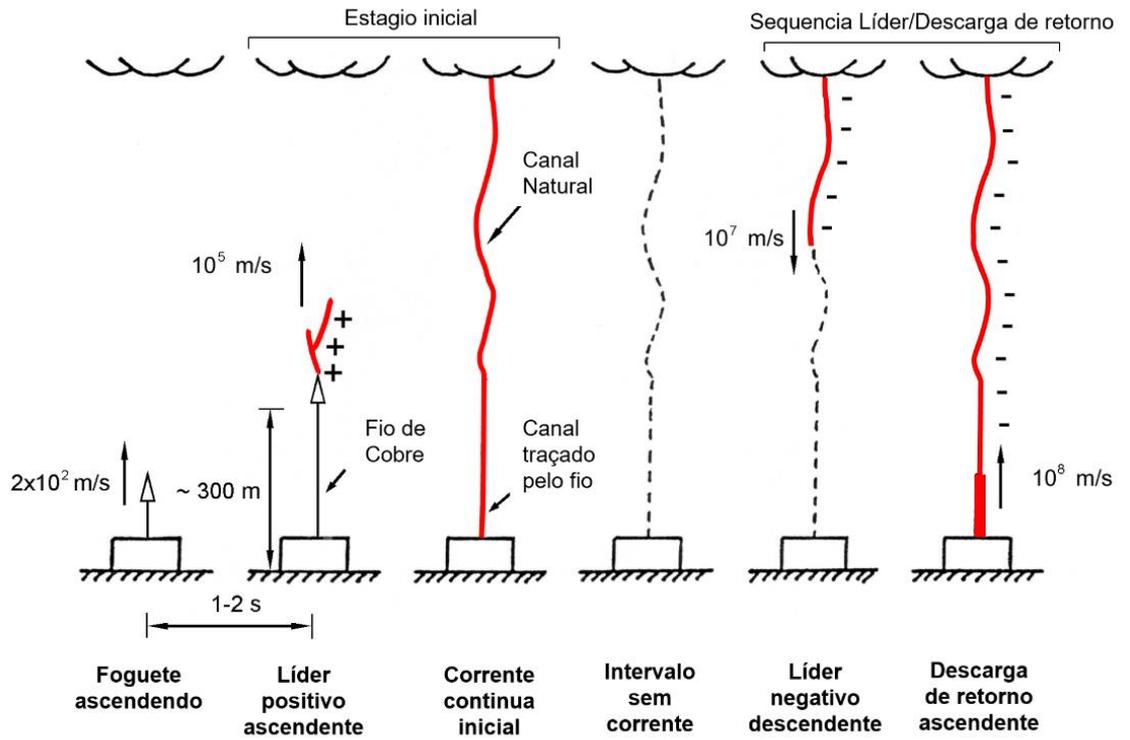
Os experimentos com raios induzidos têm fornecido resultados significativos para o melhor entendimento do processo que envolve os raios naturais, esse entendimento não seria possível sem a utilização de raios induzidos, devido a ocorrência aleatória dos raios naturais no espaço e no tempo, o que torna muito difícil sua medição direta.

Os resultados dos estudos de raios induzidos já foram utilizados para:

- Entender melhor a física das descargas atmosféricas;
- Melhorar os esquemas de proteção contra descargas atmosféricas;

- Avaliar a performance de sistemas de localização de raios;
- Testar e validar modelos teóricos para o comportamento das descargas atmosféricas.

Figura 16 – Ilustração da sequência de eventos que ocorrem em um clássico raio induzido



Fonte: Adaptado de Rakov et al. (1998).

3 CÁLCULO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS RADIADOS POR RAIOS E EQUAÇÕES PARA ESTIMAR SUA CORRENTE DE PICO

O cálculo dos valores de intensidade de campo elétrico \mathbf{E} e densidade de fluxo magnético \mathbf{B} , são importantes para a modelagem dos processos naturais que envolvem uma descarga atmosférica, para o planejamento de sistemas de compatibilidade eletromagnética e para a calibração de sistemas de detecção e localização de raios, dentre outras aplicações.

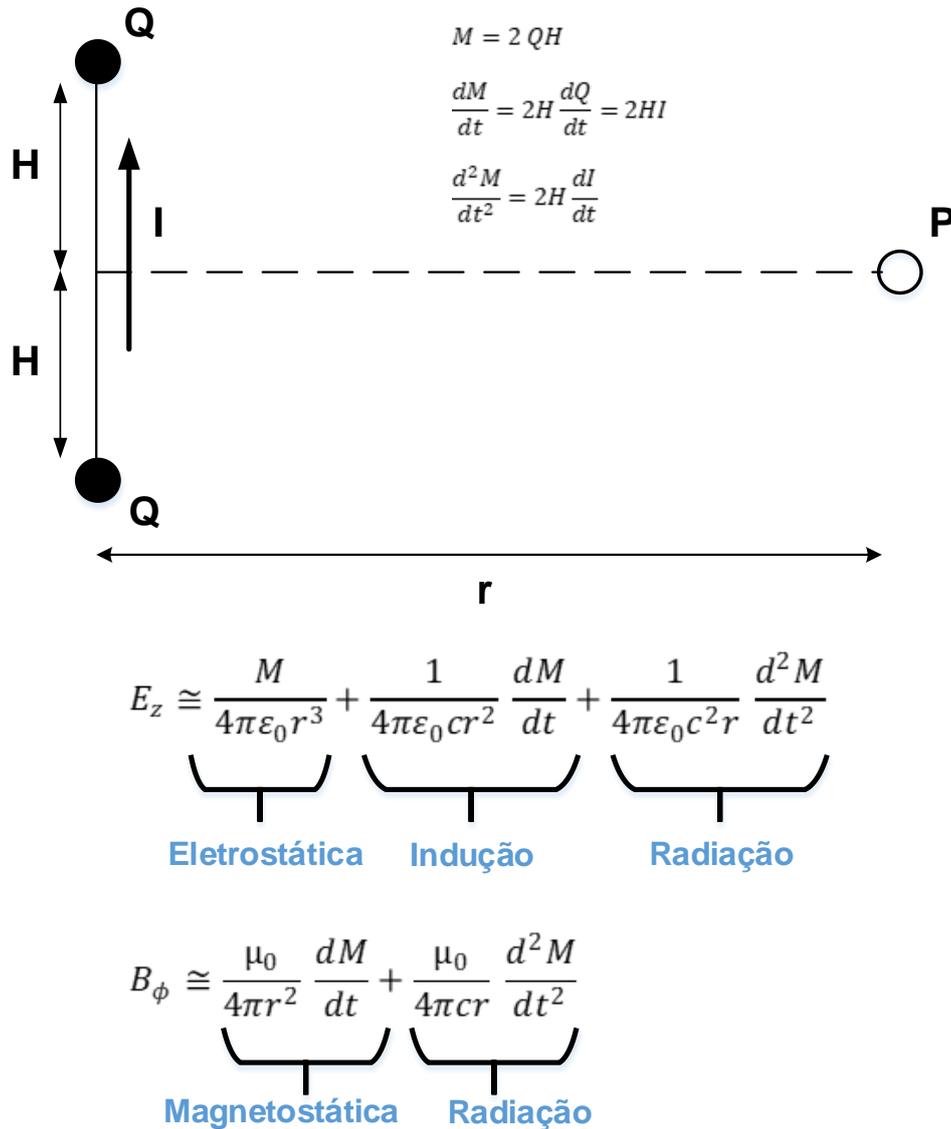
Este capítulo aborda algumas aproximações para o cálculo dos campos elétrico e magnético radiados por uma descarga atmosférica, assim como as equações exatas para esse fim. Em seguida é apresentado o uso de equações teóricas e empíricas para estimação da corrente de pico, através dos valores de campo elétrico.

3.1 Equações para cálculo de campo elétrico e magnético associado a raios

A literatura apresenta alguns modelos para o cálculo do campo eletromagnético, originado pela corrente, que flui pelo canal de uma descarga atmosférica. Um dos primeiros modelos utilizados para esse fim foi o baseado na aproximação por dipolo (teoria de antenas) e momento do dipolo elétrico. Com essa aproximação, é possível derivar as componentes eletrostática, indução e radiação do campo elétrico total, e as componentes magnetostática e radiação da densidade de fluxo magnético. Baseados em medições experimentais de campos eletromagnéticos Mclain e Uman, (1971) demonstraram que essa aproximação era mais precisa somente para campos medidos a distâncias maiores que 50 km, logo, necessitando de uma equação mais exata, que fosse válida para qualquer distância de medição.

As equações do campo elétrico total e da densidade de fluxo magnético para a aproximação, utilizando o momento do dipolo elétrico e a geometria adotada, encontram-se na Figura 17.

Figura 17 – Geometria e equações adotadas, pela aproximação, utilizando o momento do dipolo elétrico, para cálculo dos campos elétricos e densidade de fluxo magnético radiados por uma descarga atmosférica.



Fonte: Do autor.

Onde:

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m e $\epsilon_0 = (1/36\pi) 10^{-9}$ F/m correspondem, respectivamente, à permeabilidade e à permissividade do vácuo;

$c = 3 \times 10^8$ m/s;

H é o comprimento do canal;

r é a distância horizontal entre o canal e o ponto de observação P (medição);

I é a corrente que flui pelo canal;

Uma expressão exata para cálculo do campo eletromagnético, associado a descargas atmosféricas com canal vertical sobre uma superfície perfeitamente condutora, foi

primeiramente apresentada por Mclain e Uman (1971). Thottappillil e Rakov (2001) abordaram três diferentes metodologias para se chegar às equações exatas de campo eletromagnético, incluindo a primeira, derivada por Mclain e Uman (1971). A primeira e mais difundida é a aproximação por dipolo utilizando as condições de Lorentz. As outras duas se baseiam nas equações de continuidade, uma foi desenvolvida por Thottappillil, Rakov e Uman (1997) e outra por Thomson (1999).

A partir desse ponto, aborda-se a aproximação mais utilizada na literatura de raios, (aproximação por dipolo utilizando as condições de Lorentz).

Tratando-se de campos eletromagnéticos, temos que recorrer as equações de Maxwell, que reúnem as principais equações para tratamento dos fenômenos eletromagnéticos. A intensidade de campo elétrico \mathbf{E} e densidade de fluxo magnético \mathbf{B} , são usualmente encontradas em função dos potenciais eletromagnéticos. Tais potenciais podem ser derivados a partir das equações de Maxwell sem fontes (cargas e correntes).

Para o caso da densidade de fluxo magnético \mathbf{B} , utiliza-se a segunda equação de Maxwell, conhecida também por Lei de Gauss para o magnetismo.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

A partir da equação (4), temos que \mathbf{B} deve ser o rotacional de algum campo vetorial \mathbf{A} , conhecido como o potencial vetor magnético.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (5)$$

Para o caso do campo elétrico \mathbf{E} , substitui-se a equação (5) na terceira equação de Maxwell, conhecida como Lei de Faraday da indução.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (6)$$

Então temos que:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \nabla \times \mathbf{A}}{\partial t} = \nabla \times \left(-\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}\right) \quad (7)$$

$$\nabla \times \left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}\right) = 0 \quad (8)$$

Onde o termo entre parênteses deve ser o gradiente de algum campo escalar ϕ , conhecido como o potencial escalar elétrico. Assim temos que o campo elétrico em função do potencial ϕ é dado por:

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} \quad (9)$$

O potencial elétrico ϕ e o potencial vetor magnético \mathbf{A} são definidos por:

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{V'} \frac{\rho(r', t - \frac{R}{c})}{R} dV' \quad (10)$$

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V'} \frac{\bar{\mathbf{J}}(r', t - \frac{R}{c})}{R} dV' \quad (11)$$

O potencial elétrico ϕ e o potencial vetor magnético \mathbf{A} são relacionados pela condição de Lorentz:

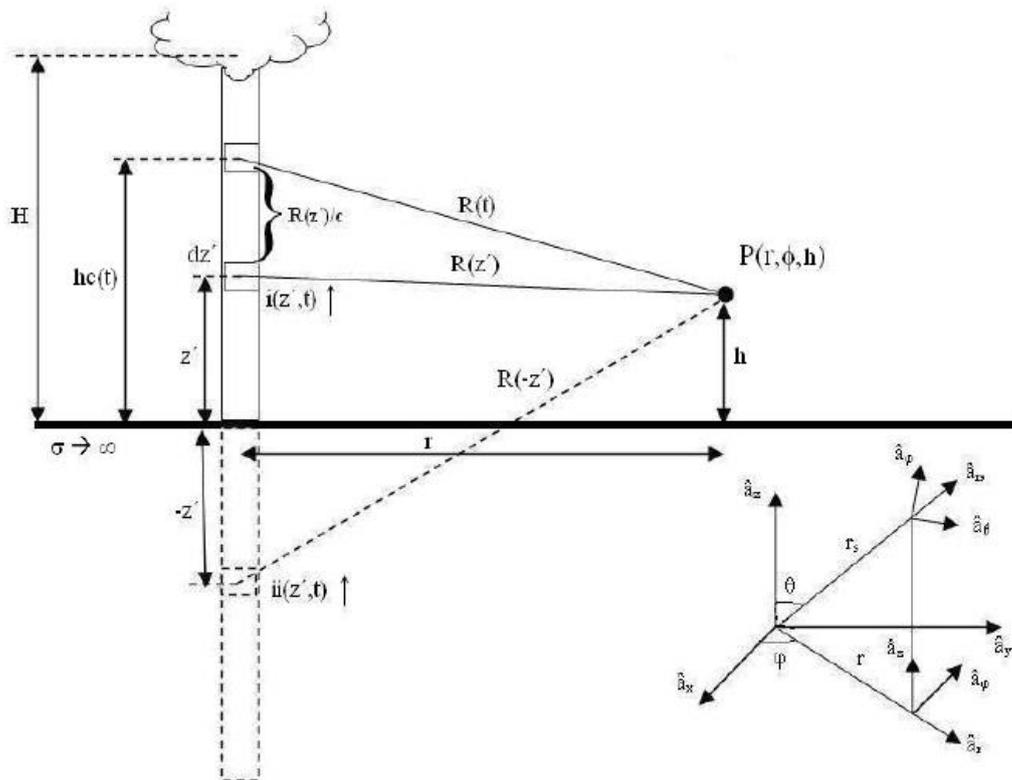
$$\nabla \cdot \mathbf{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial\phi}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

A condição de Lorentz é equivalente à equação da continuidade, que relaciona ρ e \mathbf{J} :

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{J}} + \frac{\partial\rho}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

As quantidades das fontes ρ e \mathbf{J} , não podem ser especificadas de forma independente, elas devem satisfazer a equação de continuidade. De maneira alternativa pode-se especificar \mathbf{J} , encontrar \mathbf{A} da equação (11), e usar a equação (12) para encontrar ϕ . Desta maneira, não é necessário especificar ρ para computar o campo elétrico.

Figura 18 – Parâmetros geométricos para cálculo dos campos eletromagnéticos.



Fonte: Adaptado de Uman (1987).

A partir das equações de potenciais eletromagnéticos e da condição de Lorentz, é possível derivar as equações para computar a componente vertical do campo elétrico \mathbf{E}_z e a componente azimutal do campo magnético \mathbf{B}_ϕ . Somente essas duas componentes são computadas, pois considera-se que a descarga de retorno se move de maneira ascendente, por um canal vertical, sobre uma superfície perfeitamente condutora. (Figura 18). Tornando então, as demais componentes nulas ou irrelevantes.

As equações para computar a componente vertical do campo elétrico \mathbf{E}_z e a componente azimutal do campo magnético \mathbf{B}_ϕ são apresentadas abaixo:

$$E_z(r, \phi, h, t) = \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left[\frac{2 \cdot (h - z')^2 - r^2}{R(z')^5} \cdot \int_0^t i(z', t - R(z')/c) d\tau + \frac{2 \cdot (h - z')^2 - r^2}{c \cdot R(z')^4} \cdot i(z', t - R(z')/c) - \frac{r^2}{c^2 \cdot R(z')^3} \cdot \frac{\partial i(z', t - R(z')/c)}{\partial t} \right] \quad (14)$$

$$B_\phi(r, \phi, h, t) = \frac{\mu_0 dz'}{4\pi} \cdot \left[\frac{r}{R(z')^3} \cdot i(z', t - R(z')/c) + \frac{r}{c \cdot R(z')^2} \cdot \frac{\partial i(z', t - R(z')/c)}{\partial t} \right] a_\phi \quad (15)$$

Onde:

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m e $\epsilon_0 = (1/36\pi) 10^{-9}$ F/m correspondem, respectivamente, à permeabilidade e à permissividade do vácuo;

$c = 3 \times 10^8$ m/s;

$dE_z(r, \phi, h, t)$ corresponde ao componente vertical do campo elétrico devido à corrente $i(z', t)$ contida no elemento infinitesimal dz' (V/m);

$dE_r(r, \phi, h, t)$ corresponde ao componente horizontal do campo elétrico devido à corrente $i(z', t)$ contida no elemento infinitesimal dz' (V/m);

$dB_\phi(r, \phi, h, t)$ corresponde ao componente azimutal da indução magnética devido à corrente $i(z', t)$ contida no elemento infinitesimal dz' (Tesla);

$i(z', t - R(z')/c)$ é a distribuição da corrente ao longo do canal, levando em conta o tempo de atraso em que a primeira onda eletromagnética leva para chegar ao ponto P .

Assim como na primeira aproximação, identificamos três termos na equação do campo elétrico. O primeiro se refere ao campo próximo, que está relacionado à cargas eletrostáticas, e recebe o nome de componente eletrostática. Percebe-se que sua intensidade decai rapidamente com a distância do ponto de observação. O segundo termo refere-se ao campo induzido devido à variação da carga no tempo, é conhecido como componente de “indução”. O terceiro, e último termo, está relacionado com o campo distante, é chamado componente “radiação”. Como a atenuação desta componente é menor, em comparação aos outros termos, para longas distâncias

do ponto de observação (maiores que 50 km), a componente radiação é predominante sobre as outras.

Para o caso da densidade de fluxo magnético existem apenas dois termos, pois ele não apresenta cargas estáticas, logo, restando a componente “magnetostática” e a componente de “radiação”. Da mesma maneira que ocorre com o campo elétrico, em longas distâncias a componente radiação é predominante.

Como podemos observar nas equações acima, se faz necessária a utilização de um modelo para a descarga de retorno, que especifique a corrente $I(z',t)$ que flui pelo canal. Na literatura há diversos modelos que podem ser utilizados para especificar esta corrente.

Existem basicamente quatro classes de modelos para representar uma descarga de retorno: modelos de dinâmica do gás (ou modelos físicos); modelos eletromagnéticos; modelos a circuitos distribuídos e; modelos de engenharia.

Os modelos físicos se baseiam em um canal constituído por uma coluna de gás (plasma) confinada em uma geometria cilíndrica, submetido a leis de conservação (massa, momento e energia). Tipicamente, a solução é encontrada por meio das equações de dinâmica dos gases (também denominadas equações hidrodinâmicas), acopladas a duas equações de estado. Os principais resultados desse modelo, incluem a temperatura e pressão dentro do canal, e a densidade de massa como função do tempo e do estado.

Os modelos eletromagnéticos se baseiam na solução numérica para as equações de Maxwell, a fim de encontrar a distribuição da corrente ao longo do canal do raio.

Nos modelos a circuito distribuído, o canal é aproximado a uma linha de transmissão com circuitos RLC distribuídos, representando a descarga atmosférica como um processo transiente em uma linha de transmissão vertical, caracterizada pela sua resistência (R), indutância (L) e capacitância (C), todas pelo comprimento. Podem ser usados para determinar a corrente no canal como função do tempo e da altura, calculando assim, os campos elétrico e magnético remotos.

A última classe corresponde aos modelos de engenharia, nesses modelos a distribuição espacial e temporal da corrente $i(z',t)$ ou da densidade de carga do canal é especificada a partir da corrente de descarga de retorno, observada na base do canal $i(0,t)$ e na velocidade de propagação ascendente da frente de onda da corrente v_f . Eles são os mais utilizados na prática, considerando a possibilidade de medição da corrente na base, através de raios induzidos ou torres instrumentadas, possibilitando então, a validação dos modelos.

Rakov (1997) expressou diversos modelos de engenharia baseados em uma equação geral:

$$I(z',t) = u(t - z'/v_f) P(z') I(0,t - z'/v) \quad (16)$$

Onde, u é a função degrau unitário para $t \geq z'/v_f$. $P(z')$ é o fator de atenuação da corrente que depende da altura, v_f é a velocidade de propagação ascendente da frente de onda da descarga de retorno e v é a velocidade de propagação da corrente ao longo do canal. Os principais modelos de engenharia estão apresentados na Tabela 1.

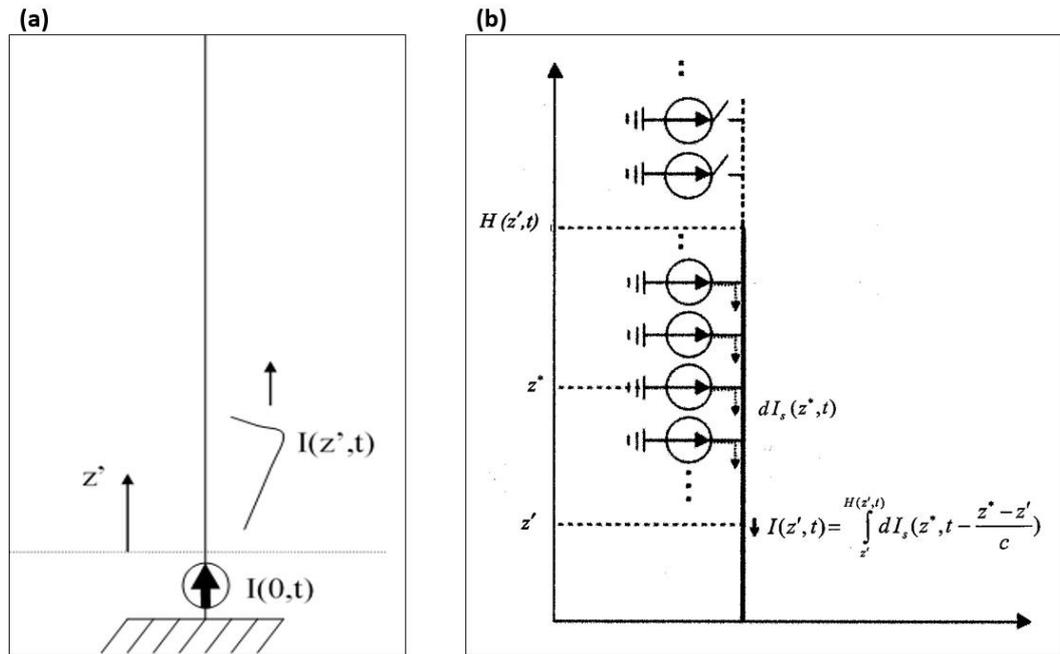
Tabela 1. Principais modelos de engenharia para a corrente de retorno de um raio nuvem-solo.

Modelo	Referencia	$P(z')$	v
Transmission Line (TL) Model	Uman and McLain (1969)	1	v_f
Modified Transmission Line Model with Linear Current Decay with Height (MTLL)	Rakov and Dulzon (1987)	$1 - z'/H$	v_f
Modified Transmission Line Model with Exponential Current Decay with Height (MTLE)	Nucci et al. (1988a)	$\exp(-z'/\lambda)$	v_f
Bruce-Golde (BG) Model	Bruce and Golde (1941)	1	∞
Traveling Current Source (TCS) Model	Heidler (1985)	1	$-c$

Fonte: Uman e McLain (1969); Rakov e Dulzon (1987); Nucci et al. (1988); Bruce e Golde (1941) e; Heidler (1985) .

Esses modelos podem ser subdivididos em dois grupos, modelos do tipo linha de transmissão (TL) e modelos do tipo fonte de corrente viajante. A diferença básica entre os dois grupos de modelos, está na maneira como a corrente é injetada no canal da descarga. Para os modelos de linha de transmissão, a corrente é injetada no canal por uma fonte posicionada na base do canal, e a partir desse ponto a corrente se propaga de forma ascendente ao longo do canal (Figura 19). Para o grupo de modelos do tipo fonte viajante, a corrente é injetada por uma fonte que se propaga juntamente com a corrente ao longo do canal.

Figura 19 – Representação de como a corrente é injetada no canal do raio pelos modelos linha de transmissão (a), e fonte de corrente viajante (b).



Fonte: Adaptado de Rachidi et al. (2002).

Nas tabelas 2 e 3 são apresentados os referidos modelos de linha de transmissão e os modelos do tipo fonte viajante, respectivamente.

Tabela 2. Modelos de linha de Transmissão para $t \geq z'/v_f$.

Modelos de Linha de Transmissão para $t \geq z'/v_f$

Modelo TL (Uman e McLain, 1969)	$I(z',t) = I(0,t - z'/v)$ $\rho_L(z',t) = \frac{I(0,t - z'/v)}{v}$
Modelo MTLL (Rakov e Dulzon, 1987)	$I(z',t) = \left(1 - \frac{z'}{H}\right) I(0,t - z'/v)$ $\rho_L(z',t) = \left(1 - \frac{z'}{H}\right) \frac{I(0,t - z'/v)}{v} + \frac{Q(z',t)}{H}$
Modelo MTLE (Nucci et al. 1988a)	$I(z',t) = e^{-z'/\lambda} I(0,t - z'/v)$ $\rho_L(z',t) = e^{-z'/\lambda} \frac{I(0,t - z'/v)}{v} + \frac{e^{-z'/\lambda}}{\lambda} Q(z',t)$

$$Q(z',t) = \int_{z'/v}^t I(0,\tau - z'/v) d\tau \quad v = v_f = \text{const} \quad H = \text{const} \quad \lambda = \text{const}$$

Fonte: Uman; McLain (1969); Rakov e Dulzon (1987) e; Nucci et al.(1988)

Tabela 3. Modelos do tipo fonte de corrente viajante para $t \geq z'/v_f$.*Modelos do tipo fonte de corrente viajante para $t \geq z'/v_f$*

Modelo BG (Bruce e Golde, 1941)	$I(z',t) = I(0,t)$ $\rho_L(z',t) = \frac{I(0, z'/v_f)}{v_f}$
Modelo TSC (Heidler, 1985)	$I(z',t) = I(0, t + z'/c)$ $\rho_L(z',t) = -\frac{I(0, t + z'/c)}{c} + \frac{I(0, z'/v^*)}{v^*}$
Modelo DU (Diendorfer e Uman, 1990)	$I(z',t) = I(0, t + z'/c) - e^{-(t-z'/v_f)/\tau_D} I(0, z'/v^*)$ $\rho_L(z',t) = -\frac{I(0, t + z'/c)}{c} - e^{-(t-z'/v_f)/\tau_D} \times$ $\times \left[\frac{I(0, z'/v^*)}{v_f} + \frac{\tau_D}{v^*} \frac{dI(0, z'/v^*)}{dt} \right] +$ $+ \frac{I(0, z'/v^*)}{v^*} + \frac{\tau_D}{v^*} \frac{dI(0, z'/v^*)}{dt}$
$v^* = v_f / (1 + v_f / c) \quad v_f = \text{cons} \quad \tau_D = \text{const}$	

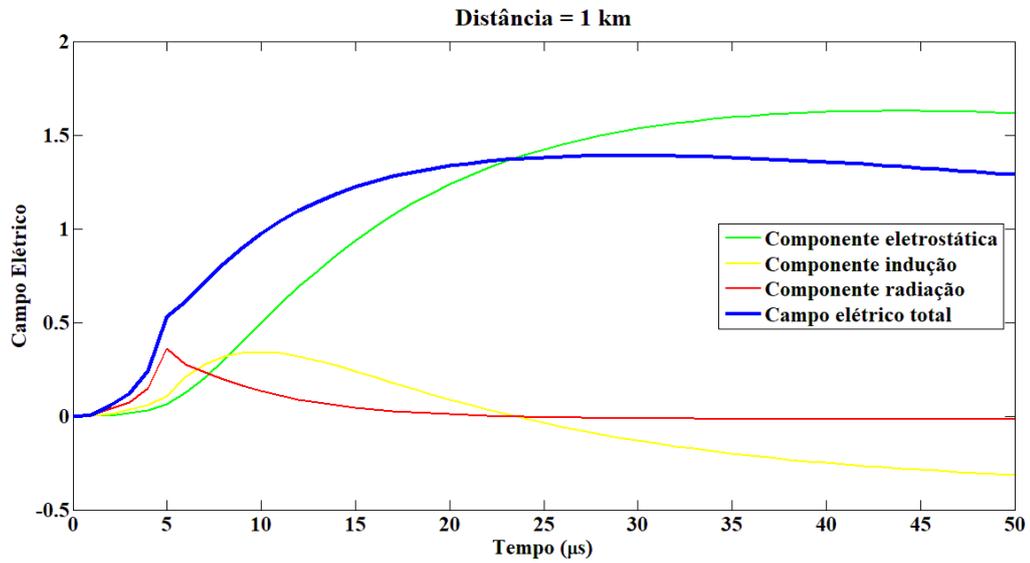
Fonte: Bruce e Golde (1941); Heidler (1985) e; Diendorfer e Uman (1990).

A fim de exemplificar as equações abordadas acima de forma gráfica, calculou-se a componente vertical do campo elétrico, utilizando a equação 14 para cálculo do campo total, fazendo uso do modelo de linha de transmissão (Modelo TL) para a corrente da descarga de retorno, e adotando os parâmetros da corrente padrão, determinada pelo CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Électriques, ou em português, Conselho internacional de grandes sistemas elétricos) para a primeira descarga de retorno.

Foram calculados campos à 1, 10, 30, 50, 100 e 500 km, do canal da corrente de retorno, para demonstrar o comportamento das componentes eletrostáticas, indução e radiação do campo elétrico total. Essas componentes foram traçadas juntamente com o campo total, para serem observadas.

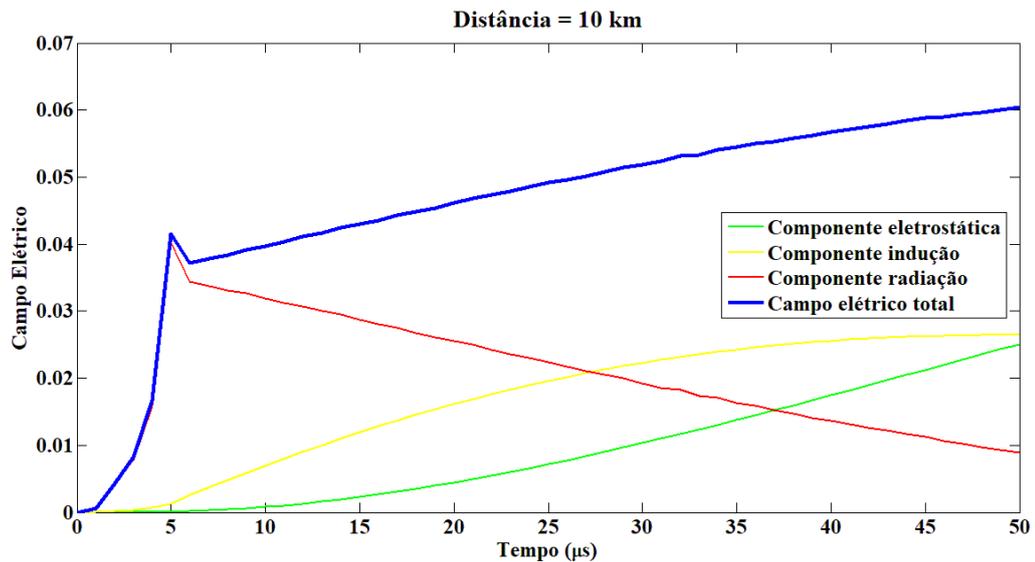
Os cálculos adotam uma velocidade de propagação da corrente ao longo do canal igual a 130 milhões de metros por segundo, tamanho do canal de 7 km, e velocidade da luz igual a 299,8 milhões de metros por segundo.

Figura 20 – Representação gráfica do cálculo da componente vertical E_z do campo elétrico total para uma descarga de retorno a 1 km de distância, assim como representação de suas componentes eletrostática, indução e radiação.



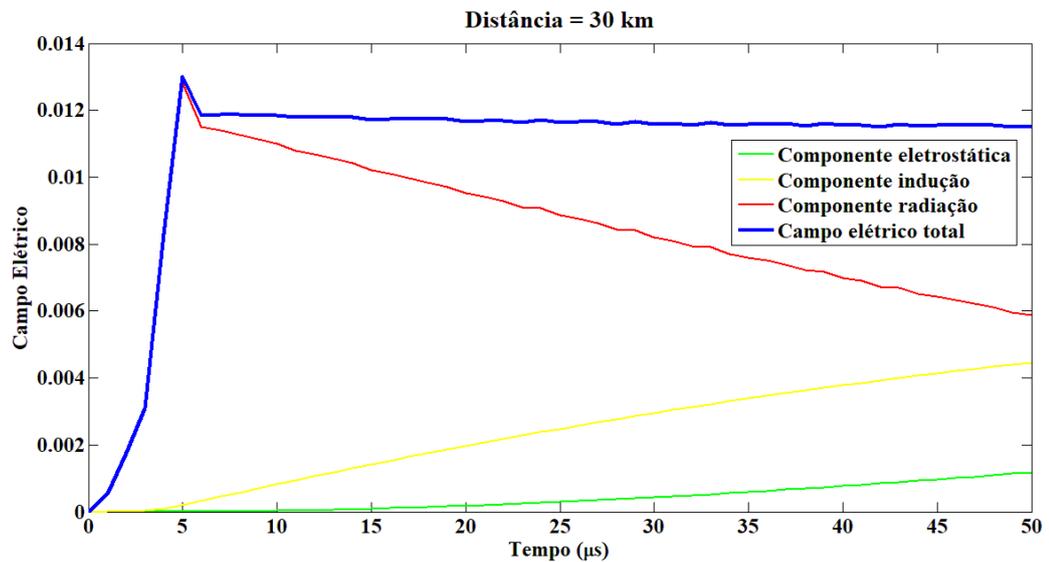
Fonte: Do autor.

Figura 21 – Representação gráfica do cálculo da componente vertical E_z do campo elétrico total para uma descarga de retorno a 10 km de distância, assim como representação de suas componentes eletrostática, indução e radiação.



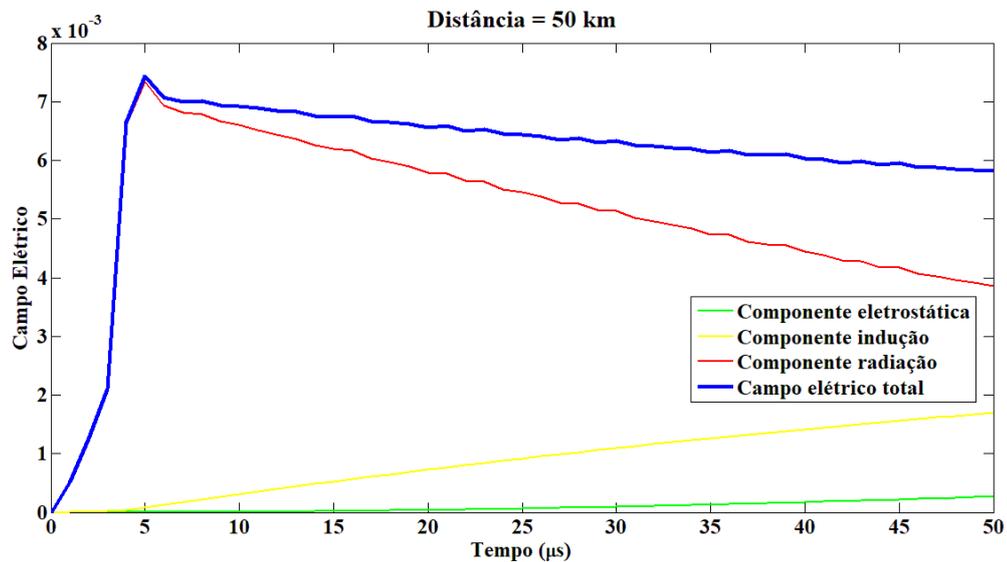
Fonte: Do autor.

Figura 22 – Representação gráfica do cálculo da componente vertical E_z do campo elétrico total para uma descarga de retorno a 30 km de distância, assim como representação de suas componentes eletrostática, indução e radiação.



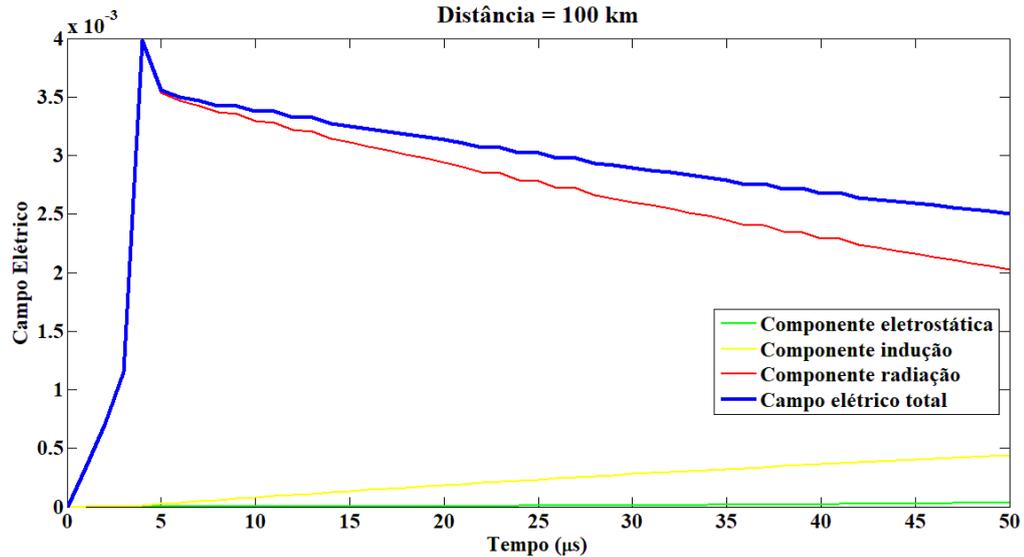
Fonte: Do autor.

Figura 23 – Representação gráfica do cálculo da componente vertical E_z do campo elétrico total para uma descarga de retorno a 50 km de distância, assim como representação de suas componentes eletrostática, indução e radiação.



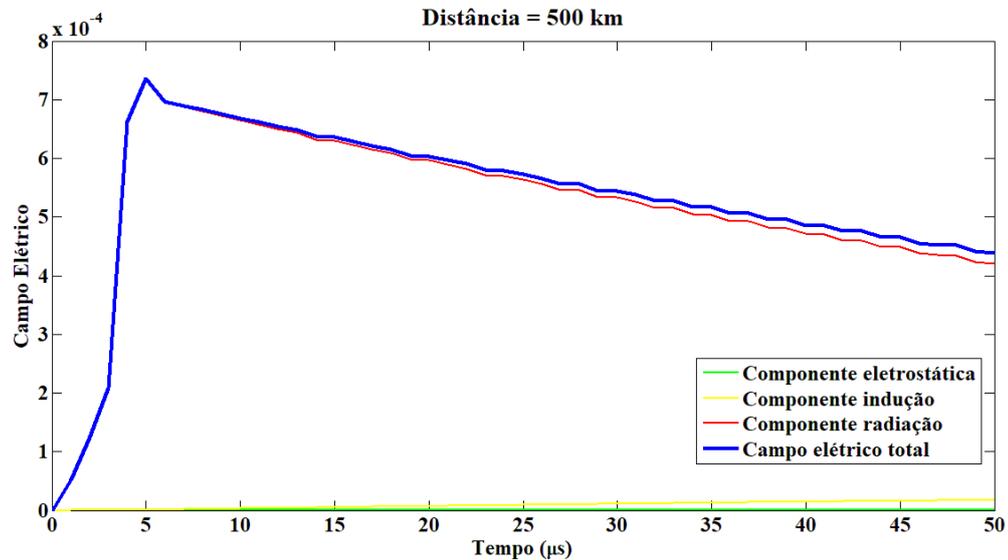
Fonte: Do autor.

Figura 24 – Representação gráfica do cálculo da componente vertical E_z do campo elétrico total para uma descarga de retorno a 100 km de distância, assim como representação de suas componentes eletrostática, indução e radiação.



Fonte: Do autor.

Figura 25 – Representação gráfica do cálculo da componente vertical E_z do campo elétrico total para uma descarga de retorno a 500 km de distância, assim como representação de suas componentes eletrostática, indução e radiação.



Fonte: Do autor.

Como esperado, para distâncias superiores a 50 km, o pico inicial da componente vertical do campo elétrico é predominantemente radiação. E para distâncias próximas ao canal, a componente eletrostática é predominante sobre as demais.

3.2 Equações de conversão de campo em corrente

A medição direta da corrente gerada por uma descarga atmosférica não é uma tarefa trivial, pois esse evento é aleatório, em termos espaciais e temporais, e os equipamentos para tais medições não são móveis ou de fácil transporte. Dessa forma, a obtenção da corrente de pico gerada por um raio se torna mais viável.

Para a realização dessa tarefa são necessárias equações, que relacionem os valores dos campos (irradiados) elétricos ou magnéticos registrados de forma remota, com a corrente que os gerou.

Estas equações podem ser obtidas de forma analítico-teórica, utilizando modelos da corrente da descarga de retorno e as equações de campos eletromagnéticos, ou de formas empíricas, através de medições diretas da corrente, simultaneamente com as medições dos campos eletromagnéticos gerados por ela.

3.2.1 Equações teóricas

Uman e Mclain (1970) utilizando as equações de campo elétrico vertical e o modelo de linha de transmissão para a descarga de retorno, derivaram uma equação que relaciona a intensidade do campo elétrico com a corrente na base do canal.

$$I = \frac{2\pi\epsilon_0 c^2 r}{v} E \quad (17)$$

Onde:

$\epsilon_0 = (1/36\pi)10^{-9}$ F/m, correspondente a permissividade do vácuo;

$c = 3 \times 10^8$ m/s, correspondente a velocidade da luz;

r , é a distância entre o canal e o ponto de medição do campo elétrico E ;

v , corresponde a velocidade de propagação da descarga de retorno, esta velocidade é considerada constante e geralmente é desconhecida, porém, de um evento para outro pode variar cerca de $c/3$ a $2c/3$.

Como se trata de uma aproximação, existem algumas restrições para seu uso. Deve-se assumir uma superfície perfeitamente condutora entre o raio e ponto de medição do campo elétrico e deve ser aplicada para distâncias de observação superiores a 50km. Isso ocorre, pois essa equação é baseada apenas na componente radiação do campo elétrico.

De forma similar, é possível derivar a corrente a partir da densidade de fluxo magnético \mathbf{B} . Para isso basta utilizar a relação $\mathbf{E}_z / \mathbf{B}\phi = c \cos\alpha$ (BAUM, 2008), sendo α o ângulo de inclinação entre o ponto de observação e a fonte. Como ambos estão ao nível do solo, temos que $\mathbf{E}_z / \mathbf{B}\phi = c$. Assim, a relação entre a corrente na base do canal e a densidade de fluxo magnético é dada por:

$$I = \frac{2\pi\epsilon_0 c^3 r}{v} B \quad (18)$$

3.2.2 Equações empíricas

O procedimento para elaboração de uma equação empírica, que relacione o campo elétrico radiado por um raio à sua corrente, é obtida através de medições simultâneas da corrente na base do canal e seu respectivo campo elétrico ou magnético radiado.

Willett et al. (1989) propuseram uma fórmula empírica para estimar a corrente de pico (\mathbf{I}) da descarga de retorno de um raio, a partir de medições remotas do pico de campo elétrico (\mathbf{E}) e da distância (\mathbf{D}) entre o ponto de medição e o ponto de ocorrência do raio.

$$I_p = -0.0027 - 0.039 * D * E_p \quad (19)$$

Na equação (19), a corrente de pico (\mathbf{I}_p) está em amperes (A), o pico do campo elétrico (\mathbf{E}_p) está em volt por metros (V/m) e a distância (\mathbf{D}) entre a localização dos sensores de medição e o canal do raio está em metros (m).

Willett et al. (1989) derivaram sua fórmula utilizando dados de 28 raios induzidos no Kennedy Space Center (KSC) em 1987. O campo elétrico foi medido à uma distância de 5,16 Km da base do canal do raio. O percurso de propagação do campo eletromagnético foi sobre água salgada. Logo, os efeitos de propagação devido as perdas do solo foram negligenciadas.

Em 1992, Rakov, Thottappillil e Uman (1992) propuseram uma outra fórmula empírica, baseada nos mesmos dados de Willett et al. (1989), porém realizando algumas considerações e diferentes análises. Um importante comentário feito por Rakov, Thottappillil e Uman (1992)

foi que a expressão proposta por Willett et al. (1989) não era a que melhor se ajustava aos dados para prever a corrente de pico em função das medições do campo elétrico irradiado, porém era útil para prever o campo elétrico em função das medições de corrente. Rakov, Thottappillil e Uman (1992) afirmam que isso ocorreu pois Willett et al. (1989) obtiveram sua fórmula a partir da regressão do campo elétrico sobre a corrente de pico. Jordan et al. (1992) utilizaram a expressão de Willett et al. (1989) com o propósito de obter o pico do campo elétrico através da corrente medida na base do canal em raios induzidos, no Novo México e na Florida, U.S.A.

Na fórmula empírica proposta por Rakov, Thottappillil e Uman (1992), **I_p** está em (kA), **E_p** em (V/m) e a distância **D** em (Km). Tal expressão se baseia na convenção de sinais da eletricidade atmosférica, onde um campo elétrico positivo é devido a um pico de corrente negativo. Uma consideração importante a respeito desta fórmula, é que ela deve ser usada para distâncias onde o pico do campo elétrico é basicamente radiação.

$$I_p = 1.5 - 0.037 * D * E_p \quad (20)$$

Recentemente, Mallick et al. (2014) publicaram uma outra expressão empírica para estimar a corrente de pico da descarga de retorno de um raio, a partir de medições remotas de campo elétrico. Eles utilizaram dados de medições de corrente na base do canal de 89 descargas de retorno trigadas em Camp Blanding (CB), Florida, USA e campos elétricos medidos simultaneamente, no Observatório de Raios de Gainesville (*Lightning Observatory in Gainesville* - LOG) que fica a 45 km de CB. A essa distância, a componente radiação do campo elétrico é predominante sobre as demais.

Na fórmula proposta por Mallick et al. (2014), **I_p** é dado em (kA), **E_p** em V/m e **D** em Km.

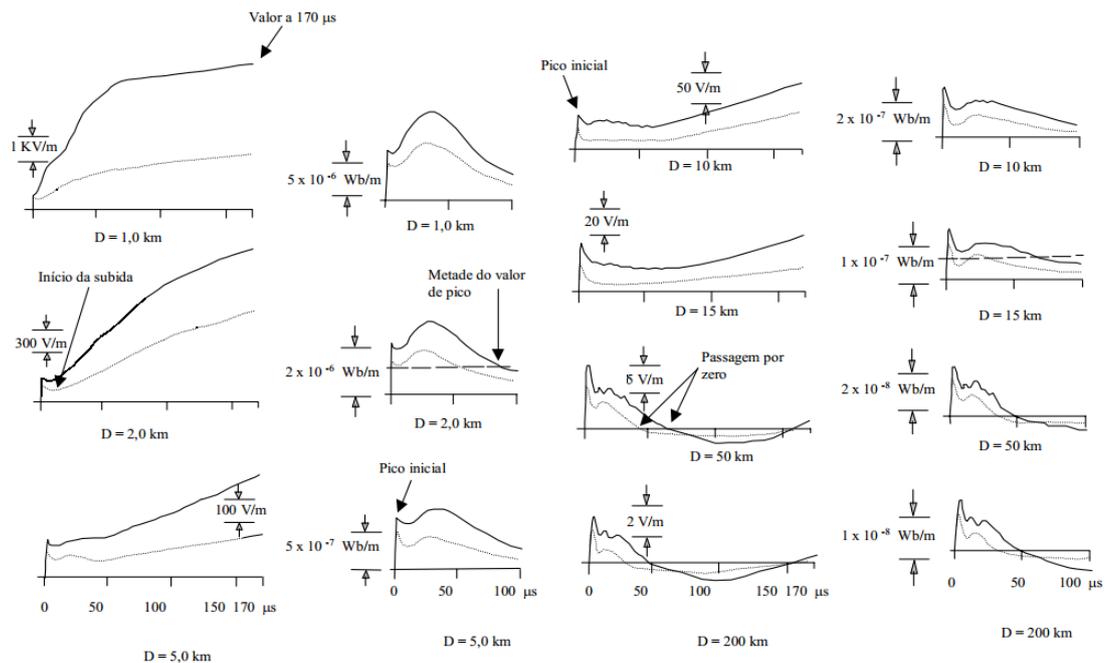
$$I_p = -0.66 - 0.028 * D * E_p \quad (21)$$

4 COMPORTAMENTO DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS ASSOCIADOS A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Como podemos observar no capítulo anterior, os campos elétricos e magnéticos radiados por descargas atmosféricas são dependentes da distância entre o canal e o ponto de observação (medição dos campos). Para o campo elétrico o termo mais dependente da distância, a componente eletrostática, e a menos dependente, a componente radiação. De forma análoga, para a densidade de fluxo magnético, a componente mais dependente é a magnetostática (ou indução) e a menos dependente é a radiação.

Essa característica faz com que o comportamento das formas de onda seja diferente, de acordo com seu ponto de medição. Lin et al. (1979) apresentaram um dos primeiros trabalhos relacionados às formas de onda dos campos eletromagnéticos gerados por raios, associando com a distância entre o ponto de observação e o local da descarga. Nesse trabalho, os autores apresentaram formas de onda típicas de campo elétrico vertical e de densidade de fluxo magnético radial, referentes à primeira descarga de retorno e às descargas subsequentes, às distâncias de 1, 2, 5, 10, 15, 50, e 200 km (Figura 26).

Figura 26 – Típicas formas de onda de campos elétricos e magnéticos radiados por primeiras (linha sólida) e subsequentes (linha pontilhada) descargas de retorno às distâncias de 1, 2, 5, 10, 15, 50, 100 e 200 km.



Fonte: Adaptado de Lin et al. (1979).

Como pode-se observar na Figura 26, para curtas distâncias (1 - 15 km), as formas de onda do campo elétrico são bem distintas das formas de onda da densidade de fluxo magnético nas respectivas distâncias. Isso ocorre principalmente, pois a curtas distâncias, as componentes do campo elétrico que se destacam são a eletrostática e indução, e na densidade de fluxo magnético, somente a magnetostática. Logo, tornando as formas de onda distintas à curtas distâncias. Por outro lado, para longas distâncias, principalmente maiores que 50 km, as formas de onda do campo elétrico e da densidade de fluxo magnético são muito parecidas, pois a essas distâncias, a componente prevalecente é a ‘radiação’, em ambos os casos.

4.1 Raios nuvem-solo negativos e seus componentes

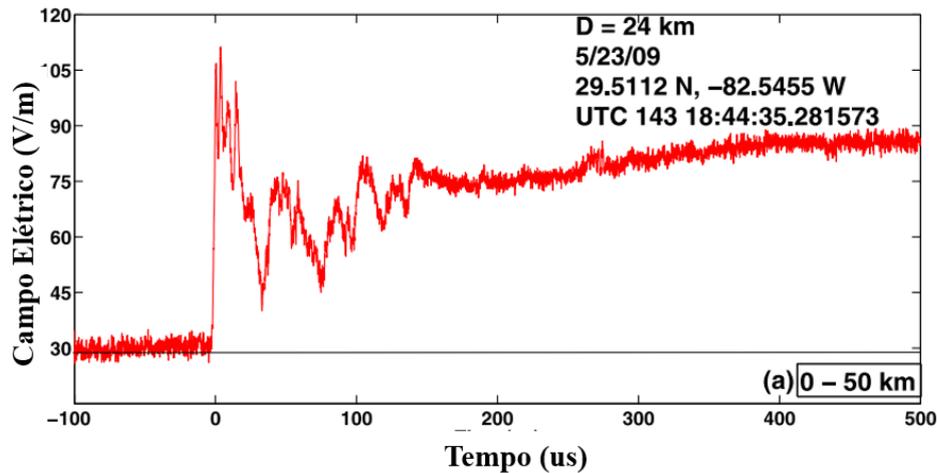
Apresenta-se neste tópico algumas formas de onda de descargas nuvem-solo negativas, bem como a forma de onda de alguns processos que as compõem, como os colapsos preliminares (“*preliminary breakdown*”), os pulsos gerados pelo líder escalonado (“*stepped-leader*”) e a descarga de retorno (“*return stroke*”).

4.2 Descarga nuvem-solo observada a curta distância

Para curtas distâncias, os campos observados da descarga de retorno apresentam um comportamento unipolar, devido à predominância da componente eletrostática sobre as demais componentes, como observado na Figura 27. O pico inicial devido à corrente de retorno negativa apresenta polaridade positiva, isso ocorre quando levamos em conta a convenção do sinal da eletricidade atmosférica. Para esta convenção a polaridade positiva corresponde ao movimento de cargas negativas descendentes. Já a polaridade negativa do campo elétrico, refere-se ao movimento de cargas negativas ascendentes.

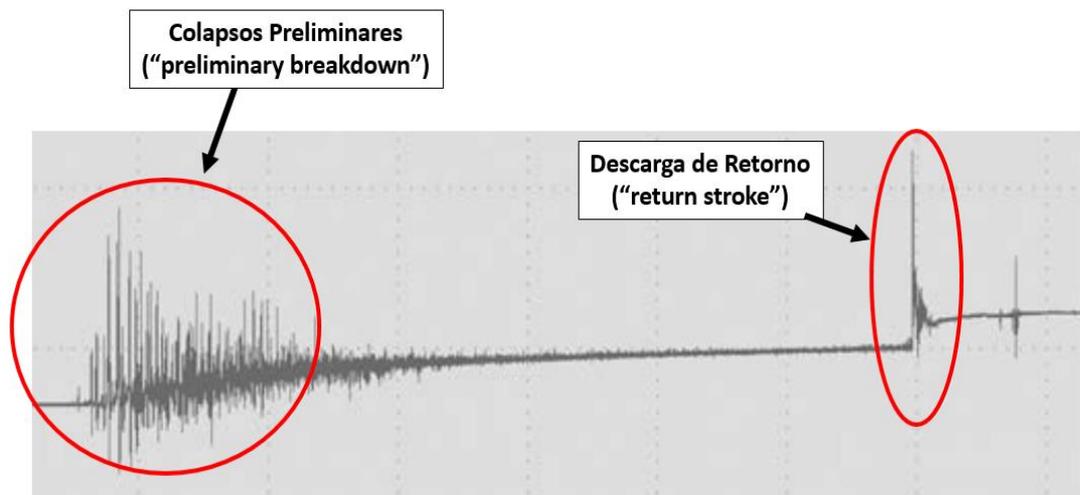
Observa-se uma rampa ascendente após a descarga de retorno, em formas de onda de raios detectados a curtas distâncias. Essa espécie de “calda” está relacionada às componentes eletrostática e indução do campo elétrico total, e também à constante de tempo do integrador utilizado na medição. Quanto mais próxima é a ocorrência do raio mais inclinada será essa rampa, demonstrando maior influência dessas componentes (eletrostática e indução).

Figura 27 – Forma de onda do campo elétrico radiado por uma descarga de retorno, à uma distância de 24 km.



Fonte: Adaptado de Haddad, Rakov e Cummer (2012).

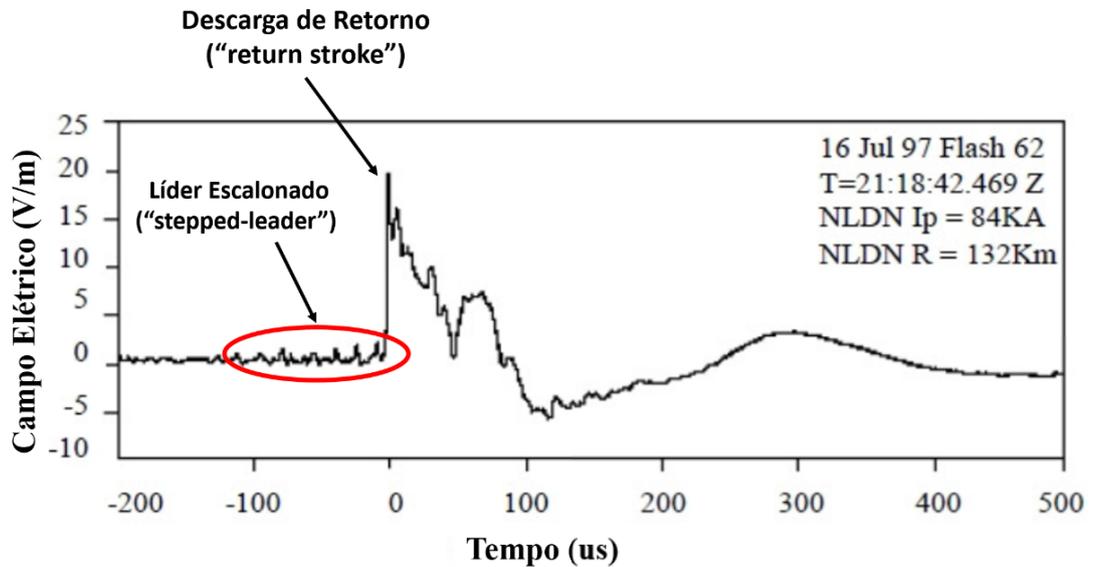
Figura 28 – Forma de onda do campo elétrico radiado por uma descarga de retorno, com a indicação dos pulsos dos colapsos preliminares.



Fonte: Adaptado de Baharudin et al. (2012).

Nota-se na Figura 28, que os valores médios dos pulsos de colapsos preliminares sofrem uma pequena variação ascendente. Isso é caracterizado por influência da componente eletrostática do campo elétrico. Poderemos observar no próximo item que o mesmo não ocorre para observações realizadas a longas distâncias (Figura 30,) onde a componente radiação é predominante.

Figura 29 – Forma de onda do campo elétrico radiado por uma descarga de retorno, à uma distância de 132 km, com corrente de pico de 84 kA, e indicação dos pulsos referentes ao líder escalonado.



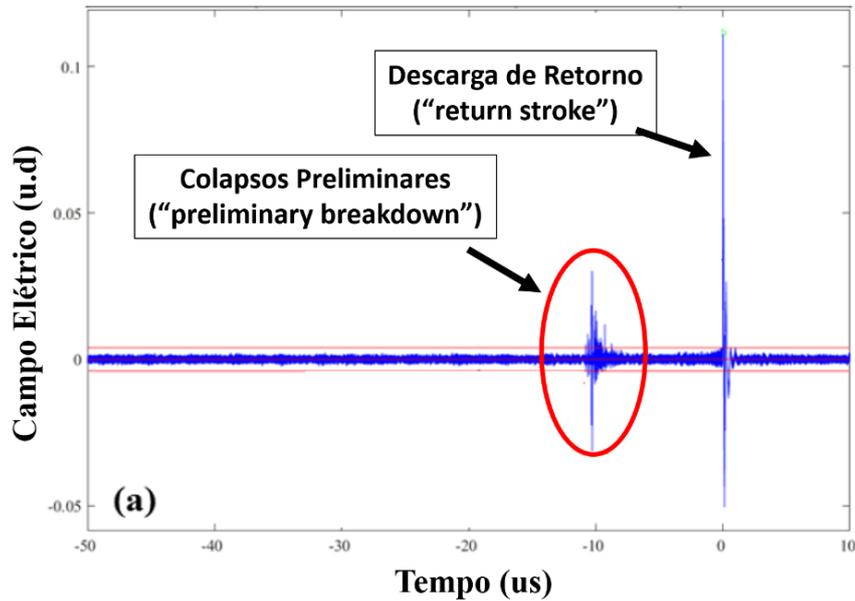
Fonte: Adaptado de Rakov (1999).

Na Figura 29 observa-se a presença de pulsos que antecedem a descarga de retorno, esses pulsos ocorrem devido ao líder escalonado. Em primeiras descargas de retorno eles aparecem de forma mais evidente.

4.3 Descarga nuvem-solo observada a longa distância

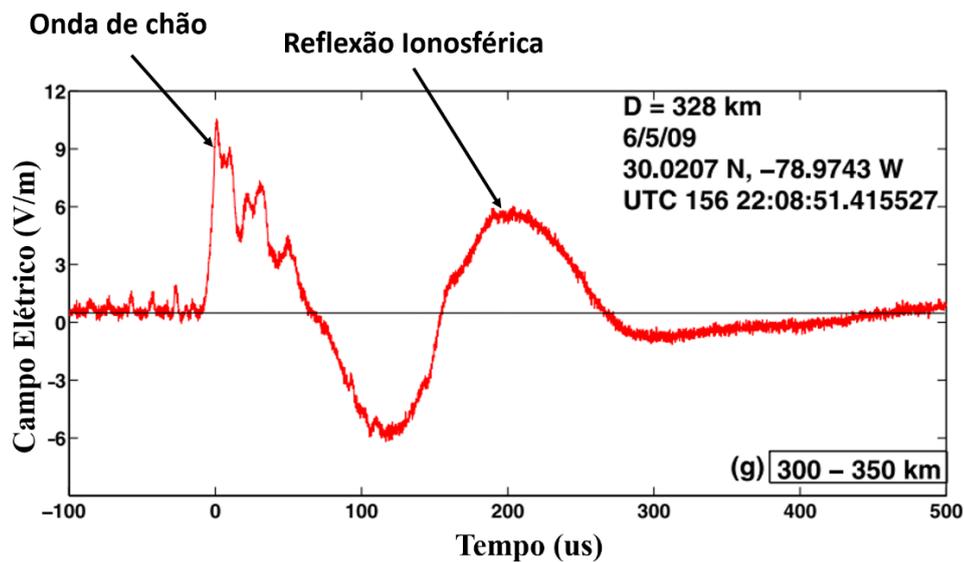
Nas formas de onda de campo elétrico registradas a longas distâncias, onde a componente radiação é predominante, nota-se uma inversão na polaridade do campo elétrico a aproximadamente dezenas de microssegundos do pico inicial. Medições em solo tendem a registrar um pico invertido, em geral inferior ao pico inicial. Uman, Mclain e Krider (1975), em simulações de campos **E** e **B**, gerados por uma determinada corrente, segundo modelo TL a longas distâncias, verificaram uma passagem por zero no instante (50 us). Neste instante a onda de corrente, que se propaga a uma velocidade de 8×10^7 m/s, atinge o topo de um canal de 4 km de extensão. A onda “invertida” que ocorre após este instante é uma réplica da onda inicial. Esse efeito foi denominado por Uman, Mclain e KRIDER (1975) de “imagem espelho”, e foi utilizado para sustentar o modelo teórico de corrente de retorno. Lin et al. (1979), com base em diversas medições de campo a diversas distâncias, concluíram que os picos subsequentes ao pico inicial são causados pela reflexão ionosférica da radiação eletromagnética.

Figura 30 – Forma de onda do campo elétrico radiado por uma descarga de retorno, à uma distância de 93 km e corrente de pico de 77 kA reportado pela rede NLDN. Com a indicação dos pulsos dos colapsos preliminares.



Fonte: Adaptado de Zhu, Rakov e Tran (2016).

Figura 31 – Indicações da onda de chão e primeira reflexão ionosférica de uma descarga de retorno, à uma distância de 328 km.



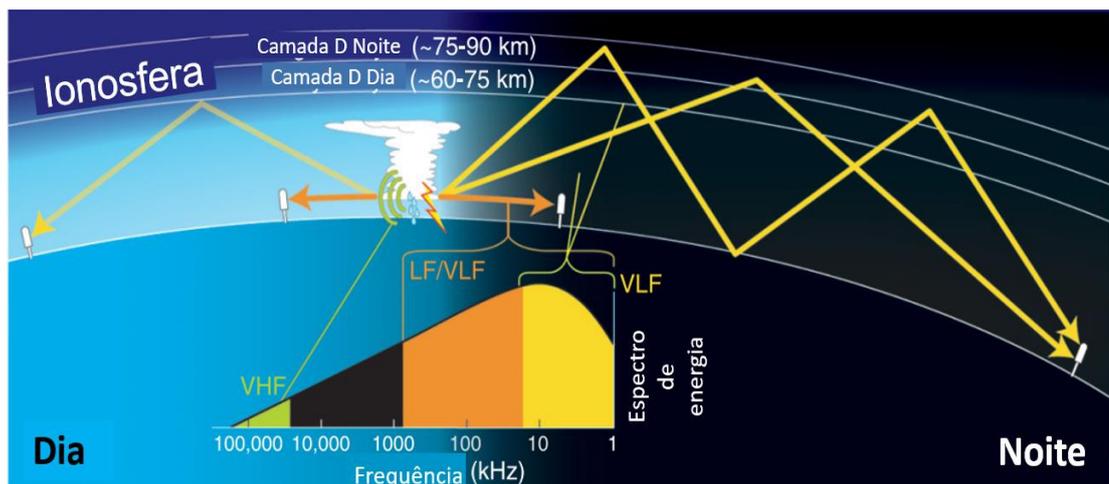
Fonte: Adaptado de Haddad, Rakov e Cummer (2012).

4.4 Raios a distâncias muito longas (reflexão ionosférica)

Campos eletromagnéticos radiados por raios, e medidos a distâncias muito longas (maiores que 100 km) apresentam, geralmente, múltiplos pulsos em sua forma de onda. Um exemplo pode ser observado na Figura 31.

As características das formas de onda dos campos gerados por raios, medidas a curtas distâncias, são determinadas primariamente pelas características do próprio raio que as gerou. Para formas de onda de raios detectados a distâncias muito longas, as características do meio de propagação irão influenciar nas características das formas de onda (RAKOV; UMAN, 2003).

Figura 32 – Diagrama esquemático do guia de onda formado entre a terra e a ionosfera, que possibilita a propagação de ondas VLF (3 – 30 KHz) emitidas por descargas atmosféricas por milhares de quilômetros através de múltiplas reflexões.



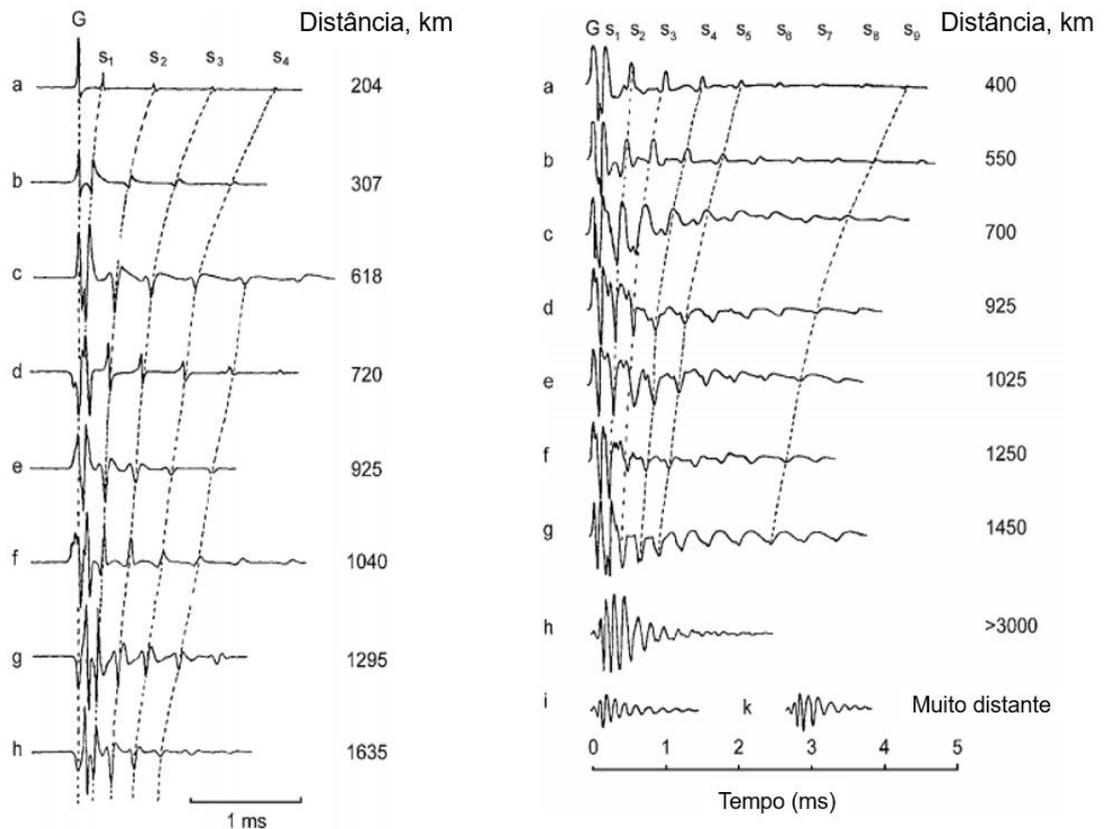
Fonte: Adaptado de pessi et al. (2009).

Os campos eletromagnéticos radiados por raios podem se propagar por grandes distâncias através do guia de onda, formado pela terra e a ionosfera (Figura 32). Esses sinais eletromagnéticos, quando sentidos a partir de algumas centenas de quilômetros, são denominados na literatura de *Atmospherics*, ou somente *sferics*.

Os *sferics* possuem o pico de energia na faixa de frequência VLF (3 a 30 KHz). A propagação de ondas VLF a longas distâncias, muitas vezes apresenta-se como uma combinação entre os dois tipos de ondas (de superfície e de céu), podendo ocorrer interferência pela combinação destrutiva das duas ondas.

As ondas céu estão presentes nas formas de onda dos campos elétricos radiados por raios, na presença de múltiplos pulsos, após a onda de superfície. A onda de superfície é a primeira a aparecer, pois ela toma o percurso mais curto para chegar ao sensor. Schonland et al. (1940) foram uns dos primeiros pesquisadores a apresentar tal características em formas de onda de campos radiados por raios.

Figura 33 – *Sferics* observados no período da noite a diferentes distâncias, sendo que o mais distante contém múltiplos pulsos indicando diversas reflexões ionosféricas.



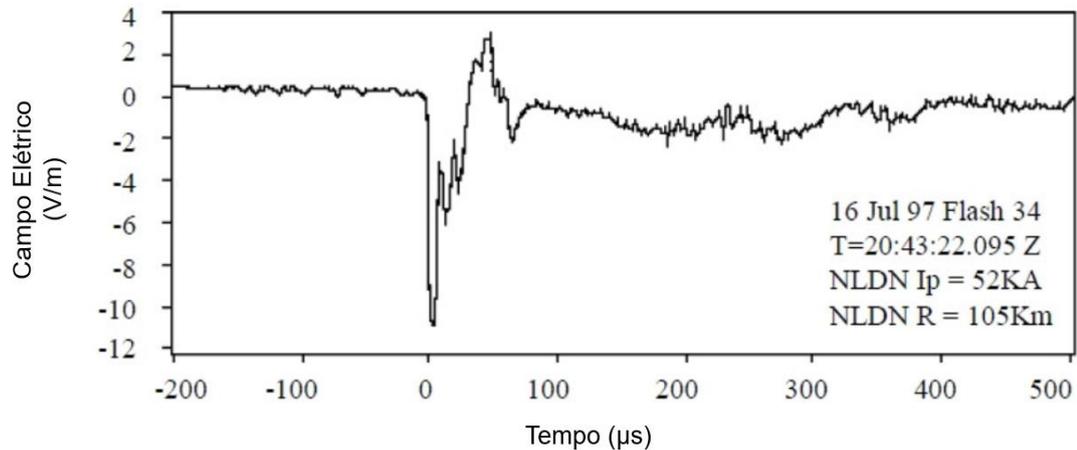
Fonte: Adaptado de Schonland et al. (1940).

4.5 Raios positivos

Os raios positivos representam apenas cerca de 10% dos raios que envolvem o solo (RAKOV; UMAN, 2003). As formas de onda do campo elétrico de um raio positivo são similares às originadas por descargas negativas, exceto por sua polaridade inicial, que é negativa em medições que consideram a convenção de sinal da eletricidade atmosférica. A Figura 34 mostra um exemplo de uma forma de onda do campo elétrico originada por uma

corrente de retorno positiva, onde é possível verificar a relativa similaridade com as formas de onda apresentadas para raios nuvem-solo negativos.

Figura 34 – Forma de onda do campo elétrico radiado por uma descarga de retorno positiva, à uma distância de 105 km e corrente de pico de 52 kA reportado pela rede NLDN.



Fonte: Adaptado de Rakov (1999).

Usualmente, a intensidade e o tempo da frente de onda, associados às descargas positivas, são maiores que aqueles correspondentes às correntes de retorno de descargas negativas. As descargas positivas contêm usualmente uma única descarga de retorno.

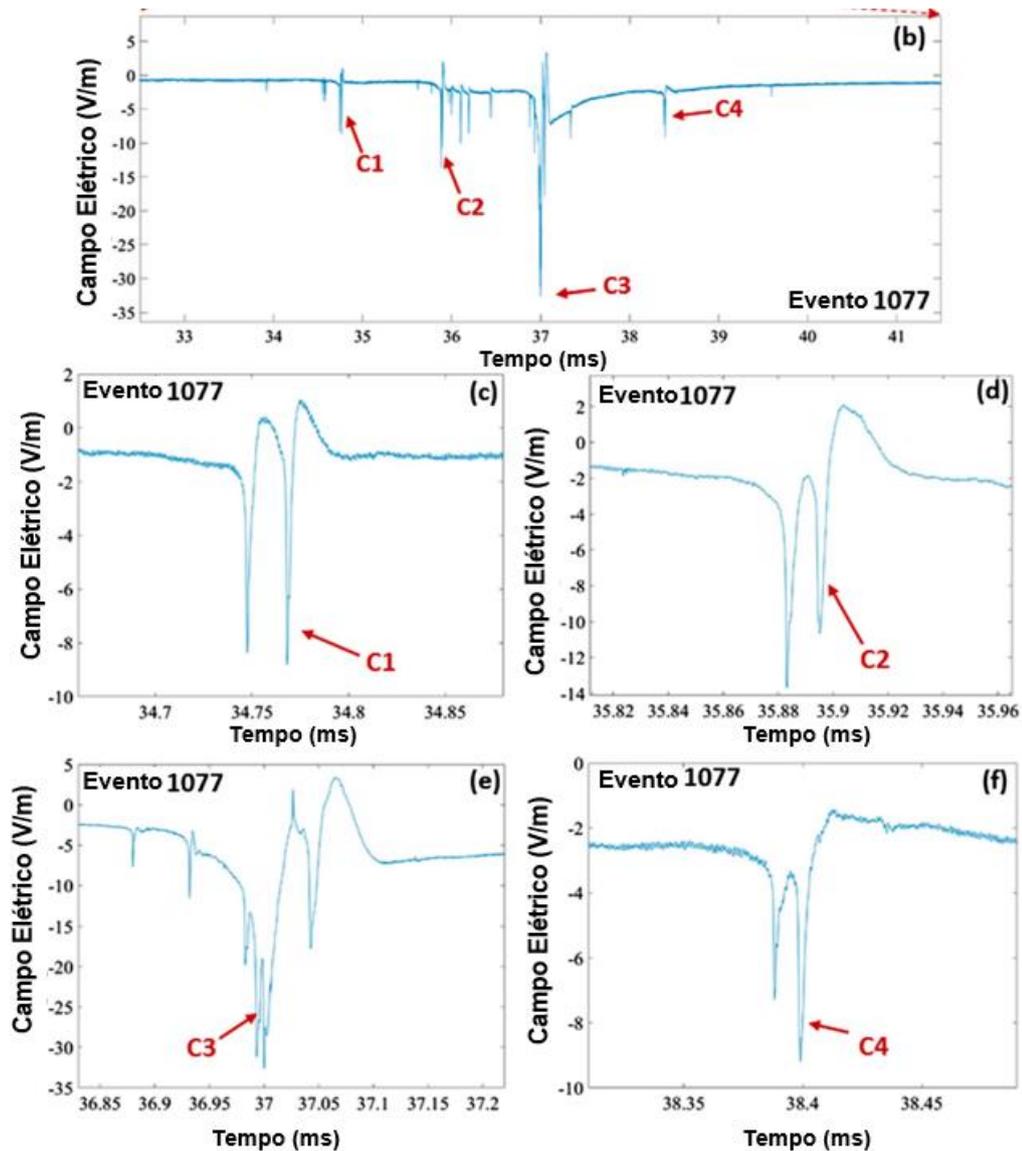
4.6 Raios Nuvem

Como visto no capítulo 2, os raios nuvem são compostos por raios intra-nuvem, nuvem-ar e nuvem-nuvem. Eles representam cerca de três quartos de toda atividade de raios no planeta, porém, são menos estudados que os nuvem-solo, devido à dificuldade de registro de imagens dos canais intra-nuvem e à impossibilidade de medição direta da corrente em seus canais. Portanto, o principal meio de estudo deste tipo de raios é através de medições remotas de campos eletromagnéticos.

Recentemente, Zhu et al. (2016) avaliou a eficiência da rede NLDN para a detecção desses tipos de raios. Em seu experimento ele obteve registros simultâneos do campo elétrico e imagens dos canais. A partir desses registros foi possível identificar, com maior certeza, que a assinatura do campo elétrico registrado pertencia de fato a uma descarga que ocorreu na nuvem.

A assinatura das formas de onda do campo elétrico irradiado por descargas nas nuvens são diversificadas e não apresentam um padrão bem definido, como é o caso das descargas NS. Na Figura abaixo apresentamos alguns exemplos de formas de onda de descargas nuvem.

Figura 35 – Exemplo de descarga do tipo nuvem que ocorreu de forma isolada (sem a presença de um canal que tocasse o solo), observada em Gainesville, FL. As distâncias variam entre 22 e 28 km segundo a localização fornecida pela NLDN.



Fonte: Adaptado de Zhu et al. (2016)

A única característica bem definida entre as formas de onda de raios nuvem, é o fato de apresentarem bipolaridade e estreita largura de pulso, independentemente da distância do ponto de observação.

Mais formas de onda de descargas que ocorrem nas nuvens são apresentadas no Capítulo 8, onde aborda-se a aplicação do LDWSS no estudo de CIDs (que são um tipo específico de descargas intra-nuvem) e dos super raios intra-nuvem.

5 MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS PARA DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE RAIOS

Ocorrem diversos processos físicos em descargas atmosféricas na nuvem e em descargas nuvem-solo. Cada processo de uma descarga atmosférica tem associado a ele, pulsos eletromagnéticos. Esses pulsos, de modo geral, são conhecidos por serem sinais de banda larga, tendo sua energia eletromagnética distribuída em um intervalo, que vai desde alguns milihertz até próximo dos 300 Mhz, com pico de energia nas frequências entre 5 e 10 Khz, para raios detectados a distâncias maiores que 50 km (onde a componente radiação é predominante). Os pulsos eletromagnéticos emitidos por raios podem ser detectados por sensores de campos elétricos ou magnéticos, a curtas ou longas distâncias. Neste capítulo vamos abordar o princípio de funcionamento desses sensores elétricos e magnéticos e como organizá-los para localizar descargas atmosféricas.

5.1 Métodos de detecção de raios

5.1.1 Medição de campo elétrico

Para a eletricidade estática, temos como parâmetro básico a 'carga elétrica'. Em alguns casos práticos essa carga pode ser medida diretamente, porém, é a partir do campo elétrico gerado pelas cargas elétricas que é feita a maioria das medições.

A medição do campo elétrico geralmente é aplicada para detectar, localizar e quantificar fontes de carga elétrica, bem como para avaliar a influência dessas cargas. Medição de campo elétrico também fornece a base para medição de outros parâmetros de interesse em eletrostática, como: tensões sobre superfícies; pessoas e volumes; densidade de carga em superfícies e em volumes; quantidades de carga em objetos e; capacidade dos materiais em dissipar uma carga estática.

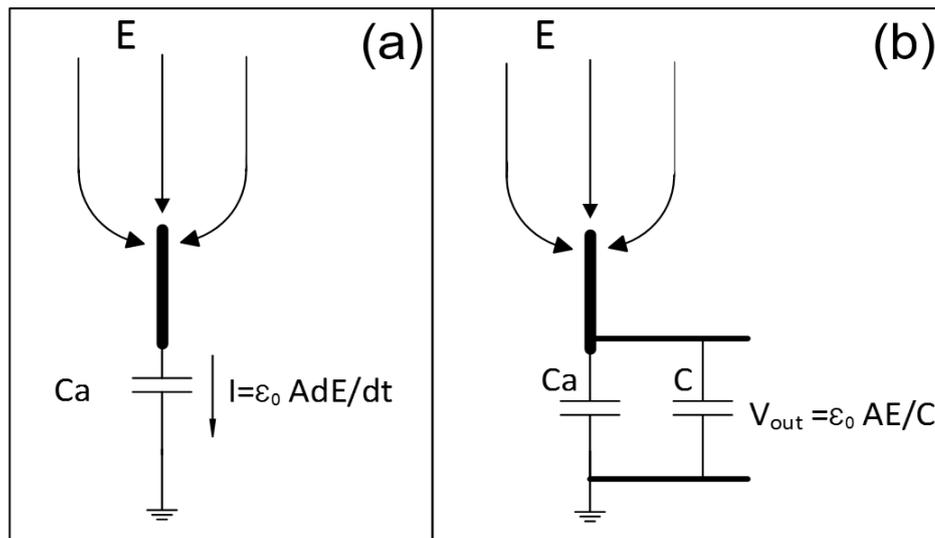
A abordagem mais prática para medir o campo elétrico consiste em medir a carga induzida sobre a superfície de detecção.

Um campo elétrico é associado a uma distribuição de carga em uma superfície condutora, conforme equação abaixo:

$$E = \sigma / \epsilon_0 \quad (22)$$

Onde, E é o campo elétrico (V/m), σ é a densidade de carga (C/m^2) e ϵ_0 é a permissividade do espaço livre ($8,854 \times 10^{-12}$). Essa relação é a base para todos os instrumentos de medição de campos elétricos (UMAN, 1987).

Figura 36 – Representação da medição de campo elétrico utilizando um condutor metálico. (a) antena sem circuito externo. (b) Antena com capacitor integrador externo, considerando $C \gg C_a$.



Fonte: Do autor.

5.1.1.1 Antenas prato plano (*Flat-plate*) e chicote (*Whip*)

Uma das formas mais simples de se medir o campo elétrico devido a uma descarga atmosférica, é utilizando um objeto metálico (uma antena por exemplo). A componente vertical do campo elétrico gerado por uma descarga atmosférica, induz cargas Q na superfície deste objeto metálico, que pode ter qualquer geometria, na prática e na maioria das vezes utiliza-se as antenas do tipo prato plano (*flat-plate*) e antenas chicote (*whip*). Essa quantidade de cargas pode ser encontrada a partir do produto da densidade de cargas na superfície da antena \vec{D} pela área A da antena.

$$Q = \vec{D}A \quad (23)$$

Considerando a densidade de cargas $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}_n$, pois o campo elétrico normal à superfície da antena tem seu comprimento de onda bem maior que o tamanho físico da antena,

tem-se que a quantidade de cargas Q induzidas na antena é proporcional ao produto da permissividade do vácuo, à intensidade de campo elétrico normal à superfície da antena e à área da antena.

$$Q = \varepsilon_0 E_n A \quad (24)$$

Entretanto, as cargas induzidas na antena variam ao longo do tempo, gerando uma corrente ($I=dQ/dt$) que flui da antena para a terra (Figura 36 a). Essa corrente é diretamente proporcional à variação de campo elétrico dE/dt .

$$I = \frac{dQ}{dt} = \varepsilon_0 A \frac{dE}{dt} \quad (25)$$

Logo, para se medir E , é necessário integrar a corrente I que flui pela antena, e para isso é utilizado um circuito integrador. O circuito integrador pode ser passivo, constituído de apenas um capacitor (Figura 36 b), ou ativo, implementado com amplificadores operacionais, resistores e capacitores. Utilizando um capacitor integrador, a tensão nos terminais do capacitor é dada por:

$$V = \frac{1}{C} \int I(t) dt = \frac{Q}{C} = \frac{A \varepsilon_0 E_n}{C} \quad (26)$$

A tensão de saída nos terminais do capacitor é inversamente proporcional à capacitância do integrador. Portanto, considerando que a área da antena é constante, assim como a permissividade do vácuo, o ganho do sistema é controlado pelo capacitor integrador. Quanto menor o valor da capacitância de C , maior será o ganho do sistema.

Abaixo temos a equação utilizada para relacionar o valor do campo elétrico com o valor de tensão lida em um sistema digitalizador, como um osciloscópio.

$$E_n = \frac{V_{out} C}{A \varepsilon_0} \quad (27)$$

Onde:

A - Área da chapa plana

E_n - Intensidade de campo elétrico normal a superfície da antena.

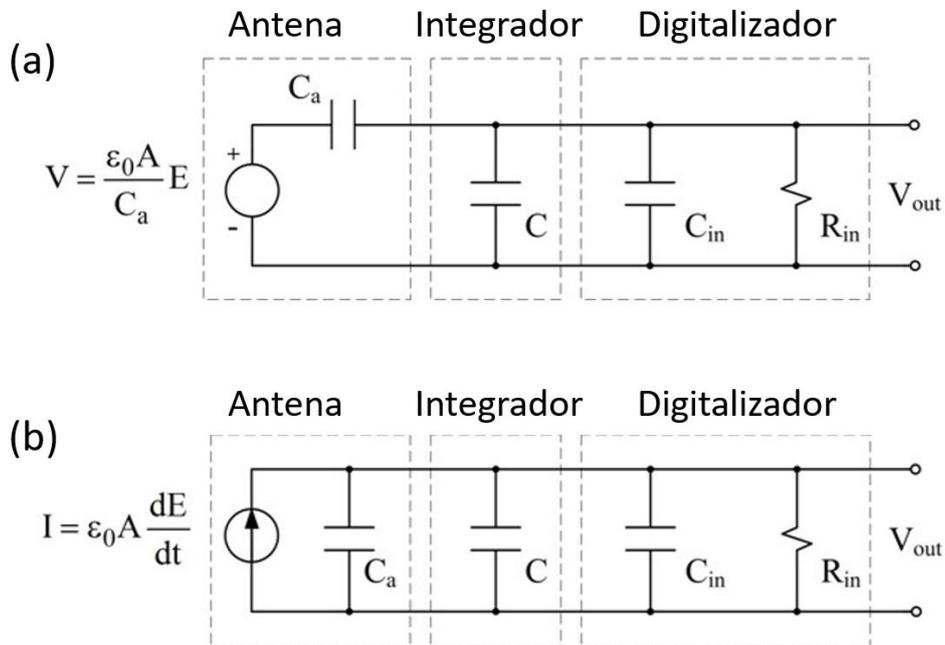
ε_0 - Permissividade do Vácuo

Q - Carga induzida

Porém, a equação acima só é válida considerando que a impedância de entrada do circuito de leitura da forma de onda (osciloscópio ou digitalizador) é infinita. Na prática, a impedância de entrada R_{in} não é infinita, e exerce a função de controlar a constante de tempo do circuito ou a frequência de corte inferior, sob a qual a equação acima é válida.

Para facilitar esta análise, utiliza-se o equivalente de Norton ou Thevenin da antena, juntamente com o capacitor integrador e a capacitância e resistência internas do circuito do digitalizador. Figura abaixo:

Figura 37 – Representações através de circuitos elétricos da relação entre o campo elétrico sentido pela antena e a tensão de saída V_{out} . (a) Representação com o circuito equivalente de Thevenin para a antena. (b) Representação com o circuito equivalente de Norton para a antena.



Fonte: Adaptado de Rakov (2016).

A capacitância da antena e a capacitância dos circuitos de digitalização são geralmente muito menores que a capacitância do circuito integrador, com isso a corrente I será dividida entre o capacitor C e a resistência R_{in} . Logo, a equação só será válida para o caso em que $1/\omega C \ll R_{in}$, ou seja $f \gg 1/(2\pi R_{in}C)$, pois, para frequências mais baixas que $1/(2\pi R_{in}C)$ a impedância do capacitor integrador torna-se maior que a impedância do resistor R_{in} , assim, a corrente passa a fluir pelo resistor e o capacitor integrador perde sua função.

Assim sendo, os valores de C e R_{in} , são fundamentais para determinar a constante de tempo $\tau = CR_{in}$, que irá delimitar quais processos de uma descarga atmosférica poderão ser analisados.

Circuitos com constantes de tempo na ordem de 1s podem ser utilizados para investigar, por exemplo, líder escalonado e descargas de retorno seguidas por corrente contínua. Já para investigar somente os pulsos das descargas de retorno, as constantes de tempo na ordem de alguns mili segundos são suficientes (RAKOV, 2016).

É praticamente impossível construir um único sistema de medição, que tenha um alcance dinâmico suficiente para gravar todas as mudanças do campo elétrico causadas por uma descarga, pois grandes mudanças no campo elétrico são geralmente lentas, variando na escala de mili segundos ou mais, enquanto pequenas variações de campo são usualmente na escala de microssegundos.

A maior limitação para este tipo de medição é que ela não pode ser feita por longos períodos de tempo e não é muito sensível a variações lentas. Se a antena for exposta à uma função degrau de campo elétrico, sua saída irá responder proporcionalmente à variação desse campo, porém irá decair de forma diferente da constante de tempo (RC) do circuito integrador de entrada. Sensibilidades mais elevadas podem ser alcançadas com tempos de observação mais curtos. Existem também influências negativas, devido às tensões e correntes de *offset* e aos estágios de amplificação (WAHLIN, 1989).

5.1.1.2 Field Mill

Os *Field Mill* vieram para superar as limitações dos sensores explanados no item anterior. As limitações foram superadas com o uso de obturador aterrado para modular a indução de cargas na placa sensora, devido à um campo elétrico incidente. As cargas induzidas na superfície sensora, podem ser medidas utilizando os mesmos circuitos utilizados para medir os sinais oriundos das antenas *flat-plate*. O sinal alternado na saída dos eletrodos (ou placas sensoras) pode ser amplificado com detecção de fase para prover um sinal de saída com a mesma polaridade e intensidade proporcional ao campo incidente (RAKOV, 2016).

5.1.2 Cuidados com a calibração de sensores de campo elétrico

Os campos elétricos associados a raios são geralmente medidos com antenas capacitivas, incluindo as antenas *flat-plate*, e antenas *whip*. Como mencionado anteriormente, qualquer material metálico pode ser empregado para medição de campo elétrico, desde que a calibração do sistema não seja de importância ou necessária. Provavelmente, o tipo de antena mais comum para a medição de campo elétrico associado a raios, seja a antena *flat-plate*, ou antena de placas paralelas. A calibração desse tipo de antena, quando instalada ao nível do chão, pode ser realizada utilizando equações teóricas, ou através de experimentos em laboratórios de alta tensão (KARNAS et al., 2016). Para outros tipos de geometria, a calibração só é viável através de experimentos em laboratórios ou através da comparação direta com uma antena previamente calibrada (LEAL et al., 2017).

Para determinar o fator de calibração do sistema podemos reescrever a equação (27) da seguinte maneira:

$$E_z = \frac{V_{out} C}{A\epsilon_0} = kV_{out} \quad (28)$$

Onde denominamos K de fator de calibração, tendo em vista que o sistema de aquisição, no caso de um osciloscópio, entrega um valor de tensão (digitalizado) (V_{out}). Para o caso de um sistema que entregue apenas valores digitalizados, sem unidade, teremos:

$$E_z = \frac{V_{out} C}{A\epsilon_0} = kE_{du} \quad (29)$$

Onde E_{du} representa o valor do campo elétrico nas unidades do digitalizador em questão.

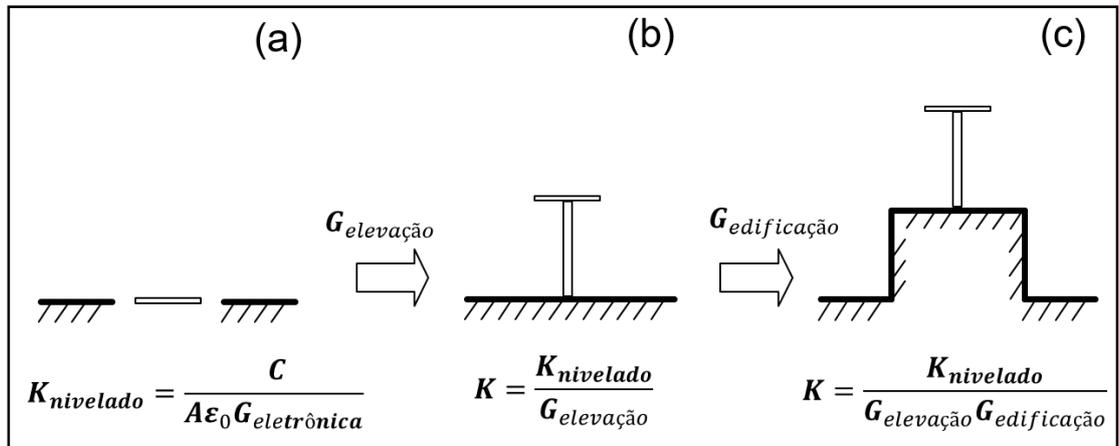
Para ambos os casos k será dado por:

$$k = \frac{C}{A\epsilon_0} \quad (30)$$

Porém, esta equação só será válida considerando a ausência dos ganhos devido aos componentes eletrônicos ($G_{eletrônica}$), à elevação da antena em relação ao chão ($G_{elevação}$) e à presença de uma edificação ($G_{edificação}$) no local de instalação do sensor.

Os três possíveis ganhos estão exemplificados de maneira sistemática na Figura 39:

Figura 39 –(a) Antena Flat-plate nivelada com o solo. (b) Antena *flat-plate* elevada. (c) Antena *flat-plate* elevada e no topo de uma edificação.



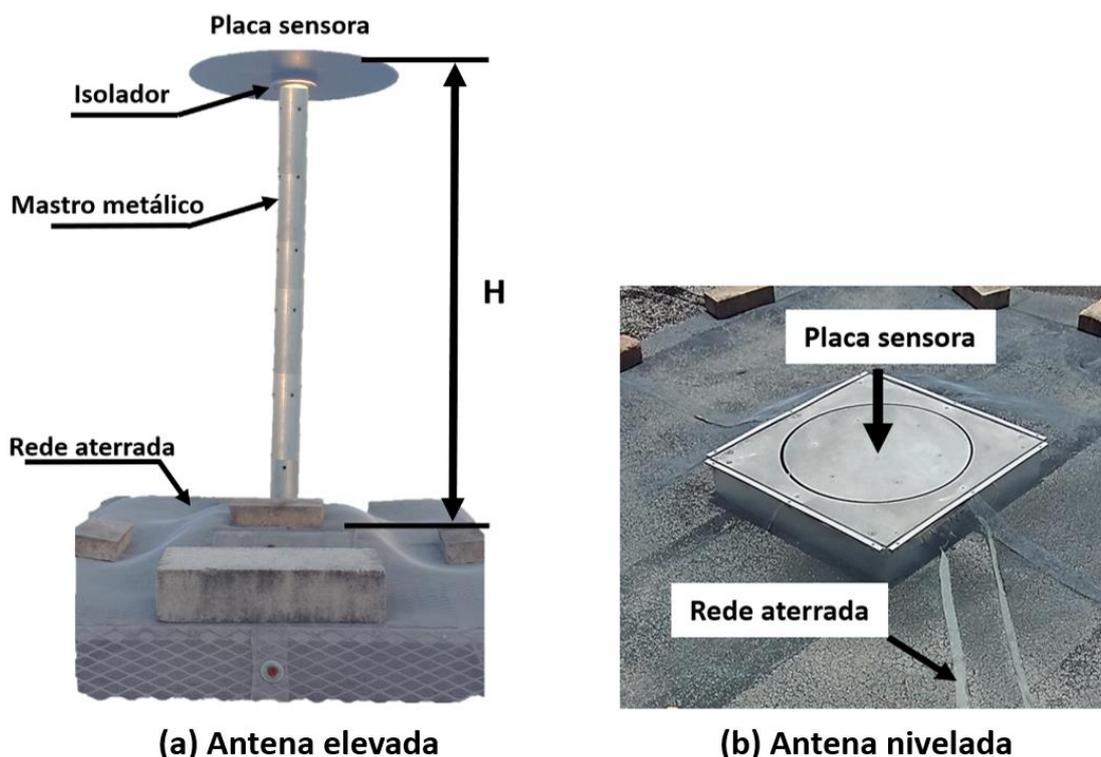
Fonte: Do autor.

Os ganhos devido aos componentes eletrônicos ($G_{eletrônica}$), podem exercer a função de aumentar ou diminuir o valor do sinal sentido pela antena. Esse ganho é importante para diminuir a relação sinal/ruído, bem como para aumentar ou diminuir a sensibilidade do sistema de medição. Considerando que o valor do campo elétrico é dependente da distância de medição, campos radiados a longas distâncias apresentam amplitudes pequenas, logo, necessitam de ganhos extras para melhor leitura dos sinais.

O ganho devido à elevação da antena em relação ao chão ($G_{elevação}$), está diretamente ligado a área de sensibilidade da antena A , e a exposição da antena ao campo elétrico. Nag (2010) utilizou algumas antenas *flat-plate* elevadas, instaladas nos altos (terraço) do “*New enginiring building - NEB*” na Universidade da Florida, para registro de campos elétricos associados a raios. Em seu experimento foi utilizado, uma antena *flat-plate* com área A de 0,156 m² e com uma elevação H de 1,71 m do nível do chão (Figura 40 (a)).

Através de comparação direta entre antenas de mesma geometria, Nag (2010) inferiu que o ganho devido à elevação da antena seria de 15,3. A antena nivelada ao chão, utilizada como padrão de referência, e a antena elevada, podem ser observadas na Figura 40.

Figura 40 –Diferentes topologias de antenas *flat-plate* utilizadas para medição de campo elétrico no LOG.
(a) Antena *flat-plate* elevada. (b) antena *flat-plate* nivelada com o chão.



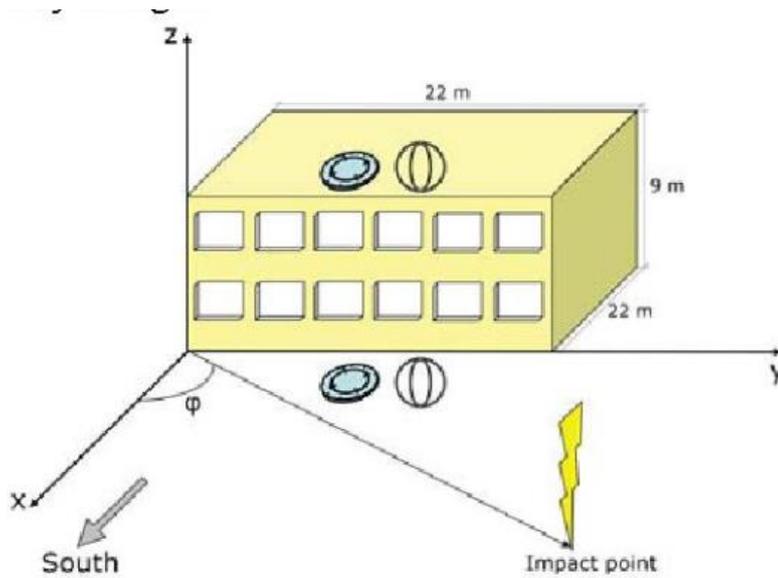
Fonte: Do autor.

Muitos pesquisadores observaram que campos elétricos gerados por um mesmo raio, quando medidos tanto ao nível do solo, quanto no topo de um prédio (utilizando um sistema de medição com as mesmas características) apresentavam valores diferentes de campo elétrico. (RUBINSTEIN; MONTANDON; IANOZ, 1994) e (MOSADDEGHI et al., 2007). Quando medido no topo de um prédio, o campo elétrico apresentava valores sempre superiores dos medidos ao nível do solo, esse aumento, ocasionado pela variação do local de instalação, denominamos de ganho devido a edificação ($G_{\text{edificação}}$).

Rubinstein, Montandon e Ianoz (1994) estimaram, através de experimentos (medições), que o valor do aumento na amplitude do campo elétrico devido a presença de um prédio de 17 (dezessete) andares, seria de aproximadamente 1,5.

De forma similar, Mosaddeghi et al. (2007) conduziram um experimento, onde realizaram medições simultâneas de campo elétrico e campo magnético, utilizando antenas *flat-plate* e antenas loop, instaladas no alto do prédio do laboratório de sistema de potência do Instituto Federal de Tecnologia Suíço, Lausanne (*Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland*), e ao nível do solo. Figura 41.

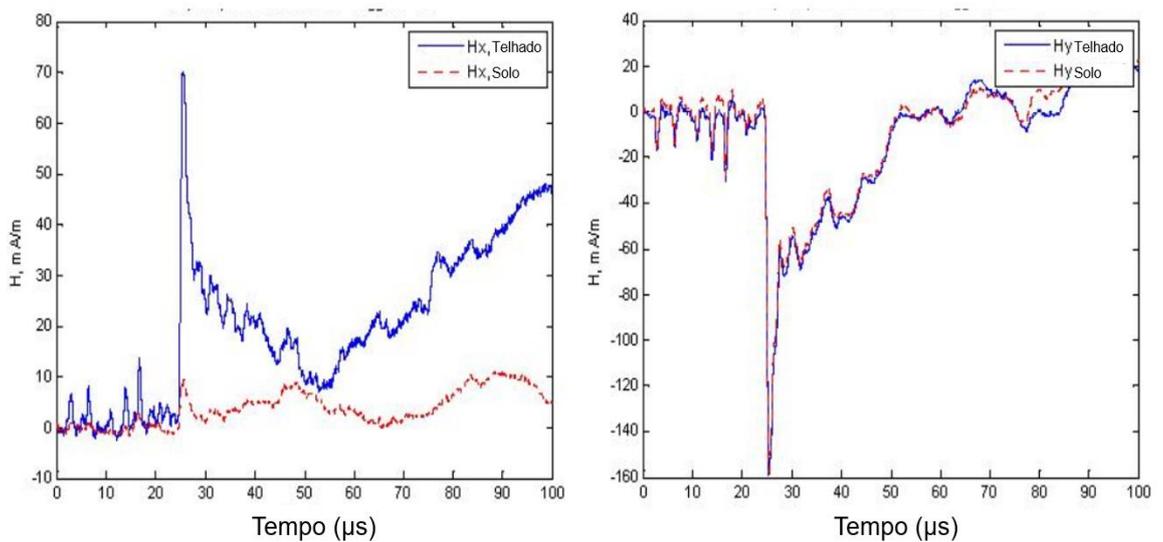
Figura 41 – Localização dos sensores no experimento de Mosaddeghi, et al (2007).



Fonte: Adaptado de Mosaddeghi et al. (2007).

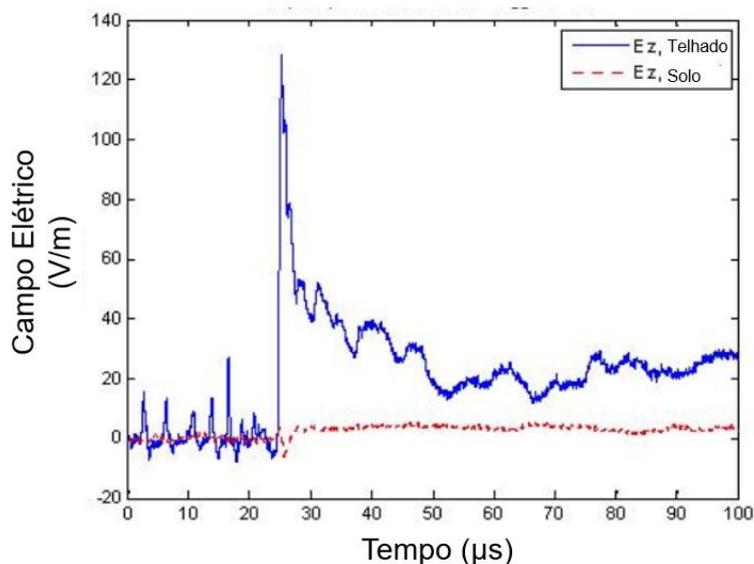
Nesse experimento, observou-se que as formas de onda do campo elétrico vertical e as formas de onda do campo magnético, medido pela antena perpendicular ao prédio, sofrem distorção. Os sinais medidos no topo do prédio apresentaram maior amplitude em relação às medições realizadas ao nível do solo.

Figura 42 –Registro das medições de campo magnético, sendo as linhas solidas azuis relativas aos campos medidos no topo do prédio e as linhas tracejadas vermelhas ao nível do solo.



Fonte: Adaptado de Mosaddeghi et al. (2007).

Figura 43 – Registro das medições de campo elétrico, sendo as linhas solidas azuis relativas aos campos medidos no topo do prédio e as linhas tracejadas vermelhas ao nível do solo.



Fonte: Adaptado de Mosaddeghi et al. (2007).

Para o prédio do laboratório de sistema de potência do Instituto Federal de Tecnologia Suíço, Mosaddeghi et al. (2007) identificaram um ganho devido a presença do prédio entre 1.7 e 1.9.

O ganho devido a edificação ($G_{\text{edificação}}$) pode ser também inferido de forma teórica, não somente através de experimentos. Baba e Rakov (2007) inferiram esse ganho ($G_{\text{edificação}}$) do “*New Engineering Building - NEB*” na Universidade da Florida, utilizando o método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) para a resolução das equações de Maxwell, e assim, encontraram os valores de E_z , no alto do prédio e ao nível do solo, devido a radiação eletromagnética gerada por raios. Neste trabalho os autores demonstraram através de simulações, que a componente E_z é altamente influenciada pela presença de um prédio, e que para medições ao nível do solo, realizadas a curtas distâncias do canal do raio, o prédio pode exercer um papel de “sombreamento” da radiação do campo elétrico. O mesmo não ocorre para raios detectados a longas distâncias.

Em ambos os trabalhos (BABA; RAKOV, 2007) e (MOSADDEGHI et al., 2007) foi demonstrado que a componente radial do campo magnético é minimamente influenciada pelo local de instalação dos sensores. Ou seja, a edificação no local de medição de campos eletromagnéticos radiados por raios irá influenciar somente as medidas da componente vertical do campo elétrico E_z , não afetando as medições de campo magnético. Isso é um fato que fez

com que sistemas de detecção e localização de raios atuais migrassem para a utilização de sensores magnéticos.

Após seguir os cuidados, apresentados acima, com a calibração de sensores de campo elétrico utilizados na pesquisa de raios, existe ainda uma metodologia de verificação, apresentada por Nag (2010), que pode revelar se ocorreu algum equívoco quanto aos procedimentos descritos anteriormente.

Para a realização dessa verificação é necessária a utilização de um sistema de medição de campo elétrico e campo magnético.

Para uma fonte vertical acima de uma superfície perfeitamente condutora, temos que a razão entre intensidade da componente vertical do campo elétrico E_z , e a intensidade da componente radial da densidade de fluxo magnético B_ϕ sobre essa superfície perfeitamente condutora, é dado por [e.g.,(BAUM, 2008)]:

$$\frac{E_z}{B_\phi} = c \cos \alpha \quad (31)$$

Onde c é a velocidade da luz no vácuo. Logo, conhecendo o valor de α , podemos verificar se existe proporcionalidade na equação.

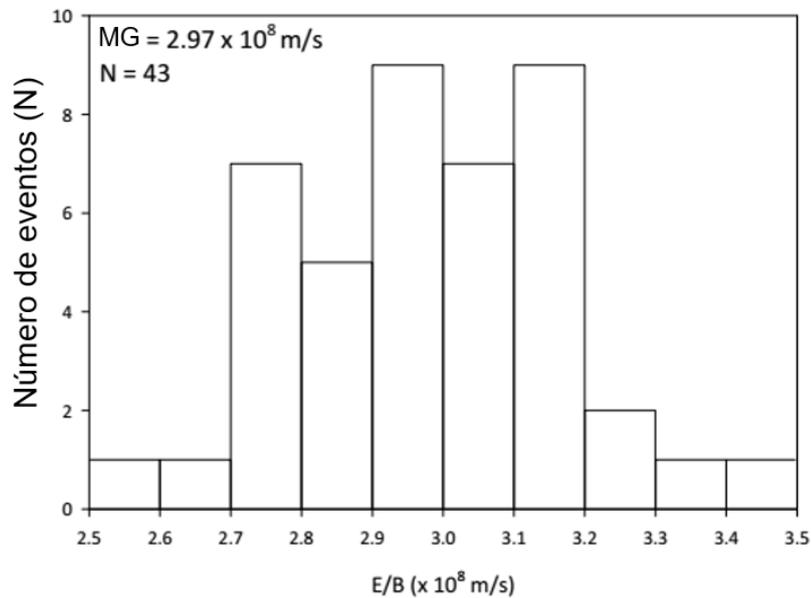
O pico do campo eletromagnético radiado por uma descarga de retorno é gerado por fontes que se encontram, geralmente a 100 m de altura do chão. Isso faz com que, para longas distâncias, o ângulo de incidência α , possa ser considerado 0, logo a equação (31) pode ser dada por:

$$\frac{E_z}{B_\phi} = c \quad (32)$$

Assim, temos que a razão E_z/B_ϕ deve assumir valores muito próximos da velocidade da luz.

A fim de verificar a calibração dos sensores elétricos e magnéticos instalados no LOG, Nag (2010), realizou medições de pico de campos elétricos e magnéticos para 43 descargas de retorno à distâncias de 8 a 63 km. O histograma da razão E_z/B_ϕ das medições pode ser observado na Figura 44.

Figura 44 –Histograma da razão do campo elétrico pelo campo magnético referente a 43 descargas de retorno registradas em 2008 em Gainesville, Florida. MG representa a Média Geométrica e N o número total de eventos.



Fonte: Adaptado de Nag (2010).

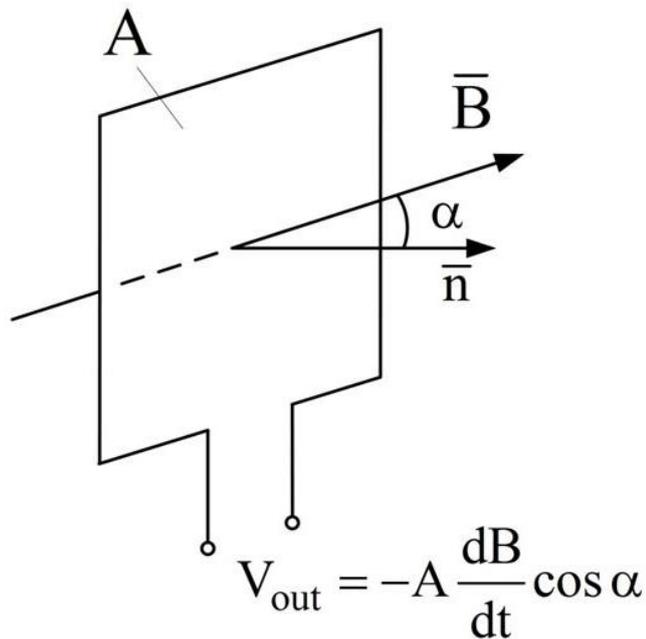
Nag (2010) observou que as 43 razões estavam entre mais ou menos 16% da velocidade da luz com uma média aritmética de 99% a velocidade da luz. Com isso, ele foi capaz de validar as aproximações teóricas e confirmar a calibração dos sistemas em operação no LOG.

5.1.3 Medição de campo magnético

Para medir campos magnéticos gerados por raios, um loop de fio metálico pode ser usado como antena. De acordo com a Lei de Faraday, um campo magnético variante no tempo, passando através de um loop com terminais abertos (Figura 45), irá induzir tensões nos terminais desse Loop, conhecido também como força eletromotriz. A tensão induzida nos terminais do Loop é proporcional à taxa da variação do fluxo magnético.

Assumindo que a área do loop A, é pequena o bastante para considerar que somente a componente normal do campo magnético incide na antena, teremos que $B_n = B \cos \alpha$, onde α é o ângulo formado pela normal à área do loop e o ângulo de incidência do campo magnético (ver Figura 45).

Figura 45 – Ilustração do princípio de operação de uma antena Loop.



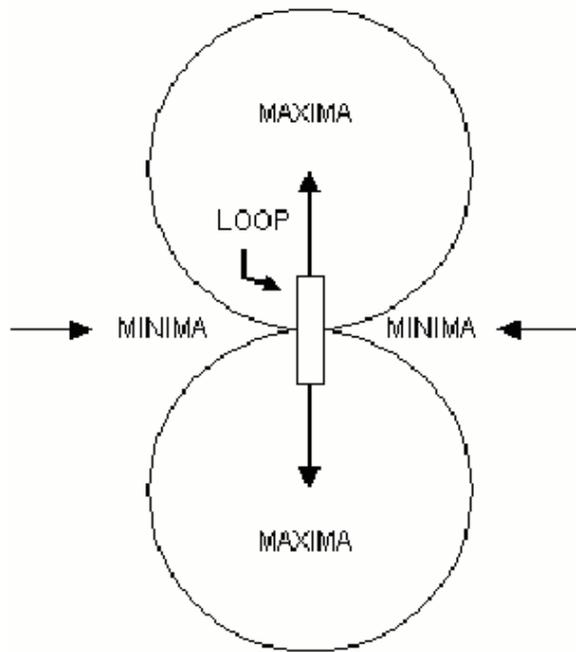
Fonte: Adaptado de Rakov (2016).

Se considerarmos o vetor densidade de fluxo magnético normal ao plano do loop, constante sobre toda a área do loop, temos a tensão induzida em seus terminais, em módulo, proporcional a área A , e a derivada do fluxo magnético sobre tempo, conforme equação abaixo:

$$V = A \frac{dB_n}{dt} \cos \alpha \quad (33)$$

Como podemos observar, a tensão induzida nos terminais de uma antena loop será máxima ao longo do plano do loop ($\alpha = 0^\circ$ e 90°) e nula perpendicular ao plano do loop. Logo, descargas atmosféricas que ocorrem perpendicularmente ao plano do loop da antena, não serão detectadas. A utilização de somente uma antena loop para detecção de raios, só é válida quando se sabe a direção de incidência (em raios induzidos ou em torres instrumentadas, por exemplo). Quando não se sabe a direção, utiliza-se duas antenas ortogonais, trabalhando de forma que uma possa cobrir o ponto cego da outra.

Figura 46 – Diagrama de Campo Bidimensional de um Antena *Loop*

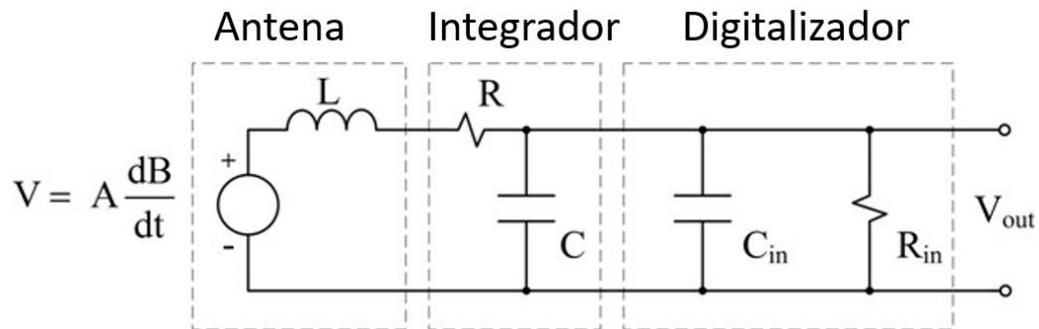


Fonte: Do autor.

Uma vez que a tensão de saída nos terminais da antena é proporcional à derivada do campo magnético, assim como na medição do campo elétrico, teremos que utilizar circuitos integradores para obter o campo magnético.

Um integrador passivo utilizado para medição de campo magnético é o circuito RC. Pode-se utilizar o equivalente de Thevenin da antena para analisar as condições em que o integrador irá operar, e levar em conta o circuito de entrada do digitalizador (Figura 47).

Figura 47 – Representação através de circuitos elétricos da relação entre a densidade de fluxo magnético sentido pela antena e a tensão de saída V_{out} . Sendo a antena representada pelo seu equivalente de Thevenin.



Fonte: Adaptado de Rakov (2016).

A tensão, que será efetivamente registrada por um circuito digitalizador, é dada por:

$$V = \frac{AB}{RC} \quad (34)$$

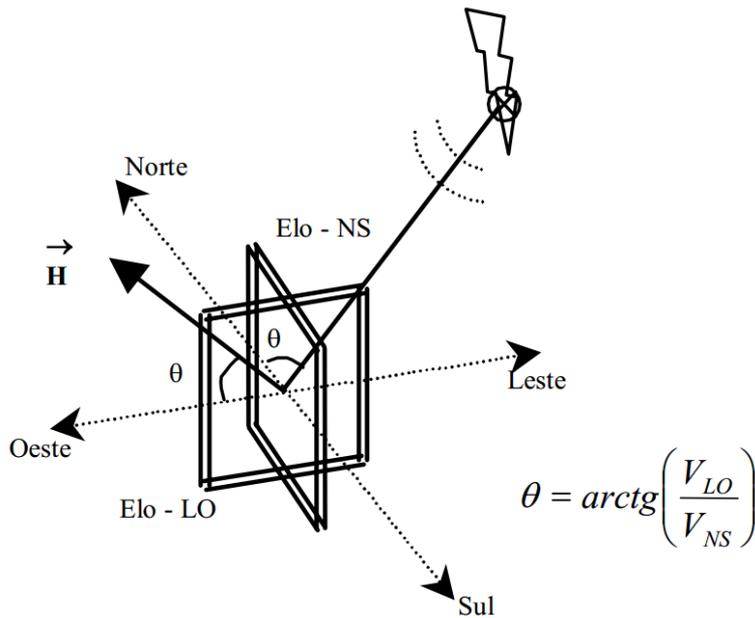
Porém, a equação (34), só será válida sob as seguintes condições:

- $R \gg 1/\omega C$ ($\omega \gg 1/(RC)$) ou seja, determina o limite da frequência inferior.
- $R \gg \omega L$ ($\omega \ll R/L$) ou seja, determina o limite da frequência superior
- $R_{in} \gg R$, é necessário para que C descarregue primeiramente em R e não em R_{in} .

5.2 Métodos de localização de raios

Os três principais métodos eletromagnéticos de localização de descargas atmosféricas por rádio frequência (RF) são indicação de direção (MDF - “*Magnetic Direction Finding*”), tempo de chegada (TOA - “*Time of Arrival*”) e Interferometria. Esses três métodos podem ser utilizados por sensores, que trabalham em um amplo intervalo de frequências, considerando que o raio é um sinal banda larga. Dependendo da frequência de funcionamento dos sensores, os métodos serão utilizados para localizar fontes pontuais ao longo do canal do raio, como é o caso da utilização do VHF (30 – 300 MHz). Logo, é possível reconstruir em três dimensões a estrutura do canal, ou podem ser utilizadas para simplesmente localizar o ponto de incidência de uma descarga no solo, utilizando VLF (3 – 30Khz).

Figura 48 –Antenas loop cruzadas. θ é o ângulo indicado pela razão entre as tensões induzidas pelo campo magnético H nas bobinas Leste-Oeste (VLO) e Norte-Sul (VNS)



Fonte: Adaptado de Mesquita (2006).

5.2.1 MDF

O método MDF (*Magnetic Direction Finding*), utiliza o campo magnético vertical emitido por uma descarga atmosférica para determinar sua localização, uma vez que o campo radial nessa condição (descarga atmosférica vertical) é nulo.

O sensor consiste em duas antenas loop cruzadas, que medem a densidade de fluxo magnético (B), ou seja, dois círculos verticais dispostos perpendicularmente um ao outro, um orientado da direção Norte-Sul e a outra em Leste-Oeste, conforme Figura 48. Esses loops ortogonais são utilizados para obter a direção da fonte emissora do pulso magnético, isso ocorre porque a tensão de saída de cada loop, de acordo com a Lei de Faraday, é proporcional ao cosseno do ângulo formado pelo vetor do campo magnético e à normal ao plano do loop. De modo geral, a razão entre os sinais de saída dos dois loops ortogonais, é proporcional à tangente formada entre o norte e a fonte do pulso magnético, com isso é possível a obtenção da direção da fonte emissora.

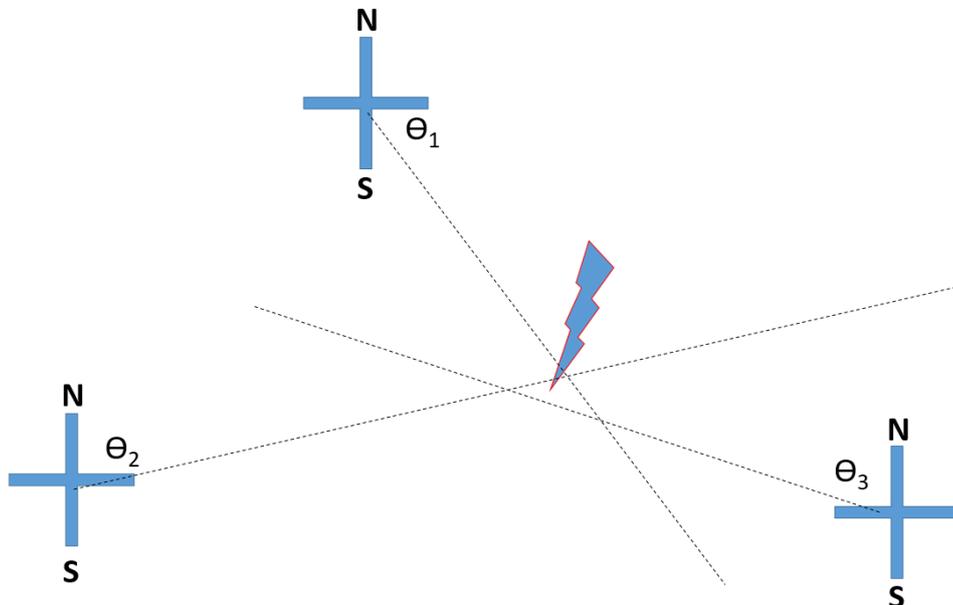
$$V_{LO} = A \frac{dB_n}{dt} \text{sen } \theta \quad (35)$$

$$V_{NS} = A \frac{dB_n}{dt} \cos \theta \quad (36)$$

$$\theta = \frac{A \frac{dB_n}{dt} \sin \theta}{A \frac{dB_n}{dt} \cos \theta} = \tan^{-1} \left(\frac{V_{LO}}{V_{NS}} \right) \quad (37)$$

Para, de fato, localizar a descarga atmosférica, são utilizados pelo menos dois pares de loops ortogonais e através da interseção formada pela direção de cada um, se obtém o local de incidência da descarga atmosférica.

Figura 49 –Determinação do local de incidência de um raio com três sensores MDF

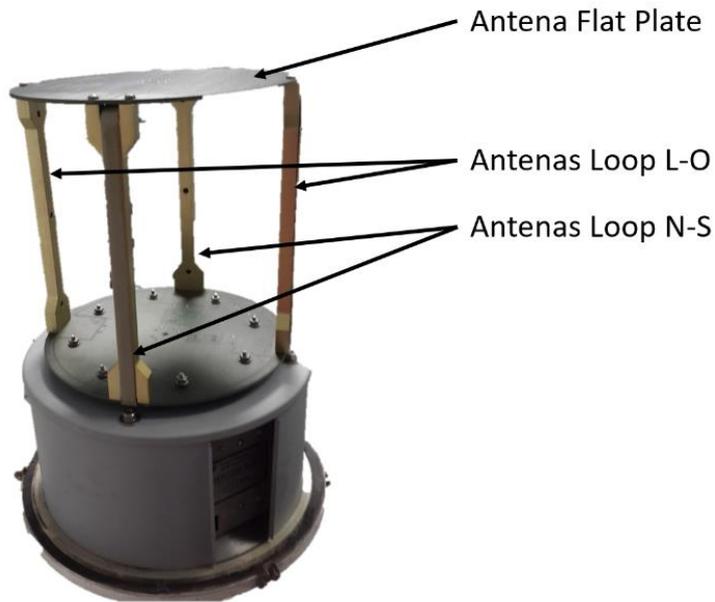


Fonte: Do autor..

Esse método é utilizado no intervalo de frequências que vai do VLF ao LF.

Para os receptores do tipo MDF, além das antenas *loop* para detecção do campo magnético, é também utilizada uma antena de campo elétrico do tipo *flat-plate*, a partir da qual a polaridade da corrente de descarga é determinada, bem como a ambiguidade de 180° na medição de azimute. Um sensor que utiliza esse método de localização e detecção de descargas é o *IMPACT*, ilustrado na Figura 50.

Figura 50 – Exemplo de antenas loop cruzadas fabricadas pela empresa *Global Atmospheric*, que ficou em operação nos altos da reitoria da UFPA. Sendo o primeiro sistema de localização e detecção de raios na região.

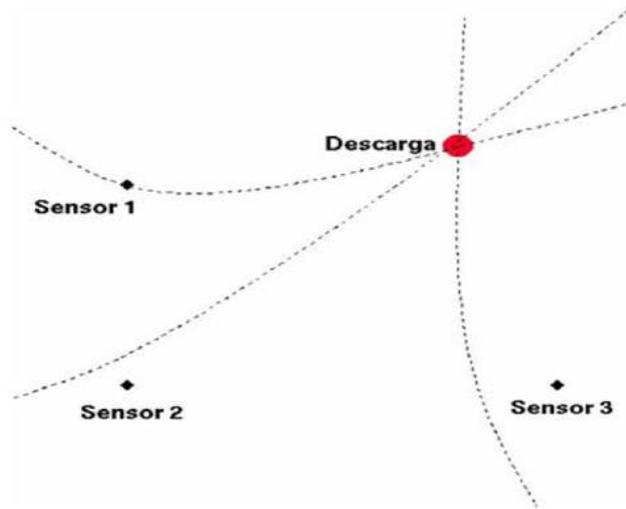


Fonte: Do autor.

5.2.2 TOA

A metodologia TOA foi desenvolvida no início dos anos 80 pela *Atlantic Scientific Corporation*, a qual mais tarde se uniu a *Global Atmospheric Inc.* Juntas, elas desenvolveram o sistema de detecção e mapeamento de descargas denominado, *Lightning Position and Tracking System* (LPATS), que utiliza a metodologia TOA. A metodologia TOA deve ser utilizada por uma rede de no mínimo três estações (MACGORMAN; RUST, 1998).

Figura 51 – Ilustração da localização de descargas atmosféricas utilizando o método TOA com 3 sensores.



Fonte: Adaptado de Miranda (2016).

Nesse método, cada sensor identifica o tempo de chegada da componente vertical do campo elétrico ou campo magnético radial (ondas de superfície) de uma descarga atmosférica. O princípio básico do TOA é o cálculo da diferença de tempo de chegada para cada par de sensores. Assumindo que a radiação eletromagnética se propaga na velocidade da luz (c), e a radiação leva determinado tempo (t_n) para atingir cada sensor (n), temos que a distância (r) entre cada sensor e a descarga atmosférica será:

$$r_1 = t_1 c \quad (38)$$

$$r_2 = t_2 c \quad (39)$$

$$r_3 = t_3 c \quad (40)$$

Considerando a Figura 51, na qual o sensor 1 foi o primeiro a registrar o pulso de radiação, as diferenças dos percursos percorridos pela radiação entre os sensores 1 e 2 (r_{12}) e os sensores 1 e 3 (r_{13}) são calculadas conforme as equações (41) e (42).

$$r_{12} = c(t_2 - t_1) \quad (41)$$

$$r_{13} = c(t_3 - t_1) \quad (42)$$

As diferenças do tempo de chegada entre cada par de sensores produzem um par de hipérbolas, onde a região sob as hipérbolas são os possíveis locais de ocorrência da descarga atmosférica.

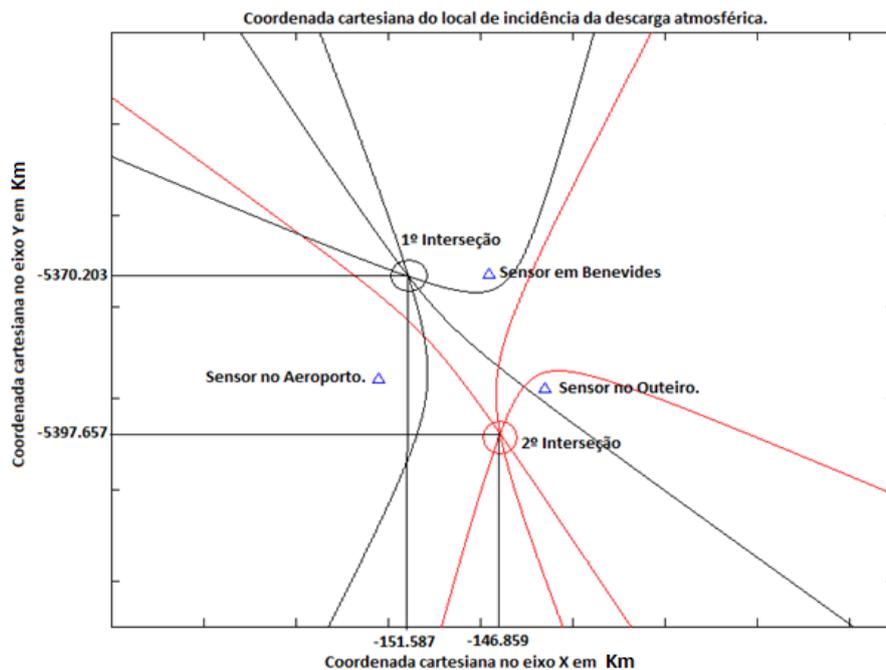
$$r_{12} = \sqrt{(x_1 - x_r)^2 + (y_1 - y_r)^2} - \sqrt{(x_2 - x_r)^2 + (y_2 - y_r)^2} \quad (43)$$

$$r_{13} = \sqrt{(x_1 - x_r)^2 + (y_1 - y_r)^2} - \sqrt{(x_3 - x_r)^2 + (y_3 - y_r)^2} \quad (44)$$

A interseção entre as duas hipérbolas é o ponto onde a descarga ocorreu. Essa interseção pode ser encontrada solucionando as equações (43) e (44), onde (x_r, y_r) é a coordenada do local de incidência do raio e (x_1, y_1) , (x_2, y_2) e (x_3, y_3) são as coordenadas dos sensores 1, 2 e 3.

Essas hipérbolas podem se interceptar em mais de um ponto, quando isso ocorre, é considerado o ponto de cruzamento mais próximo ao sensor que identificou a descarga, com o menor tempo, ou utiliza-se uma quarta estação, que servirá para encontrar outra hipérbole, a qual interceptará o ponto de localização do raio, evitando qualquer redundância (MIRANDA, 2016).

Figura 52 – Exemplo do uso do TOA em Belém-PA



Fonte: Adaptado de Miranda (2016).

5.2.3 Interferometria

Como mencionado anteriormente, descargas atmosféricas produzem diversos pulsos eletromagnéticos, os quais estão relacionados a diversos processos que ocorrem durante um raio. Sinais caóticos ou trem de pulsos produzidos por raios, são difíceis de se localizar por técnicas como TOA, devido à dificuldade de se identificar onde começam e onde terminam pulsos individuais. No método de interferometria não é necessário a identificação de pulsos individuais, pois nele é medida a diferença de fase entre dois sinais de banda estreita.

O método de interferometria mais simples, utilizado em localização de raios, consiste em duas antenas com um espaçamento de alguns metros entre elas, conectadas a filtros banda estreita. As antenas e os filtros devem ser idênticos. A saída dos filtros é então conectada a um detector de fase que gera uma tensão, proporcional à diferença de fase entre os dois sinais. Essa diferença de fase gera um plano no qual a fonte emissora está, ou seja, a direção da fonte. Para encontrar o ângulo de azimute e a elevação da fonte emissora, precisa-se de no mínimo três pares de antenas (LOJOU; MURPHY; HOLLE, 2008).

A maioria dos sistemas de interferometria trabalham em bandas muito estreitas dentro das faixas de VHF/UHF, isso permite que o sistema tenha grande sensibilidade em uma banda específica de operação. Por outro lado, isso faz com que o sistema fique mais sujeito às interferências locais. No Brasil, essas faixas de frequência são utilizadas principalmente nos sinais de TV digital e telefonia móvel.

Figura 53 –Exemplo de antenas utilizadas na técnica de interferometria para localização de raios



Fonte: Vaisala (2017).

6 METODOLOGIA

Neste capítulo é descrita a metodologia adotada para alcançar os objetivos desta tese. Foram identificadas três etapas específicas. A primeira etapa compreende a identificação dos parâmetros a serem otimizados e aprimorados em um sistema de detecção de descargas atmosféricas. A segunda consiste em elaborar meios para melhorar os parâmetros identificados na primeira etapa. A terceira etapa é constituída pelos procedimentos de validação dos dados obtidos com o sistema desenvolvido.

6.1 Identificação dos parâmetros a serem otimizados e aprimorados

Para a identificação dos parâmetros a serem otimizados e aprimorados, foi preciso analisar as principais características do sinal a ser medido/detectado e dos equipamentos utilizados na sua medição.

Para entender o sinal a ser medido (campo elétrico radiado por um raio), se fez necessário conhecer sua modelagem físico/matemática (Capítulo 3 desta tese) e o seu comportamento, de acordo com a distância de observação e com o tipo de evento detectado (Capítulo 4 desta Tese). Dentre as principais características deste sinal, pertinentes a sua detecção, destacam-se:

- A amplitude do sinal depende fortemente da distância de medição, (Ver equação 15);
- O sinal possui sua maior energia na faixa de VLF (3 a 30 kHz);
- O sinal pode se propagar por grandes distâncias através do guia de onda formado pela Terra e Ionosfera.

Considerando que a amplitude do campo elétrico varia com a distância de medição, eventos detectados a curtas distâncias têm valores de campo elétrico na faixa de alguns kV/m e eventos a longa distância apenas alguns V/m (RAKOV; UMAN, 2003). Além disso, segundo Rakov (2016), é praticamente impossível que um único sistema de medição seja capaz de cobrir todo o intervalo de variações de campo elétrico emitido por um raio. Logo, um dos pontos a serem otimizados é o intervalo de medição do sistema, pois um alto intervalo de detecção indica a possibilidade de um mesmo sistema detectar eventos próximos (a alguns km) e eventos distantes (acima de 100 km) com uma boa resolução.

Conforme descrito no capítulo 4, as descargas atmosféricas emitem radiação eletromagnética em um vasto espectro de frequências (sinal de banda larga), porém sua maior energia está centrada em aproximadamente 10 kHz. Essa parcela do sinal com maior energia, se propaga pelo guia de onda Terra-Ionosfera a longas distâncias, podendo ser detectada “teoricamente” em qualquer parte do globo terrestre.

O conhecimento dessa característica é empregado nos LLS. Os LLS que operam em uma faixa estreita por volta dos 10 Khz (VLF) são conhecidos como redes de detecção de longo alcance, e com poucos sensores podem cobrir todo o planeta. Porém, pelo fato de estarem registrando somente uma pequena parcela do espectro do sinal de interesse, muita informação é perdida. As redes que operam em VLF, apresentam baixa eficiência de detecção e muitas vezes não reportam informações importantes como polaridade e corrente de pico (NAG et al., 2015).

Por outro lado, redes que operam em uma banda relativamente mais larga LF/VLF (300 Hz a 400 kHz) tendem a ter seus sensores mais próximos entre si (entre 100 e 300 km) e, podem fornecer informações de pico de corrente, polaridade e até distinguir entre eventos intra-nuvem e nuvem-solo.

Tabela 4. Características da performance de diferentes tipos de redes de detecção de raios modernas, de acordo com sua respectiva banda de operação.

	Alcance	Eficiência de detecção		
		CG Stroke	CG Flash	IC Flash
Longo alcance (VLF)	Milhares de quilômetros	3-40%	10-70%	Menor que 10 %
Médio alcance (ELF-HF)	150-400 km	70-90%	Maior que 95%	40-50%
Curto alcance (ELF-HF)	50 - 75 km	Maior que 90%	Maior que 95%	75%
VHF mapeamento	10 - 40 Km	Detecção total de flashes maior que 95%		

Fonte: Adaptado de Nag et al. (2015).

Após identificar os prós e contras de cada banda de operação dos LLS, o próximo ponto que pode ser otimizado em um sistema de detecção é a possibilidade de escolha pelo operador do sistema sobre qual banda é mais adequada para a região onde o sensor está instalado, ou a possibilidade de registrar, de forma simultânea, duas bandas distintas, a fim de desenvolver estudos do comportamento de uma banda em relação a outra.

Geralmente, os equipamentos utilizados nas medições de campos elétricos devido a raios, para fins de pesquisa, são: as antenas capacitivas do tipo prato-plano (*flat-plate*); osciloscópio; módulo e; antena GPS [e.g., (RAKOV et al., 2014), (ESA et al., 2014)]. As antenas capacitivas do tipo *flat-plate* não são encontradas comercialmente, então os grupos de pesquisa necessitam fabricá-las, o que muitas vezes não é uma tarefa trivial, pois necessita de cortes precisos em chapas metálicas. Um terceiro item a ser otimizado é a utilização de uma antena capacitiva de fácil aquisição que proporcione medições compatíveis com as das antenas *flat-plate*.

Para digitalizar e registrar as formas de onda dos campos detectados pelas antenas de campo elétrico, centros de pesquisa utilizam osciloscópios. Esse equipamento é projetado para atender diferentes propósitos nos ramos das engenharias elétrica, eletrônica, de telecomunicações, dentre outras. Portanto, não é um equipamento específico para detecção de descargas atmosféricas, sua eletrônica é complexa e robusta, o que deixa seu valor de mercado bem elevado. Para determinadas aplicações em detecção de raios, muitas de suas funções são subutilizadas. Assim, um quarto item a ser otimizado seria o desenvolvimento de sistema de digitalização específico para detecção de raios, tornando o sistema mais econômico.

Os equipamentos citados acima (antenas *flat-plate*, osciloscópios e módulos GPS), funcionam de forma estacionária, ou seja, não são de fácil locomoção. Porém, os eventos atmosféricos, como as tempestades de raios, são dinâmicos e não se sabe o seu local de ocorrência com muita antecedência. Portanto, um sistema que seja “móvel” e de fácil instalação, se torna uma ferramenta importante para campanhas de medição esporádicas. A fim de otimizar o transporte de um sistema de detecção e registro de campos elétricos devidos a raios, o desenvolvimento de um sistema compacto e móvel se torna necessário.

Um ponto fundamental na análise de dados de descargas atmosféricas, é seu instante de ocorrência. Conforme mencionado no capítulo 5, o instante de ocorrência de um raio pode ser utilizado em algoritmos de localização. A informação temporal do evento é importante na comparação de eventos registrados por diferentes sistemas de medição. Logo, a otimização da identificação da estampa de tempo é importante para o sistema.

Por fim, pode-se resumir os itens identificados a serem otimizados em:

- Ampliação do *alcance* dinâmico de medição;
- Flexibilidade na largura de banda de detecção;
- Antena capacitiva de fácil aquisição;

- Sistema de digitalização especialista;
- Identificação temporal do evento detectado e;
- Sistema de fácil transporte e instalação (móvel);

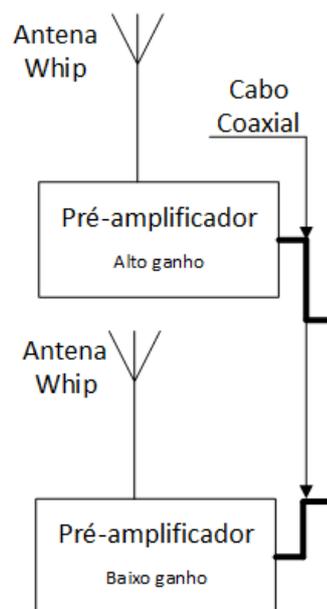
6.2 Meios de otimização

Este tópico apresenta os meios de otimização para cada item exposto no tópico anterior. Para atingir a otimização de cada item, foi necessário o desenvolvimento de pesquisas de hardware e software.

6.2.1 Ampliação do alcance dinâmico de medição

Para ampliar o alcance dinâmico de medição foi idealizada a utilização de duas antenas trabalhando de forma simultânea. Cada antena, que está conectada a um sistema de pré-amplificação, irá captar os sinais eletromagnéticos radiados por um raio com ganhos diferentes.

Figura 54 – Diagrama de blocos de duas antenas conectadas a pré-amplificadores com ganhos distintos.



Fonte: Do autor.

Ao receber os dois sinais com diferentes intensidades (ganhos), o sistema deve ser capaz de registrar o sinal que obtiver a melhor qualidade. A qualidade do sinal pode ser estabelecida com base na saturação do sinal detectado. Caso nenhum dos dois canais esteja saturado, o canal de alto ganho é registrado, caso o de alto ganho esteja saturado e o de baixo ganho não, registra-se o de baixo ganho, e no caso de os dois canais estarem saturados, também se registra o de baixo ganho. Esse procedimento foi implementado através de programação de microcontroladores e será abordado no capítulo 7.

6.2.2 Flexibilidade na largura de banda de detecção

Para flexibilizar quais faixas de frequências devem ser detectadas, foram utilizados filtros reprogramáveis. Os filtros reprogramáveis mais conhecidos são os filtros digitais. Um filtro digital é um filtro que processa sinais digitais. Utilizando um conversor analógico-digital (ADC), digitaliza-se o sinal a filtrar, em seguida esse sinal é processado por algum tipo de processador, onde está programado o filtro digital (MIDDLESTEAD, 2017). Os filtros digitais, demandam certa quantidade de processamento, que poderia ser utilizada para outros fins em um sistema de detecção de raios. Por isso, adotou-se um filtro programável menos usual, o filtro analógico programável baseado em circuitos a capacitores chaveados. Esse tipo de filtro analógico determina sua frequência de corte baseado na frequência de chaveamento dos arranjos de capacitores nos ramos de entrada e realimentação de um amplificador operacional (OpAmp) (COX; LIN; FLOREK, 1980), (KUTUK; SUNG-MO KANG, 1996), (MONTEIRO; PETRAGLIA; LEME, 2002). Mais detalhes do filtro implementado, serão fornecidos no capítulo 7.

6.2.3 Antena capacitiva de fácil aquisição

Conforme mencionado no capítulo 5 deste trabalho, qualquer elemento metálico pode ser utilizado para medição da variação do campo elétrico devido a uma descarga atmosférica. A fim de medir o campo elétrico devido a raios, com uma antena de mais fácil acesso, optou-se pela antena do tipo Telescópica, ou *Whip*. Essa antena é amplamente utilizada para receber sinais de TV aberta, sinais de Rádios AM e FM, dentre outros.

Por ser um tipo de antena utilizada em diversas aplicações, seu custo é reduzido e é facilmente encontrada em lojas especializadas em equipamentos eletrônicos. A Figura 55 apresenta o tipo de antena adotada para detecção do campo elétrico.

Se o sistema tiver o objetivo de inferir corrente de pico com os dados de campo elétrico coletados, esse tipo de antena deve ser calibrada de acordo com os procedimentos listados no Capítulo 5.

Figura 55 – Antena Telescópica com interfase BNC adotada como elemento sensor do sistema de detecção de raios.



Fonte: Do autor.

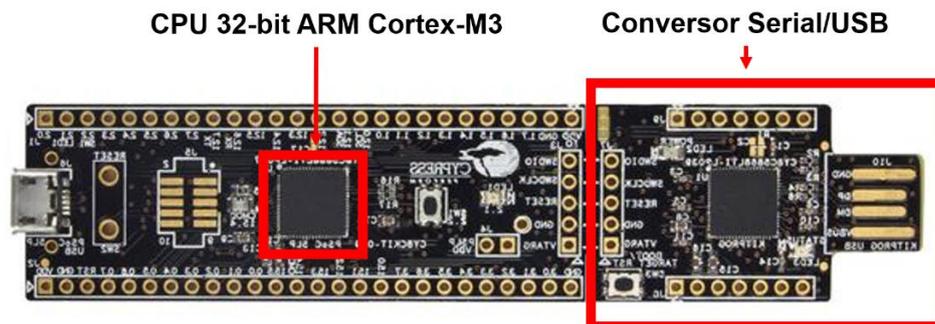
6.2.4 Sistema de digitalização especialista

O desenvolvimento de um sistema de digitalização, dedicado ao registro de formas de onda do campo elétrico gerado por raios, foi implementado em uma plataforma micro controlada. Os microcontroladores são uma ferramenta versátil no projeto de sistemas embarcados, pois neles já estão implementados importantes subsistemas como: conversores analógico/digital (ADC); blocos de memória RAM e flash; comunicação serial UART; pinos digitais de entrada e saída e; amplificadores operacionais, dentre outros (FOSSATI; ILSTAD, 2011), (AHRAM; KARWOWSKI; SOARES, 2012). Além disso, todos esses subsistemas já estão interconectados com um microprocessador, restando ao usuário final implementar diferentes algoritmos para a construção de um sistema maior.

Os microcontroladores podem ter seu preço inferior aos osciloscópios em aproximadamente 1000 vezes. Logo, o custo final do sistema a ser desenvolvido se torna reduzido. O microcontrolador utilizado foi o PSoC 5 (Figura 56). Dentre suas principais características pode-se destacar:

- 32-bit ARM Cortex-M3 CPU;
- 32 entradas de interrupção;
- 24 Canais de acesso direto à memória (direct memory access - DMA);
- 24-bit fixed-point digital filter processor (DFB);
- 20 Blocos de construção universal (Universal Building Blocks) e;
- Periféricos analógicos de precisão (Precise Analog Peripherals):
 - Amplificadores operacionais (OpAmps);
 - Amplificadores de ganho programável (PGAs);
 - Filtros;
 - Comparadores;
 - Conversores analógico/digital (ADC) SAR e Delta-Sigma.

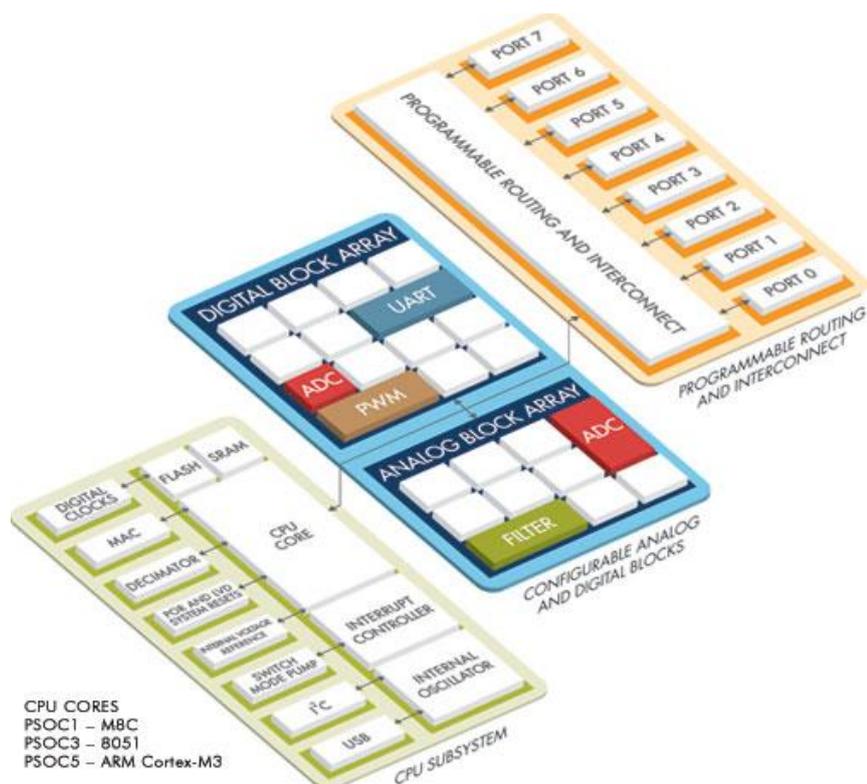
Figura 56 – Microcontrolador PSoC 5



Fonte: Do autor.

A arquitetura do PSoC é bastante versátil, ela está dividida em três partes: CPU; Arranjo de blocos analógicos e digitais e; Interconexões. Sua arquitetura está presente na Figura 57.

Figura 57 – Arquitetura do Microcontrolador PSoC 5



Fonte: Adaptado de Cypress (2018).

Utilizando o PSoC 5 como centro do sistema de digitalização, foram implementados algoritmos para utilização dos seus seguintes subsistemas:

- Amplificadores operacionais (OpAmps);
- ADC SAR de 10 bits e taxa de amostragem de 1 MHz;
- Buffer de memória;
- Relógio de tempo real - *Real time clock* (RTC);
- Sistema de comunicação Serial/Usb.

Mais detalhes do sistema de digitalização serão apresentado no capítulo 7.

6.2.5 Identificação temporal do evento detectado

Para identificar temporalmente o evento registrado, utilizaram-se dois componentes principais. O primeiro foi um relógio de tempo real (RTC) implementado com o microcontrolador e o segundo foi um módulo do Sistema de Posicionamento Global (GPS).

O RTC foi implementado internamente ao microcontrolador, utilizando os blocos digitais programáveis, além de algoritmos em linguagem C. Ele fornece data e hora com resolução temporal de 1 microsegundo. A fim de sincronizar o RTC com uma base de tempo universal, utilizou-se um módulo GPS de baixo custo.

O módulo GPS, modelo NEO-6 (Figura 58), fornece o tempo baseado em uma rede de satélites que circundam o planeta. O tempo fornecido pelo módulo é UTC (Universal Time Coordinated). O sincronismo entre o RTC e o módulo GPS é baseado no sinal de um pulso por segundo, (1pps) fornecido pelo módulo. Esse sinal, por sua vez, é sincronizado com os osciladores presentes em todos os satélites GPS, assim, independentemente da localização do módulo, ele sempre irá fornecer a mesma base de tempo para o sistema.

Figura 58 – Módulo GPS 6M



Fonte: Do autor.

6.2.6 Sistema de fácil transporte e instalação (móvel)

Conforme exposto nos subitens anteriores, foram adotados dispositivos leves e pequenos para compor o sistema de detecção e registro de raios. A antena, juntamente com o sistema de digitalização, e módulo GPS pesam menos de 500 g.

Além da antena, sistema de digitalização e módulo GPS, o sistema é constituído por um notebook, para armazenar os dados registrados, e por cabos coaxiais, para interligar os pré-amplificadores com o sistema de digitalização. Os equipamentos que compõem o sistema, cabem facilmente no interior de uma mochila, tornando esse sistema de fácil locomoção.

6.3 Validação dos dados registrados

Os delineamentos metodológicos, utilizados na validação dos dados registrados pelo sistema desenvolvido serão abordados neste item. Foram aplicadas duas metodologias para validação dos dados. A primeira se baseia na comparação direta entre os dados registrados pelo LDWSS, e por outro sistema já estabelecido no meio científico, e a segunda abordagem se baseia na análise dos dados registrados.

6.3.1 Primeiro método de validação

A primeira abordagem utilizada para validar os dados registrados, foi a comparação direta dos dados registrados pelo sistema desenvolvido, com os dados registrados por um outro sistema “tradicional”, já estabelecido no meio científico.

O sistema considerado como “referência” na comparação foi o sistema de medição de campo elétrico, pertencente ao Observatório de Raios em Gainesville, FL (*Lightning Observatory in Gainesville – LOG*). Esse observatório fica localizado nos altos do “*New engineering building – NEB*”, dentro do campus da Universidade da Florida- UF.

O LOG faz parte do Centro Internacional para Pesquisa e Teste com Raios (*International Center for Lightning Research and Testing - ICLRT*), que também inclui as instalações de *Camp Blanding (CB)*, onde são realizados diversos experimentos com raios induzidos. O LOG entrou em funcionamento em 2004 para, a princípio, a medição de campos eletromagnéticos produzidos por raios. O LOG é composto por uma cúpula de vidro com uma vista de 180° para o horizonte, dentro dessa cúpula estão localizados osciloscópios, computadores e câmeras de alta velocidade, e diversos outros sensores estão instalados nas proximidades da cúpula.

Os sensores que estão em funcionamento atualmente são:

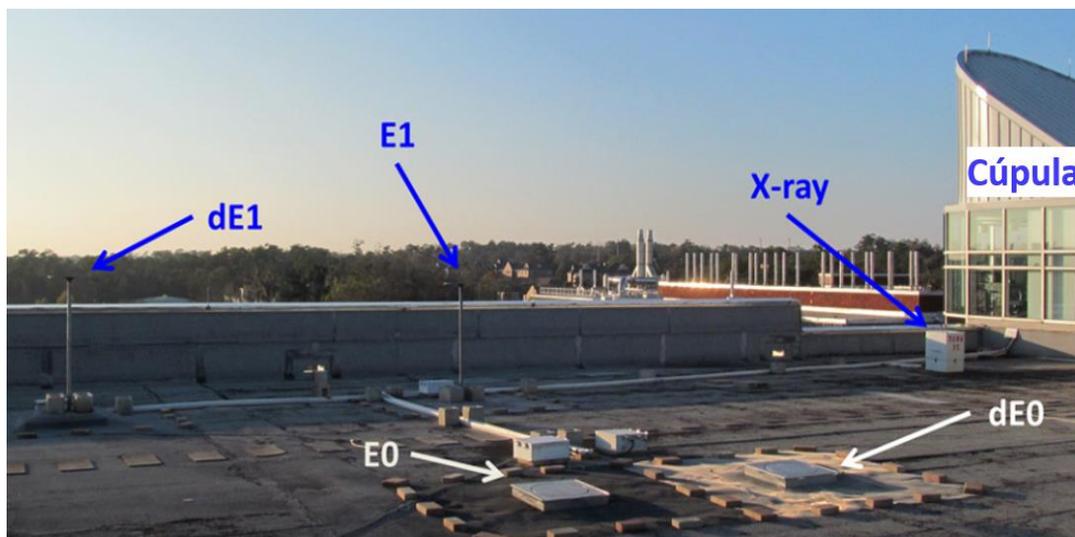
- Antenas de campo elétrico;
- Antenas de campo elétrico derivativo (dE/dt);
- Antenas de campo magnético derivativo (dB/dt);
- Detector de Raio X.

Os sinais de todos os sensores são transmitidos para os osciloscópios localizados no interior da cúpula, utilizando links de fibra-óptica a fim de diminuir as interferências

eletromagnéticas na medição. Além disso, todos os equipamentos externos à cúpula são alimentados por painéis fotovoltaicos, para reduzir o ruído causado pela rede elétrica em 60 Hz.

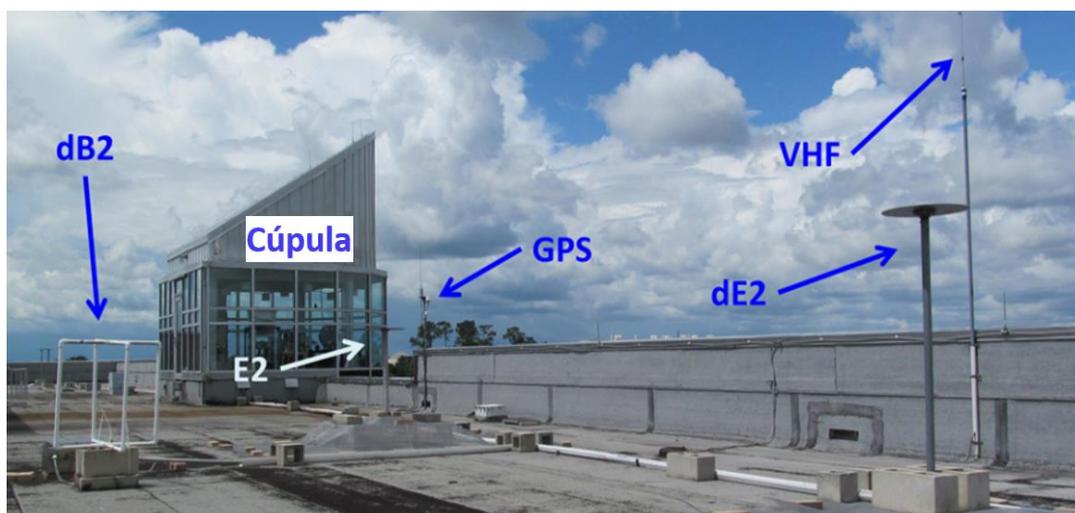
As Figuras 59 e 60 mostram a cúpula e os sensores instalados ao redor dela.

Figura 59 – Foto do Lightning Observatory in Gainesville – LOG 1



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

Figura 60 – Foto do Lightning Observatory in Gainesville – LOG 2



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

Todos os osciloscópios do LOG são sincronizados por um sistema GPS. Cada evento registrado, de cada sensor, recebe uma estampa de tempo sincronizada com o sistema GPS.

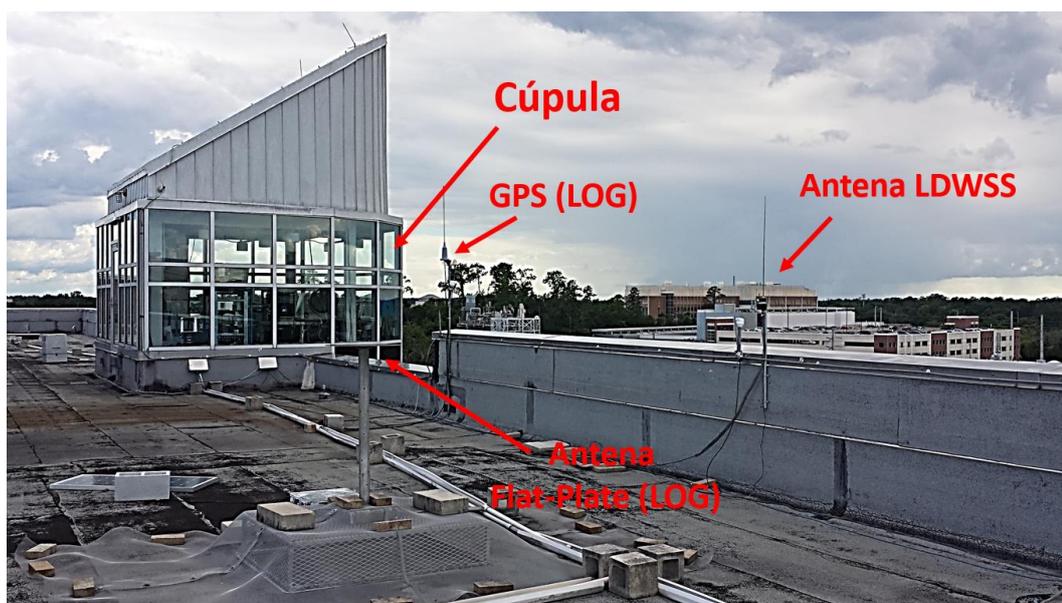
Dessa forma, é possível correlacionar os eventos registrados no LOG com os eventos registrados por outros sistemas, que também estejam sincronizados temporalmente por GPS.

O LDWSS foi instalado no LOG (Figura 61) e permaneceu em operação durante aproximadamente um ano, no período entre julho de 2016 a agosto de 2017.

As estampas de tempo dos campos elétricos registrados pelo LOG foram comparadas com as estampas registradas pelo LDWSS. Dessa forma, foi possível identificar um mesmo evento registrado pelos dois sistemas de medição de campo elétrico produzido por raios.

Essa metodologia foi aplicada a diversos eventos, a fim de validar os dados registrados pelo LDWSS. As figuras contendo a comparação direta das formas de onda registradas pelo LDWSS e pelo sistema de medição de campo elétrico do LOG estão presentes no item 7.6 desta tese.

Figura 61 – Foto de parte do Sistema desenvolvido instalado no LOG



Fonte: Do autor.

6.3.2 Segundo método de validação

A segunda abordagem utilizada para validar os dados registrados pelo LDWSS foi a utilização desses dados na investigação de diferentes aspectos da física dos raios e na publicação de trabalhos em congressos internacionais e revistas, a fim de instigar revisores a opinarem sobre o sistema e sobre os dados obtidos com ele.

Quando em operação no LOG, o sistema registrou mais de 40 mil eventos somente no mês de agosto de 2016. Utilizando a correlação temporal com dados da rede de detecção norte americana NLDN, uma grande quantidade de eventos pode ter sua localização, corrente de pico, polaridade e tipo identificados, podendo assim realizar diferentes análises.

Dentre as pesquisas realizadas utilizando dados do LDWSS, pode-se citar:

- Medição remota da corrente de pico de descargas atmosféricas;
- Investigação de CIDs;
- Comportamento dos sinais eletromagnéticos produzidos por raios em diferentes bandas de frequência;
- Interação dos campos eletromagnéticos produzidos por raios com a Ionosfera;
- Forma de onda padrão para os campos elétricos radiados por raios;
- Banco de dados de formas de onda de descargas atmosféricas;
- Investigação de eventos intra-nuvem de alta intensidade.

Essas pesquisas foram realizadas com dados do LDWSS, registrados em território Norte Americano e na Região Amazônica. Os resultados serão apresentados em detalhes nos capítulos 7 e 8 desta Tese.

Os principais trabalhos que utilizaram os dados do LDWSS e que já estão publicados, ou seja, aprovados por diversos revisores internacionais, estão listados abaixo:

- LEAL, A. F. R. et al. Microcontroller-based electric field measurement system with programmable pre-amplifier and filtering for use in the Amazon region. 2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA). Anais...2015;
- LEAL, A. F. R. et al. A Multiband Lightning Detector. ILPS 2016 - International Lightning Protection Symposium. Anais...Porto, Pt: 2016a;

- LEAL, A. F. R. et al. Lightning waveforms polarity analysis in different frequency bands detected simultaneously. International Colloquium on Lightning and Power Systems. Anais...BOLOGNA, IT: 2016b;
- LEAL, A. F. R. et al. A Low-Cost System for Measuring Lightning Electric Field Waveforms, its Calibration and Application to Remote Measurements of Currents. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. PP, n. 99, p. 1–9, 2017;
- LEAL, A. F. R.; RAKOV, V. A.; DA ROCHA, B. R. P. Classification of CIDs observed in Florida using the Lightning Detection and Waveform Storage System (LDWSS. 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA). Anais...Natal, Br: 2017;
- LEAL, A. F. R.; RAKOV, V. A.; ROCHA, B. R. P. Estimation of Ionospheric Reflection Heights Using CG and IC Lightning Electric Field Waveforms. 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA). Anais...2017;

7 SISTEMA DE DETECÇÃO E ARMAZENAMENTO DE FORMAS DE ONDA DE RAIOS “LIGHTNING DETECTION AND WAVEFORM STORAGE SYSTEM - (LDWSS)”

Neste capítulo será apresentado o projeto, concepção, testes e calibração de um sistema de detecção e registro de formas de onda associadas a campos eletromagnéticos irradiados por descargas atmosféricas. O sistema, a princípio, foi idealizado para ter seu funcionamento na Região Amazônica.

Atualmente, o sistema é denominado de “Sistema de detecção e armazenamento de formas de onda de raios” na literatura internacional ele é conhecido como “*Lightning Detection and Waveform Storage System*” (LDWSS). Foi apresentado pela primeira vez com essa denominação por Leal et al. (2015) e posteriormente por Leal et al. (2017). Contudo, a ideia de criar tal sistema ocorreu desde o desenvolvimento de um contador de raios apresentado por Leal e Rocha (2014). Desde então, os projetos foram sendo aperfeiçoados, e passaram por diversas etapas de prototipagem, bem como diversas etapas de desenvolvimento de hardware e software, até chegar ao atual nível do sistema.

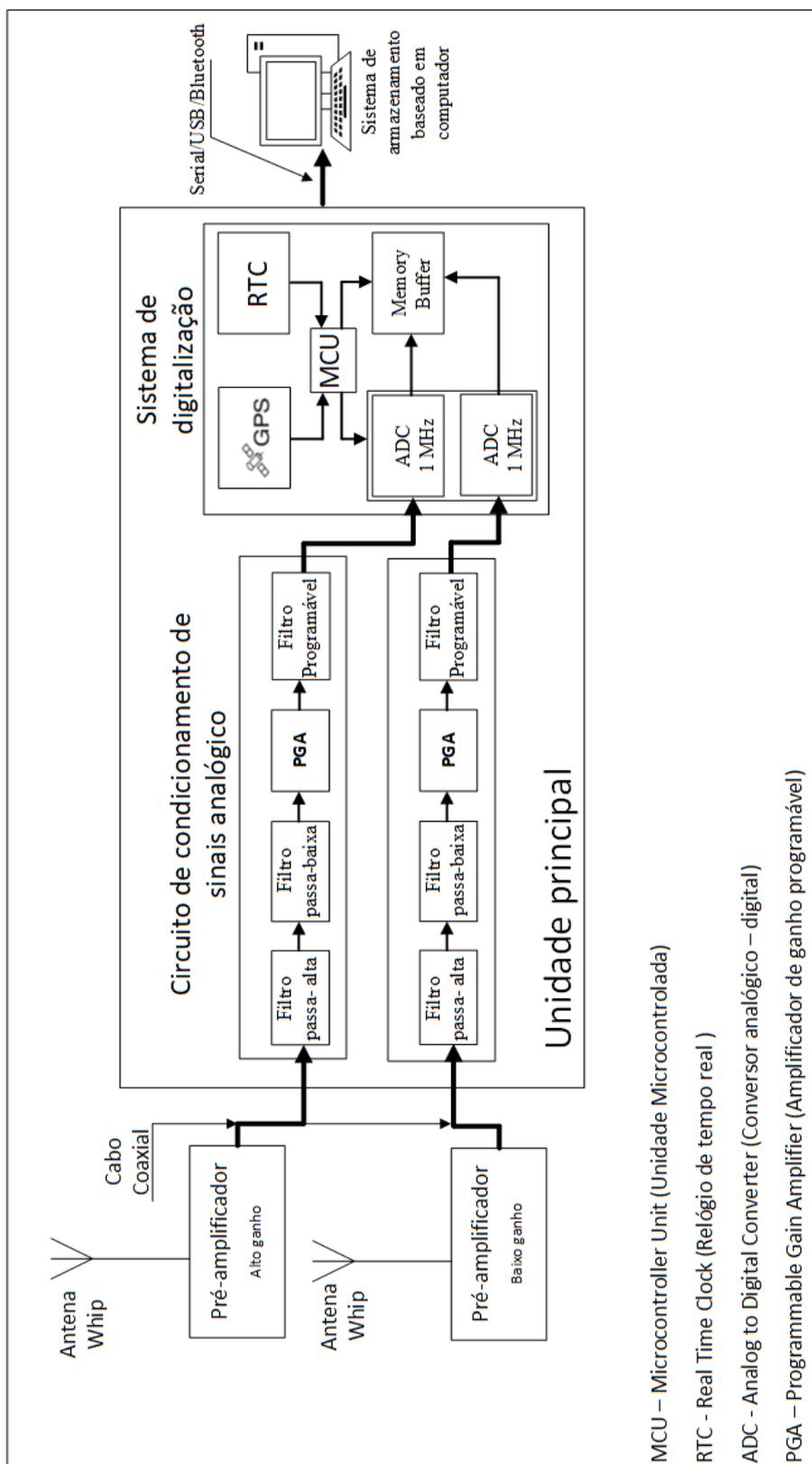
Conforme exposto no capítulo 6, existem pontos fracos nos sistemas de detecção de descargas atmosféricas em operação ao redor do globo. Analisando esses pontos, projetou-se e implementou-se maneiras de superá-los. No sistema proposto, por exemplo, somos capazes de registrar o mesmo evento em duas bandas de frequências distintas, e com isso analisar de forma mais abrangente uma determinada descarga atmosférica (LEAL et al., 2016).

Outro ponto aprimorado com o desenvolvimento do LDWSS, é a ampliação do alcance dinâmico de detecção, possibilitando detectar e armazenar formas de onda, de campos distantes e próximos radiados por descargas atmosféricas.

Neste capítulo, assim como no restante deste trabalho, vamos nos referir ao sistema pela sua sigla encontrada na literatura internacional “LDWSS”.

O diagrama de blocos do sistema concebido é apresentado na Figura 62.

Figura 62 –Diagrama de blocos do “Sistema de detecção e armazenamento de formas de onda de raios” na literatura internacional ele é conhecido como “*Lightning Detection and Waveform Storage System*” (LDWSS)

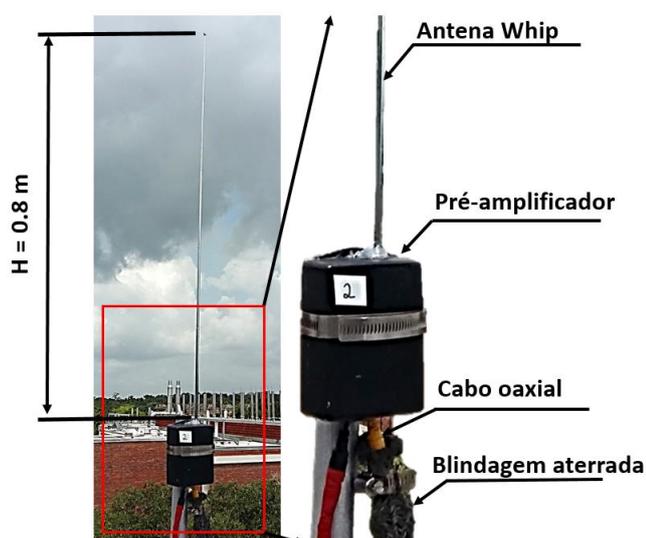


Fonte: Do autor.

7.1 Antena *whip* e pré-amplificador

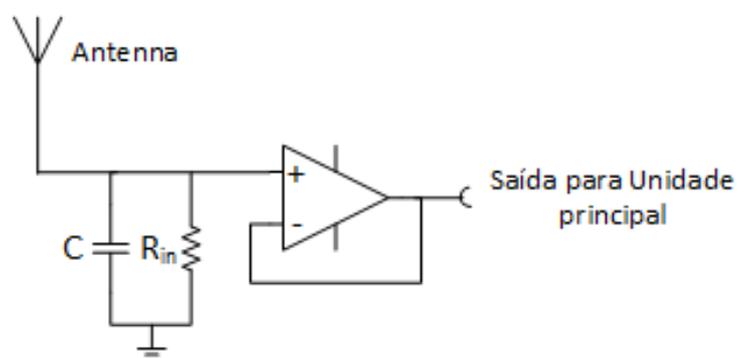
Para captar o campo elétrico radiado por um raio, o LDWSS utiliza uma antena *whip*, seguida por um circuito integrador passivo e um amplificador de baixo ruído com ganho unitário (Figura 63). A antena *whip* foi escolhida pelo seu baixo custo, fácil instalação, possibilidade de compactação e por ser de fácil acesso no mercado local.

Figura 63 –Antena *whip* e pré-amplificador do LDWSS instalado no LOG.



Fonte: Do autor.

Figura 64 –Esquema elétrico da antena e do pré-amplificador do LDWSS.



Fonte: Do autor.

Considerando a equação (27), e as dimensões fixas da antena, podemos controlar parte do ganho do sistema através do capacitor integrador. As variações de campo elétrico medidos devido a uma descarga atmosférica, podem variar de alguns V/m até alguns kV/m, dependendo de sua intensidade e da distância de medição do campo elétrico. Logo, foi projetado um sistema com dois canais, sendo um com alto ganho, para pequenas variações de campo elétrico, e outro com baixo ganho, principalmente para detecção de raios a curtas distâncias.

Outra função do capacitor integrador C , juntamente com R_{in} , é estabelecer a constante de tempo do sistema, ou seja, definir para quais frequências o integrador irá operar. Esse circuito RC limitará as baixas frequências. A equação para encontrar a frequência de corte é relacionada abaixo:

$$f_c = \frac{1}{2\pi CR_{in}} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (45)$$

Tanto o pré-amplificador de baixo ganho, quanto o de alto ganho, foram projetados para ter a mesma constante de tempo ($\tau = 1 \text{ ms}$). Aplicando a equação acima, conclui-se que o integrador irá atuar em frequências acima de 160 Hz, aproximadamente. Com isso, pode-se investigar uma grande gama de fenômenos, que ocorrem associados a descargas atmosféricas.

Nesse estágio do sistema, o limitador da frequência de corte superior é dado pelas características do amplificador operacional. Amplificadores operacionais com maior largura de banda irão proporcionar frequências de corte maiores. Durante os testes do LDWSS foram utilizados dois tipos de amplificadores operacionais, o primeiro é o OP27 que possui uma largura de banda de 8 Mhz, e o segundo é o OP37, com largura de banda de 63 MHz. Ambos possuem largura de banda bem superior que o filtro *anti-aliasing*, projetado para o circuito de condicionamento analógico de sinais.

7.2 Circuito de condicionamento de sinais analógicos

O sinal do pré-amplificador é transmitido para a unidade principal, onde encontra-se o estágio de condicionamento analógico de sinais, através de um cabo coaxial. O circuito de condicionamento analógico de sinais é composto primeiramente por um filtro passa-alta, com frequência de corte de 30Hz, para eliminação do nível DC do sinal. Em seguida temos um filtro passa-baixa com frequência de corte de 500 kHz, o qual tem a função *anti-aliasing*, ou seja,

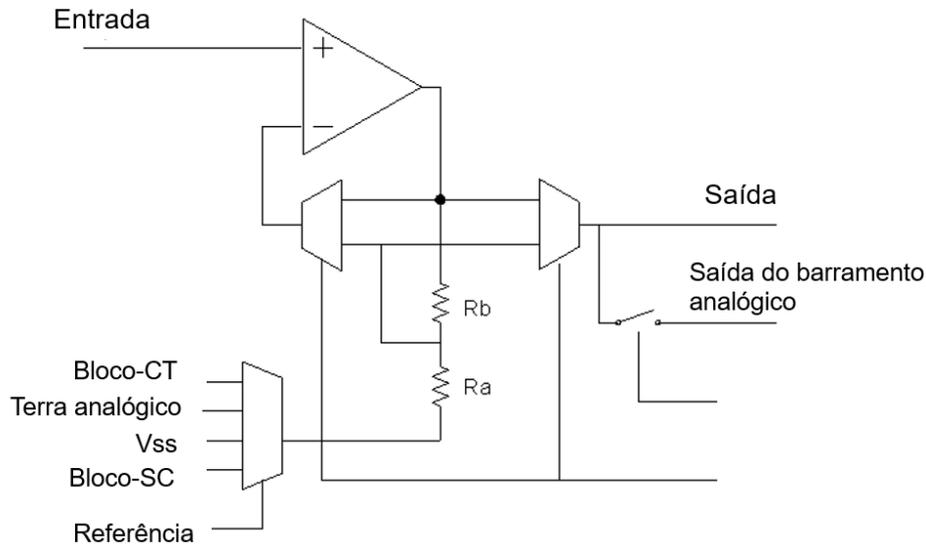
limita a maior frequência a ser “lida” pelo digitalizador baseado na taxa de digitalização (frequência de amostragem). O conversor analógico-digital (ADC) do LDWSS possui máxima frequência de amostragem de 1 MHz e, segundo o critério de Nyquist, para a recomposição de um sinal analógico devemos amostra-lo a pelo menos o dobro da maior frequência contida nesse sinal. O filtro *anti-aliasing* foi projetado para eliminar sinais com frequências acima de 500 Khz.

Após esses dois estágios de filtragem, o sinal segue para o amplificador de ganho programável e para o filtro programável, ambos implementados com o dispositivo PSoC 1. O PSoC surge como uma inovação no mercado, lançado pela empresa Cypress, une a tecnologia digital e analógica em um único dispositivo. O PSoC é um microcontrolador constituído por um conjunto de subsistemas em um único chip, que pode ser configurado para formar um sistema complexo. Nele existem módulos analógicos e digitais que possibilitam uma infinidade de configurações (SANTOS; NICOLSI, 2006). Esses módulos permitem concentrar grande parte do projeto dentro do dispositivo, diminuindo a necessidade de componentes externos e o tamanho da placa de circuito impresso. Além da praticidade dos dispositivos, o Psoc possui um ambiente de desenvolvimento inovador, chamado IDE-PSoC Designer, que é o primeiro software para configuração e programação do Psoc.

7.2.1 Amplificador de ganho programável (PGA)

Os estágios de amplificação são fundamentais em qualquer sistema para que se possa visualizar o sinal desejado em uma escala confortável. O PGA implementado no LDWSS, possui a capacidade de amplificar ou atenuar o sinal de sua entrada em até 48 vezes.

Figura 65 – Diagrama de blocos do PGA



Fonte: Do autor.

Esse amplificador é extremamente versátil. O terra pode ser referenciado para o terra analógico do circuito (mais usual), e para outros tipos de referências, dependendo da aplicação. O ganho desse amplificador pode ser programado de acordo com o arranjo de resistores no ramo de realimentação. A saída deste amplificador tem dois tipos de função de transferência, uma referente à ganhos maiores ou iguais a 1, e outra referente à ganhos menores que 1, ou seja, quando o amplificador estiver funcionando como atenuador.

$$V_o = (V_{IN} - V_{GND}) \cdot \left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) + V_{GND} \quad \text{para Ganho} \geq 1 \quad (46)$$

$$V_o = (V_{IN} - V_{GND}) \cdot \left(\frac{R_a}{R_a + R_b}\right) + V_{GND} \quad \text{para Ganho} < 1 \quad (47)$$

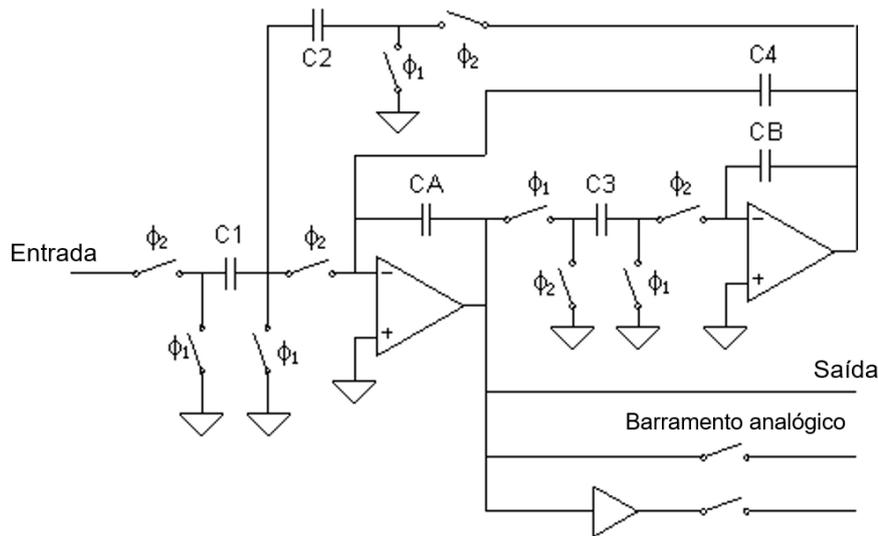
7.2.2 Filtro programável

Assim como o amplificador, o filtro é fundamental para o condicionamento de um sinal. Eles possibilitam a passagem do sinal de interesse e rejeitam os demais, que irão prejudicar a análise desse sinal.

O filtro programável utilizado foi um filtro baseado em circuito a capacitor chaveado, mesmo não sendo um filtro digital, possui alta programabilidade. Em filtros passa-faixa pode-

se alterar sua frequência central e largura de banda, através da mudança da frequência de chaveamento dos capacitores nos ramos de realimentação e de entrada. De forma análoga pode-se alterar a frequência de corte em filtros passa-baixa. O esquema do filtro pode ser visto na Figura 66.

Figura 66 –Diagrama filtro programável passa-faixa



Fonte: Do autor.

Conforme mencionado anteriormente, nesse tipo de filtro analógico programável a frequência de corte e a largura de banda são funções da frequência de chaveamento e da razão entre capacitores do ramo de realimentação e de entrada. Abaixo temos a função de transferência para o filtro apresentado na Figura 66.

$$\frac{V_{saida}}{V_{entrada}} = \frac{-\frac{C_1}{C_2} \frac{C_B}{C_3} \frac{S \left(1 + \frac{S}{2f_s}\right) f_s}{\left(\frac{C_A C_B}{C_2 C_3} - \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \frac{C_4}{C_2}\right)}}{s^2 + \frac{C_4}{C_2} \frac{S f_s}{\left(\frac{C_A C_B}{C_2 C_3} - \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \frac{C_4}{C_2}\right)} + \frac{C_B}{C_3} \frac{f_s^2}{\left(\frac{C_A C_B}{C_2 C_3} - \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \frac{C_4}{C_2}\right)}} \quad (48)$$

O projeto do filtro utilizado se dá de maneira simples, porém, existem algumas limitações quanto à frequência de corte e à amplitude do sinal de entrada. A configuração do filtro ocorre basicamente através da escolha das capacitâncias C1, C2, C3, C4, CA, CB, e principalmente da frequência de chaveamento. No LDWSS o filtro programável pode ser

facilmente desabilitado, assim, o sistema registrará o sinal banda larga (160 Hz – 500 Khz) da descarga atmosférica detectada.

7.3 Sistema de digitalização

O cérebro do sistema de digitalização é composto por uma CPU 32-bit ARM Cortex-M3 (Figura 56

Figura 56) que coordena as operações nessa parte do sistema. O sinal proveniente do circuito de condicionamento de sinais analógicos é digitalizado por um ADC com velocidade de amostragem de 1MHz, e, portanto, o sistema é capaz de digitalizar um sinal com uma resolução temporal de 1 μ s.

O sistema registra um evento com base no limiar da amplitude do sinal digitalizado, e caso seja detectada a ultrapassagem desse limiar, o sistema armazena (digitaliza) uma janela de 5 ms (5000 amostras) no buffer de memória. Para cada janela de 5 ms o sistema gera uma estampa de tempo, referente a última amostra digitalizada. A base de tempo do sistema é composta por um RTC (relógio de tempo real), que por sua vez é sincronizado por um módulo GPS. O módulo GPS gera um sinal periódico de 1 pulso por segundo (1pps), a CPU “lê” esse sinal e gera uma interrupção para realizar o sincronismo entre a base de tempo GPS e a base do RTC. Esse sincronismo ocorre a cada 1 minuto, podendo ser configurado para sincronizar a cada hora, dia ou semana. Quando o buffer de memória atinge o limite de cinco janelas, uma ação de transferência de dados é iniciada. O microcontrolador transfere os dados para um computador através de uma interface serial/USB. Durante o período de transferência dos dados para o computador, o sistema fica impossibilitado de registrar novos eventos, essa condição é denominada tempo morto (*dead time*).

7.4 Sistema de armazenamento baseado em computador

Na unidade de armazenamento (computador), existe um software escrito na linguagem *Python* para receber os dados. As amostras digitalizadas das formas de onda e as estampas de tempo, são armazenadas em arquivos distintos do tipo .txt. A linguagem *Python* foi escolhida por ser *opensource*, e também por ser uma linguagem de programação em expansão, com grande potencialidade para implementação de funcionalidades futuras.

O usuário deve apenas inicializar o aplicativo. Após iniciado, o programa salva automaticamente as formas de onda detectadas em arquivos “diários”. A cada dia é gerado um novo arquivo para os eventos detectados. Caso não exista registro de eventos em um determinado dia, não é gerado o arquivo .txt para esse dia específico.

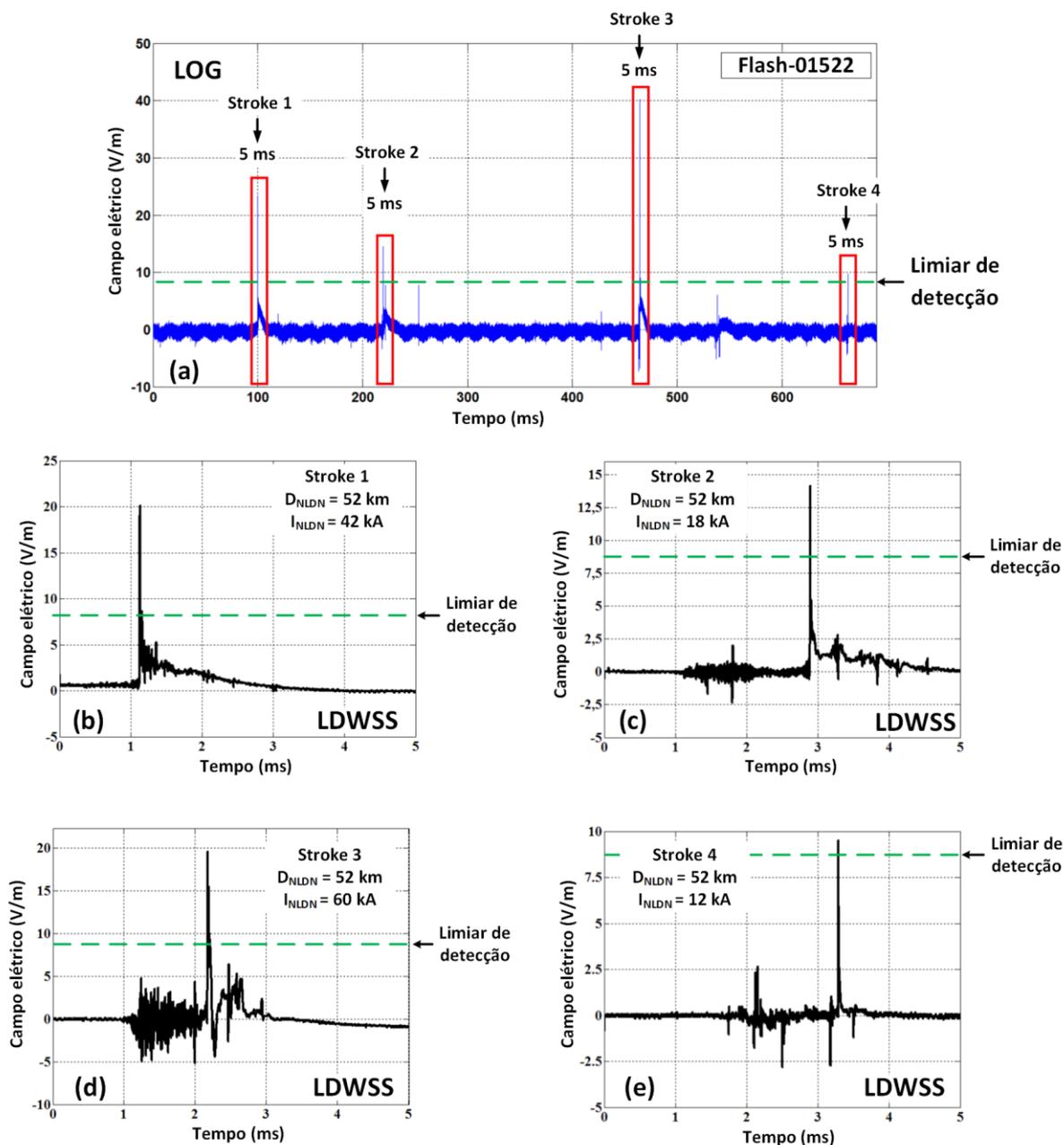
7.5 Modos de funcionamento

7.5.1 Canal único

Neste modo de operação um dos canais fica desabilitado, podendo ser tanto o de alto ganho quanto o de baixo ganho. Com isso, o sistema tem a capacidade de armazenar no máximo cinco janelas de 5 ms cada, sem tempo morto entre elas. Esse procedimento de armazenar janelas de 5 ms otimiza o uso da memória do microcontrolador e também o tamanho do arquivo digital das formas de onda.

Armazenando somente intervalos onde ocorrem, de fato, variações de campo elétrico, evita-se o armazenamento desnecessário de informação – por exemplo, quando não existe variação de campo entre descargas de retorno subsequentes. Uma comparação de um raio contendo quatro descargas de retorno (com registro contínuo, registrado pelo sistema de medição do LOG) e as respectivas descargas de retorno nas janelas de 5 ms, são apresentadas na Figura 67.

Figura 67 – Exemplo de um flash contendo 4 descargas de retorno, sendo que o painel superior apresenta seu registro contínuo pelo sistema de medição de campo elétrico no LOG e o painel inferior as mesmas descargas de retorno registradas pelo LDWSS.



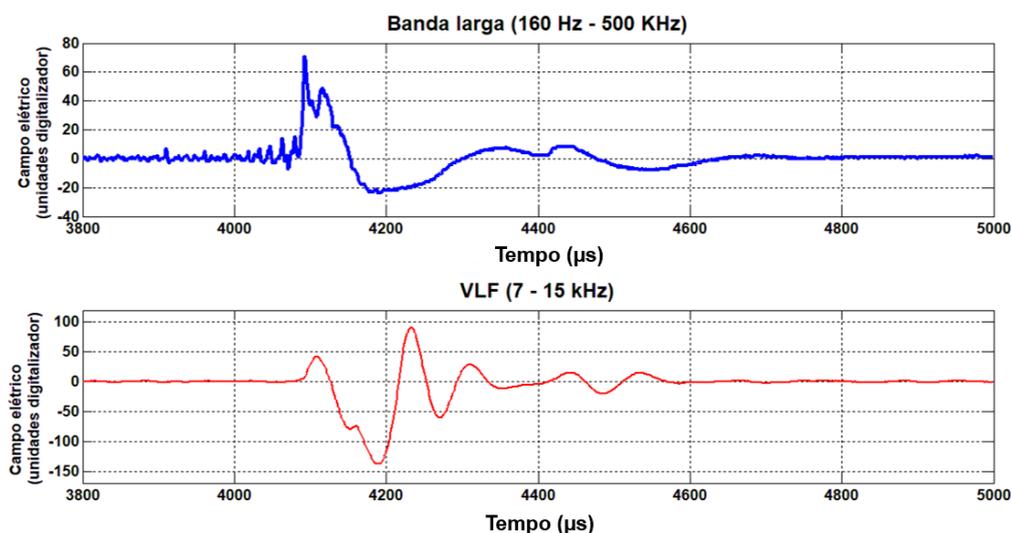
Fonte: Do autor.

7.5.2 Banda dupla

Neste modo de funcionamento, um dos pré-amplificadores é desabilitado. O sinal de um pré-amplificador é roteado aos dois canais do circuito de condicionamento de sinais analógicos.

Cada canal tem a flexibilidade de determinar qual banda de frequência será digitalizada. Por exemplo, um canal deixa passar a “banda larga” 160 – 500KHz e o outro a banda VLF (7 – 14 KHz).

Figura 68 – Exemplo de uma mesma descarga de retorno registrada em duas bandas de frequência distintas.



Fonte: Do autor.

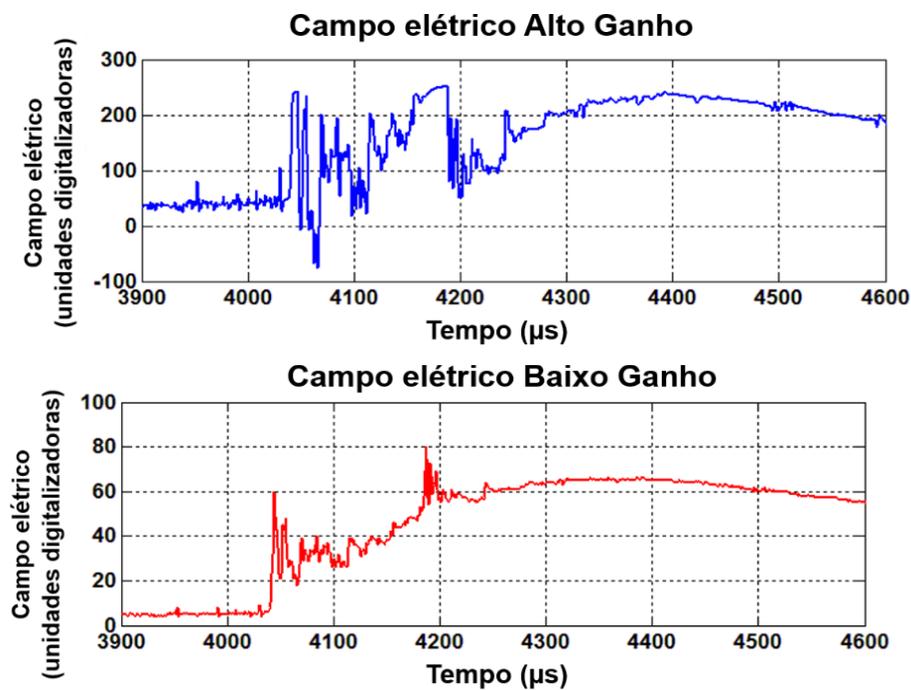
Para esse modo, são digitalizadas de cada vez duas janelas de 5 ms e no máximo dois pares, sem tempo morto entre elas.

7.5.3 Alcance dinâmico

Neste modo de operação, o LDWSS digitaliza simultaneamente os dois canais (alto e baixo ganho), porém armazenará somente o canal que apresentar melhor “qualidade” do sinal. Por exemplo, se o canal de alto ganho estiver saturado, o sistema armazena somente o canal de baixo ganho.

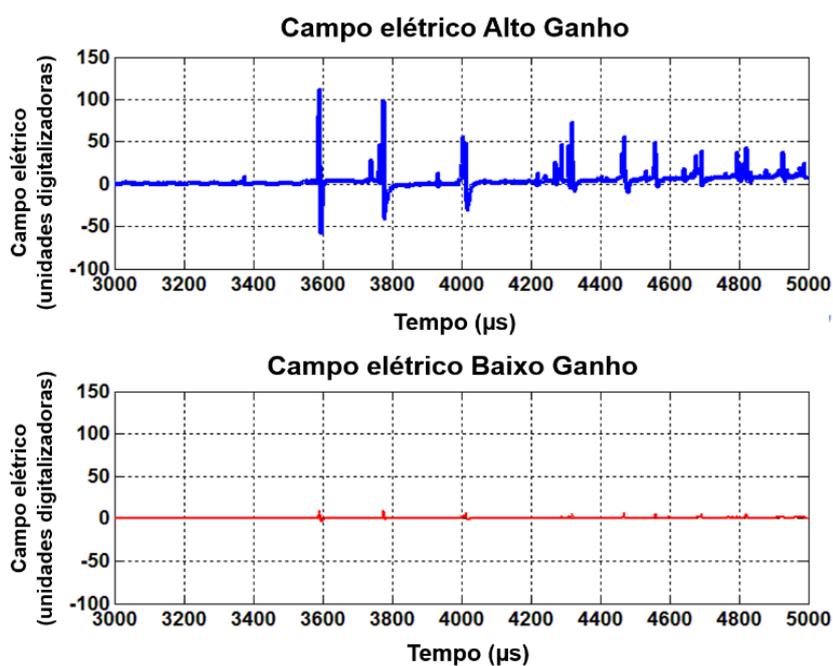
Com isso, conseguimos ampliar o alcance dinâmico do sistema, podendo registrar eventos a curtas distâncias, onde a intensidade de campo elétrico é bastante elevada e satura facilmente o pré-amplificador de alto ganho. Outra vantagem é a possibilidade de registrar os eventos de maior intensidade, juntamente com os de menor, com a mesma qualidade de sinal. Um exemplo, são os pulsos de colapsos preliminares, que muitas vezes apresentam baixa amplitude em relação a descarga de retorno.

Figura 69 – Exemplo de uma mesma descarga de retorno registrada pelo sistema de alto ganho, e apresentando saturação e distorção, e registrada pelo sistema de baixo ganho apresentando a forma real do sinal.



Fonte: Do autor.

Figura 70 – Exemplo do registro de pulsos de colapsos preliminares registrados pelo sistema de alto e baixo ganho simultaneamente.



Fonte: Do autor.

7.6 Calibração do LDWSS

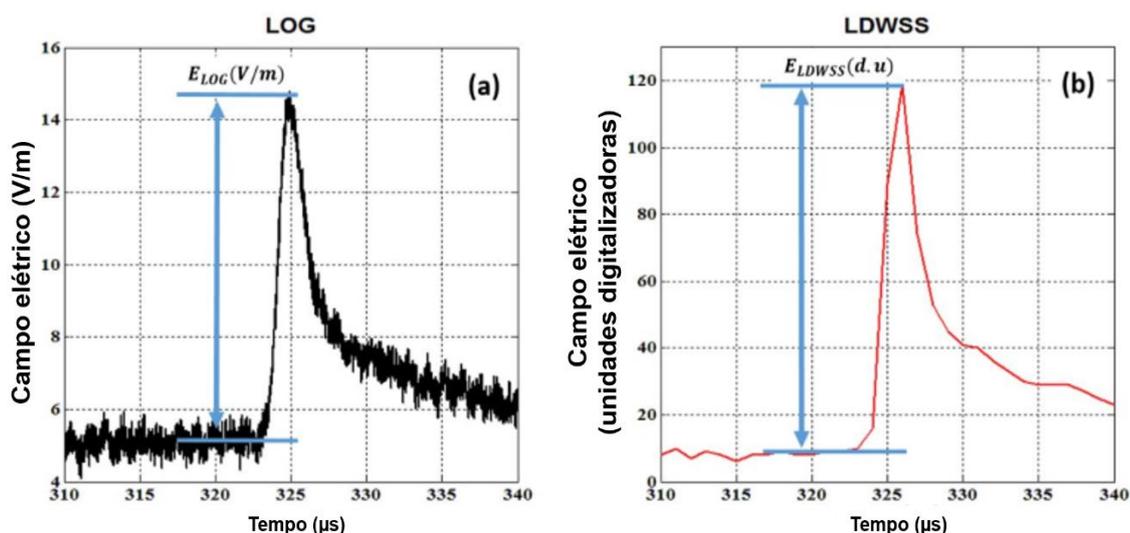
A fim de obter o fator de calibração do LDWSS, utilizou-se um sistema de referência, para comparação direta entre os valores de campo elétrico medidos. O sistema escolhido como referência foi o instalado no LOG, pois é um sistema que foi calibrado previamente por todas as metodologias abordadas no capítulo 5, e seus dados já foram amplamente utilizados em diversos trabalhos científicos, demonstrando seu alto grau de confiabilidade.

A comparação direta das formas de onda se deu a partir do registro de trinta e cinco formas de onda de descargas de retorno, sendo quatorze primeiras descargas e vinte e uma subsequentes. Além das descargas de retorno, utilizou-se dois trens de pulsos de colapsos preliminares (PB), para efetuar a calibração.

Ambos os sistemas estavam instalados nos altos do “*New Engineering Building*”, na Universidade da Florida. Todos os eventos foram registrados no dia 29 de agosto de 2016.

Dentre as descargas de retorno, nove apresentaram saturação. Logo, foram utilizadas apenas vinte e seis para a comparação direta. A comparação se deu a partir da medida do pico inicial do campo elétrico em ambos os sistemas, sendo o sistema do LOG em V/m e o LDWSS em unidades do digitalizador- u.d, conforme Figura 71.

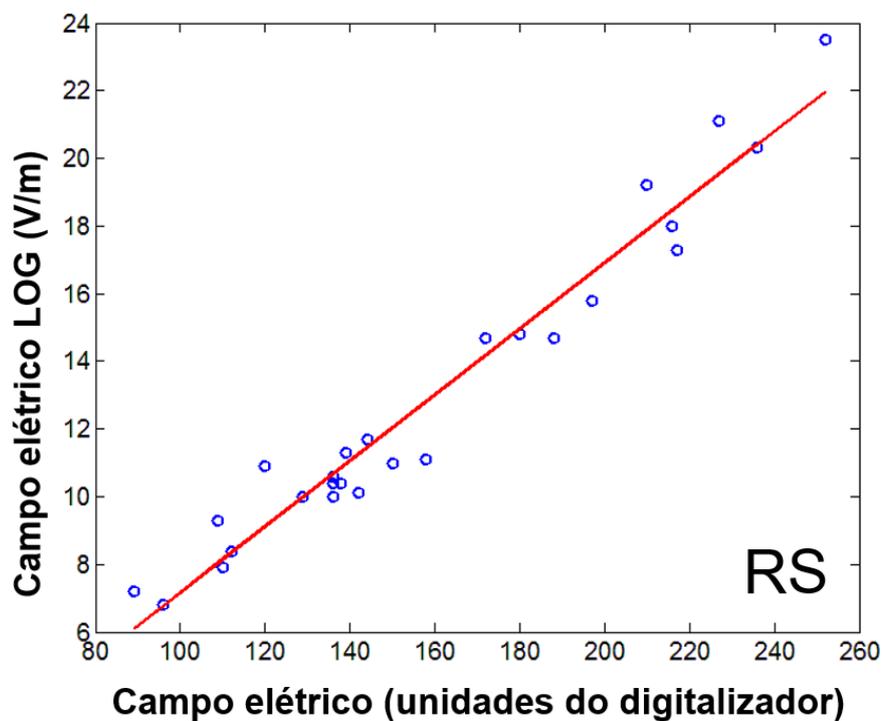
Figura 71 – Formas de onda (inicial) do campo elétrico gerado pela mesma descarga de retorno e registrada pelo LOG (a) e pelo LDWSS (b).



Fonte: Do autor.

O coeficiente de correlação encontrado foi maior que 0.98. O gráfico de dispersão das medidas é apresentado na Figura 72.

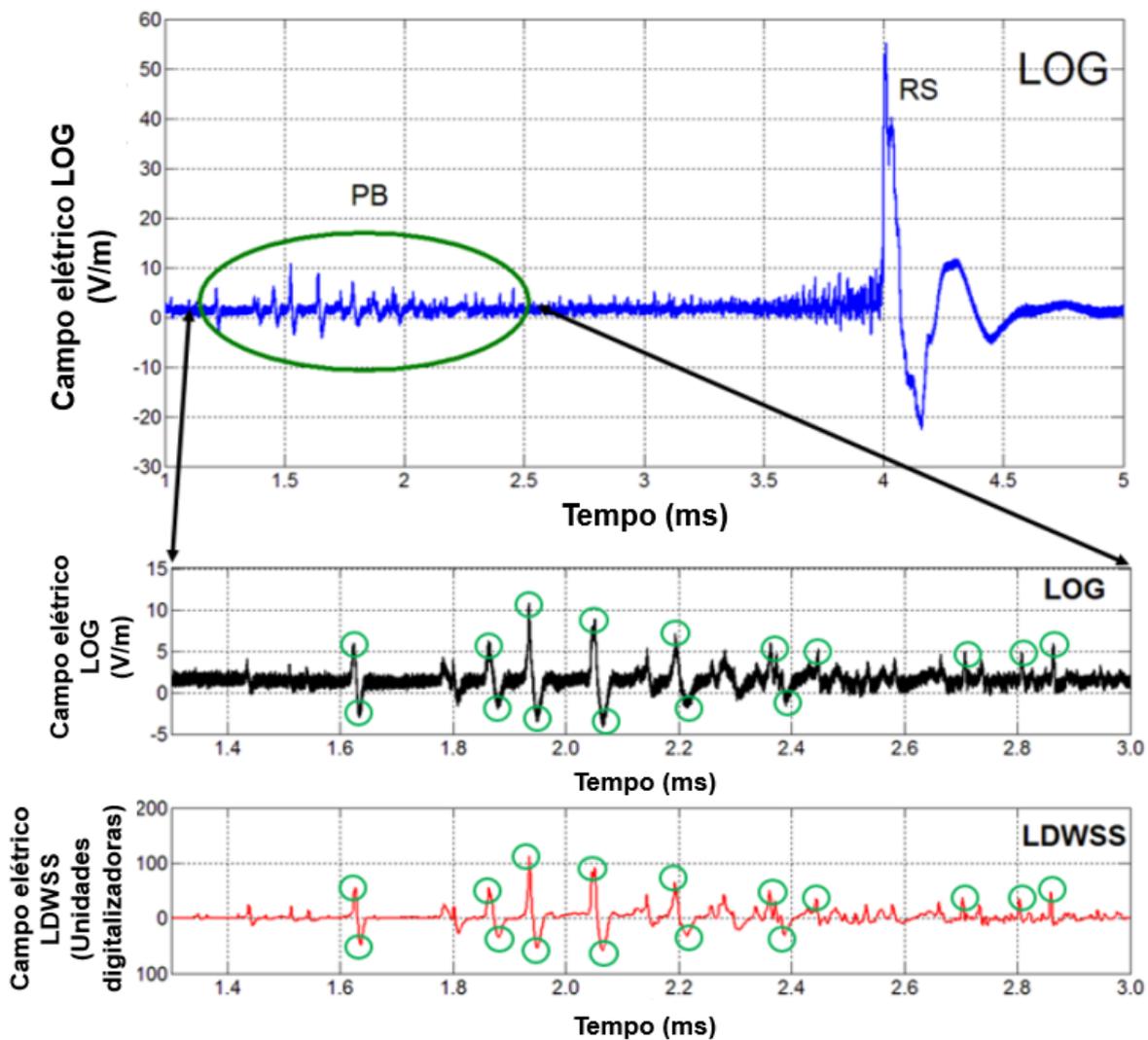
Figura 72 – Campo elétrico registrado no LOG em V/m versus Campo elétrico registrado pelo LDWSS em unidades do digitalizador u.d referente a 26 descargas de retorno negativas.



Fonte: Do autor.

Como os pulsos de PB apresentam característica bipolar, com meio-ciclos positivos e negativos bem definidos, adotou-se as medidas dos pontos máximos e mínimos de cada pulso para comparação. (Figura 73).

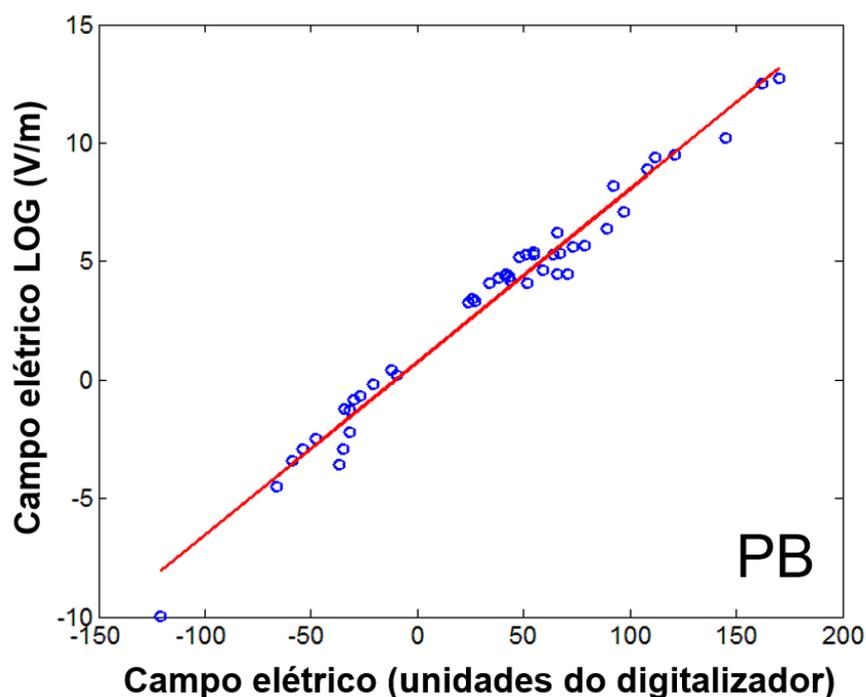
Figura 73 – Um dos dois trens de pulsos de colapsos preliminares que antecederam descargas de retorno negativas. Os círculos verdes indicam os pontos de medição do campo elétrico para comparação.



Fonte: Do autor.

Para os pulsos PB, obteve-se um coeficiente de correlação maior que 0.99. O gráfico de dispersão das medias está presente na Figura 74.

Figura 74 – Campo elétrico registrado no LOG em V/m versus Campo elétrico registrado pelo LDWSS em unidades do digitalizador u.d referente a 39 pontos máximos e 18 pontos mínimos de 2 trens de pulsos de colapsos preliminares.



Fonte: Do autor.

Foi definido como fator de calibração (K_{LDWSS}) em (V/m) / u.d a média aritmética da razão entre as médias do campo elétrico, para ambos DR, e pulsos CP (N=93) entre o LOG e LDWSS, conforme Tabela 5

Tabela 5. Estatísticas da razão entre o pico de campo elétrico em V/m (LOG) e o pico de campo elétrico em unidade do digitalizador d.u (LDWSS)

Parâmetro	E_{LOG}/E_{LDWSS} (V/m)/d.u.		
	RS	PB	RS+PB
Média aritmética	0.0802	0.0805	0.0804
Mediana	0.0800	0.0784	0.0790
Moda	0.0703	0.0632	0.0750
Desvio padrão	0.0069	0.0239	0.0205
Erro padrão	0.14%	0.29%	0.21%
Máximo	0.0933	0.1365	0.1365
Mínimo	0.0703	0.0074	0.0074
N	26	67	93

De acordo com a Tabela 5, o fator de calibração é 0,08 com erro padrão de 0,21%. Assim, os valores de campo elétrico registrados pelo LDWSS em unidades digitalizadoras (E_{LDWSS}) devem ser multiplicados por (K_{LDWSS}) para se obter os valores de campo elétrico (E) em volts por metro (V/m).

$$E = K_{LDWSS} E_{LDWSS} \quad (49)$$

É importante notar que este fator de calibração $K_{LDWSS} = 0.08$ (V/m) / d.u corresponde a valores de campo elétrico medidos nos altos do NEB, mas referenciados a valores ao nível do solo, ou seja, a presença do prédio é levada em conta no fator de calibração. Logo, este valor para o fator de calibração só é válido para quando o sistema estiver instalado nos altos do NEB, ou em uma edificação com geometrias similares. Se o LDWSS for instalado ao nível do solo, $G_{edificação}$ deve ser removido (estabelecido igual a 1) da fórmula do fator de calibração, assim, K_{LDWSS} deve ser multiplicado por 1.4, que é o ganho devido a presença do NEB. Para qualquer outro lugar de instalação do LDWSS, devemos estimar o novo valor para o ganho devido a presença da edificação. ($G_{edificação}^{novo}$). O novo fator de calibração (K_{LDWSS}^{novo}) será dado pela seguinte equação:

$$K_{LDWSS}^{novo} = K_{LDWSS} \frac{1.4}{G_{edificação}^{novo}} \quad (50)$$

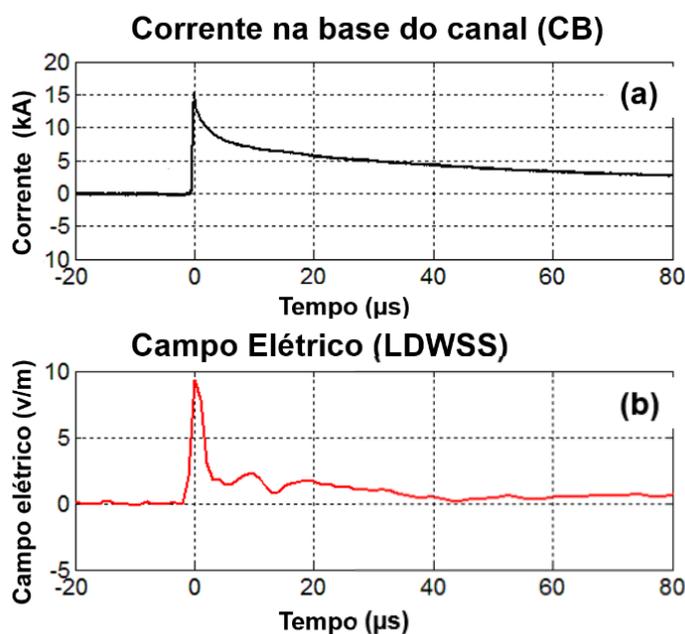
8 APLICAÇÃO / UTILIZAÇÃO DO LDWSS NA INVESTIGAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Este capítulo aborda a aplicação do LDWSS na pesquisa de diversos temas relacionados a descargas atmosféricas. Em todos os tópicos deste capítulo foram utilizados os dados registrados pelo LDWSS, comprovando a versatilidade do sistema, assim como sua consolidação técnico-científica.

8.1 Estimação da corrente de pico de raios nuvem-solo artificiais e naturais.

Este tópico apresenta a utilização de dados do LDWSS e equações empíricas de conversão de campo-em-corrente, para estimar a corrente de pico em um raio induzido e em raios naturais.

Figura 75 – Formas de onda (a) da corrente diretamente medida na base do canal em Camp Blanding - CB e (b) do campo elétrico registrado pelo LDWSS no LOG a 45 km do canal.



Fonte: Do autor.

Em 13 de agosto de 2016, o LDWSS em operação no LOG registrou uma forma de onda do campo elétrico radiado por uma descarga de retorno, iniciada utilizando a técnica “*rocket-and-wire*” em Camp Blanding - CB, Florida, USA, que está localizado a 45 Km do LOG. A corrente medida na base do canal e a forma de onda do campo elétrico registrado pelo LDWSS estão presentes na Figura 75. A corrente na base do canal foi medida utilizando um resistor shunt, com largura de banda de 0 a 8Mhz. Estima-se ser de 10% a incerteza na calibração das medições de corrente. Utilizando os valores de campo elétrico calibrados do LDWSS, foi inferido o valor da corrente de pico, utilizando duas equações empíricas de conversão de campo-em-corrente, uma delas proposta por Rakov, Thottappillil e Uman (1992) e Mallick et al. (2014).

Tabela 6. Comparação da corrente de pico de uma descarga de retorno calculada utilizando equações empíricas de conversão de campo-em-corrente com a corrente de pico medida na base do canal e a reportada pela NLDN.

Corrente de pico (kA)	IR	IM	INLDN	ICB
	14,0	12,4	12	15,1
Erro relativo a ICB, %	-7,2%	-18%	-21%	-

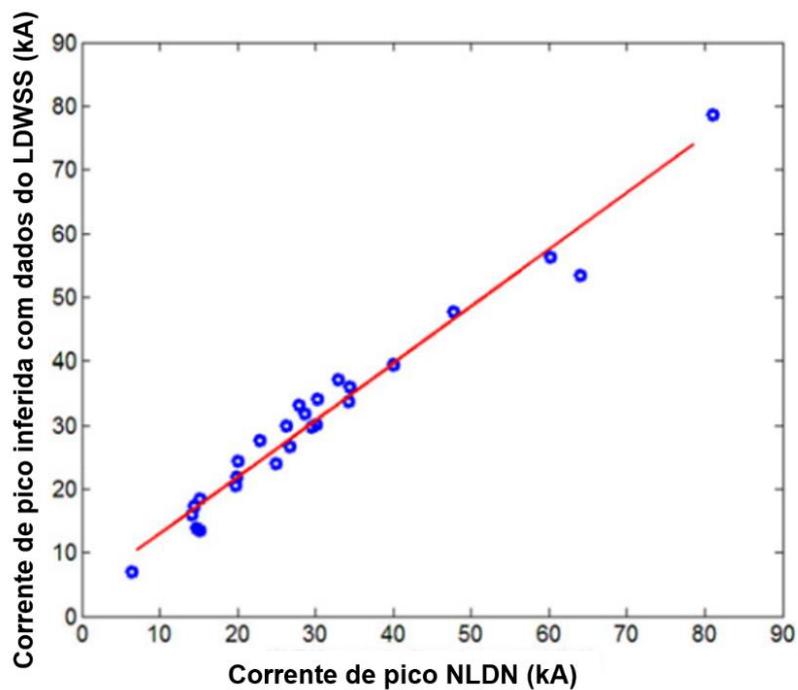
O valor de pico do campo elétrico registrado pelo LDWSS, para este evento, foi de 9.32 V/m, e a distância D aplicada nas equações é a distância entre CB e LOG, que corresponde a 45 km. O valor de pico calculado com as equações empíricas, assim como o valor reportado pela NLDN e o valores medidos na base do canal, estão presentes na Tabela 6. Como visto nessa tabela, a equação empírica de Rakov foi a que apresentou o menor erro, em relação a verdade de solo “*ground truth*” da corrente medida em CB.

Utilizando as medições calibradas de campo elétrico do LDWSS e as distâncias disponibilizadas pela NLDN – para 26 descargas de retorno naturais, sendo 7 primeiras e 19 subsequentes – foi estimada a corrente de pico, utilizando a equação (20). O intervalo das correntes de pico e as distâncias reportadas pela NLDN foram de 6,5 a 81 kA e 28 a 108 km, respectivamente. As correntes de pico inferidas foram comparadas com as reportadas pela NLDN. O coeficiente de correlação foi de 0,98.

A incongruência entre as correntes inferidas pelo LDWSS e NLDN relativas as correntes reportadas pela NLDN, tem seu intervalo entre 0,1% e 22% com valor médio de 9,3%. Esse resultado é razoavelmente bom, considerando que a NLDN foi calibrada através de dados

de raios induzidos e apresentou um erro geométrico médio absoluto de 14% para a estimação das correntes de pico.

Figura 76 – Magnitude das correntes de pico inferidas pela equação empírica de Rakov e campo elétrico registrado pelo LDWSS versus correntes de pico relatadas pela NLDN.

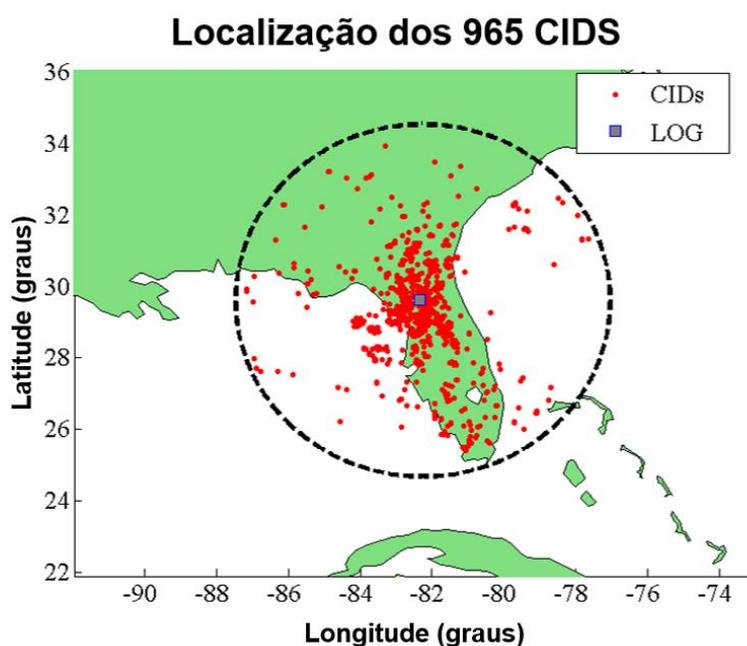


Fonte: Do autor.

8.2 Classificação de CIDs

Este tópico aborda os resultados apresentados por Leal, Rakov e Da Rocha (2017), nos quais foram analisadas formas de onda de 965 CIDs, registradas pelo LDWSS durante o mês de agosto de 2016, quando o sistema estava em operação no LOG. Foi delimitada uma distância máxima de 500km do local de instalação do sensor, para ser a área de estudo (Figura 77).

Figura 77 – Localização dos 965 CIDs analisados neste estudo, são representadas pelos pontos vermelhos. O círculo pontilhado delimita o raio de 500 km do local de instalação do sensor.

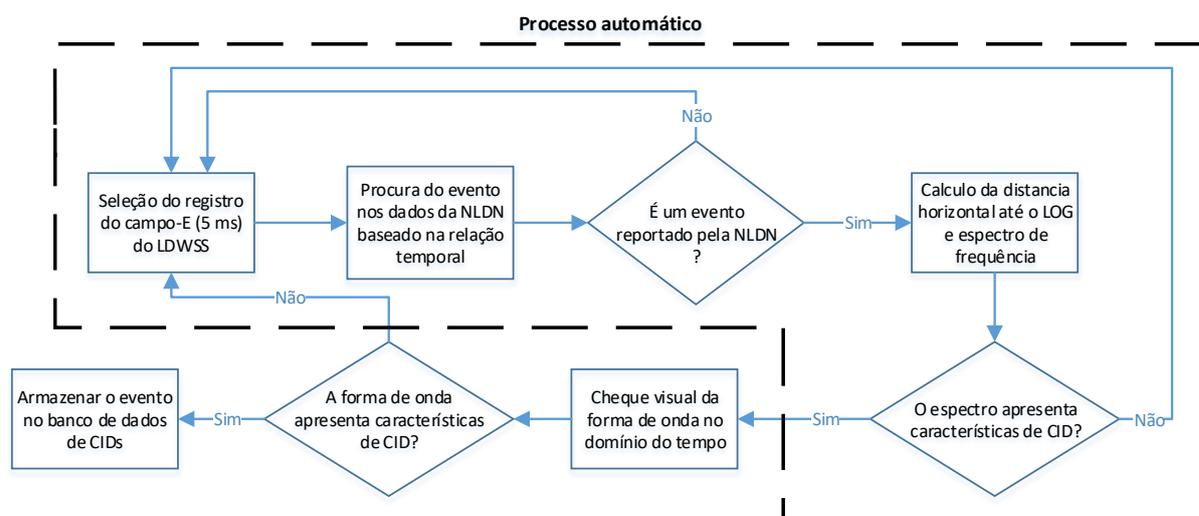


Fonte: Do autor.

A partir de uma metodologia desenvolvida por Leal, Rakov e Da Rocha (2017), na qual são consideradas as formas de onda no domínio do tempo e o espectro de frequência de cada evento, os CIDs foram diferenciados dos demais tipos de descargas atmosféricas.

CIDs no domínio do tempo, apresentam uma largura de pulso estreita, entre 5 e 25 μ s, no domínio da frequência e têm sua energia distribuída em um amplo espectro, com pico na faixa do VHF (NAG et al., 2010). Tais características são inerentes a essa classe de descarga atmosférica. A metodologia empregada para separar os CIDs dos demais eventos, busca de forma semiautomática esse padrão dentro de cada janela de 5 ms. O diagrama de blocos detalhando a metodologia empregada, está presente na Figura 78.

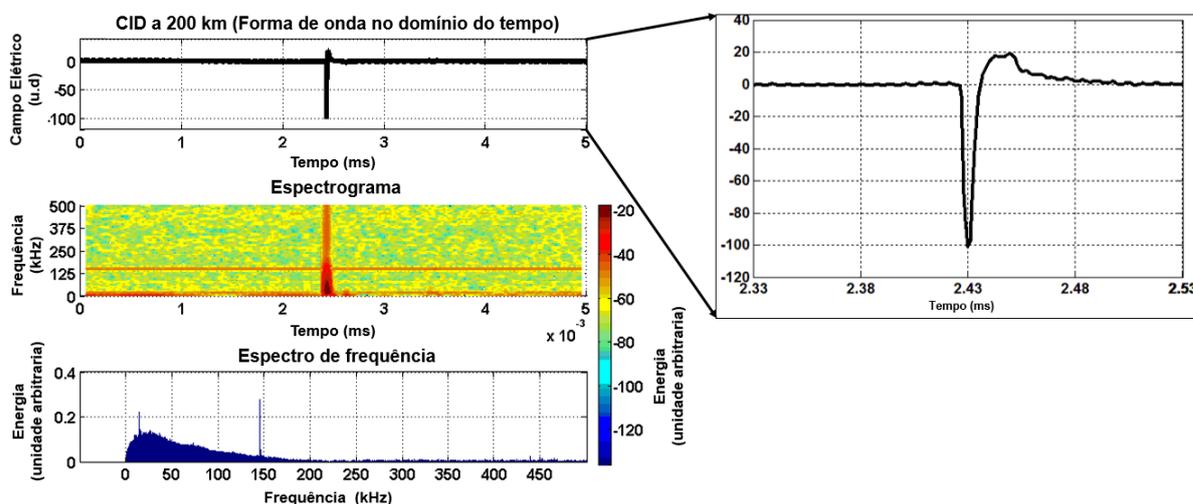
Figura 78 – Fluxograma ilustrando o algoritmo semiautomático utilizado para filtrar CIDs.



Fonte: Do autor.

Na Figura 79, observa-se a forma de onda do campo elétrico de um CID no domínio do tempo, seu correspondente espectrograma e sua forma no domínio da frequência.

Figura 79 – Forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo, espectrograma e espectro de frequência de um CID que ocorreu à 200 km do sensor. O pico de frequência em aproximadamente 150 kHz está relacionado a ruídos do sistema.



Fonte: Do autor.

Dentre as análises, pode-se observar onze diferentes tipos de CIDs, sendo que sete deles nunca haviam sido relatados anteriormente pela literatura. Os onze diferentes tipos observados e suas respectivas características estão presentes nas tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7. Classificação das formas de onda de campos elétricos produzidos por CIDs (1).

Tipo do CID	Descrição	Forma de onda representativa	Ocorrência		Porcentagem de CIDs positivos
			Número	Porcentagem	
1	Forma de onda bipolar suave		236	24,46%	2,97%
2	Meio-ciclo inicial suave, ondulações no meio-ciclo final		444	46,01%	0,68%
3	Pequeno pico após o pico principal e overshoot suave.		70	7,25%	2,86%
4	Pequeno pico antes do pico principal e overshoot suave.		63	6,53%	3,17%

Tabela 8. Classificação das formas de onda de campos elétricos produzidos por CIDs (2).

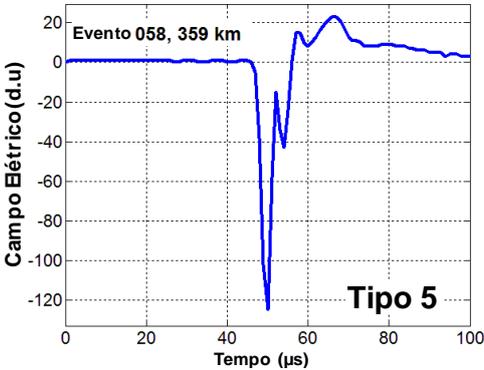
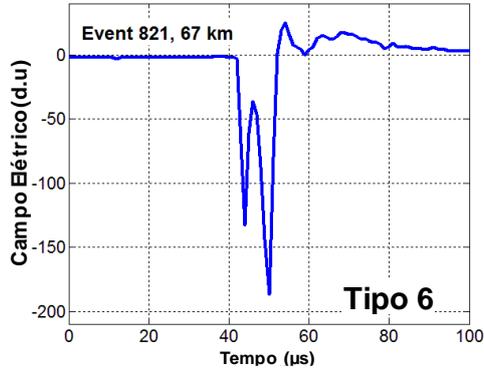
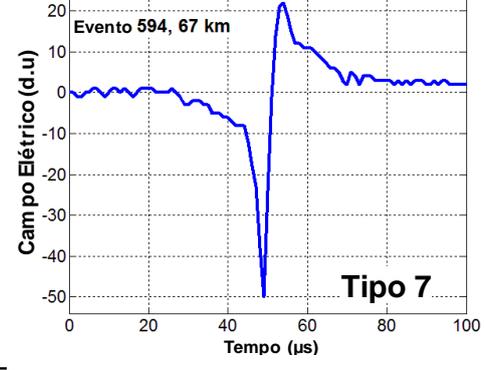
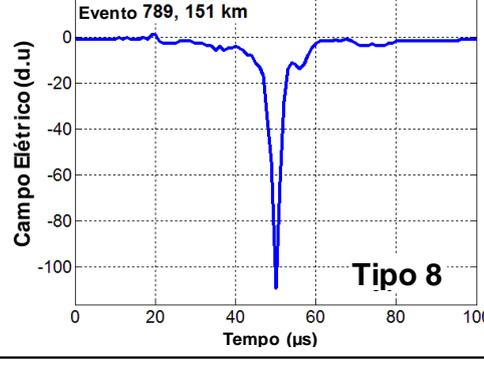
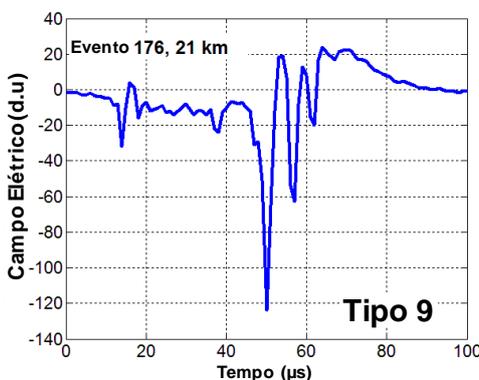
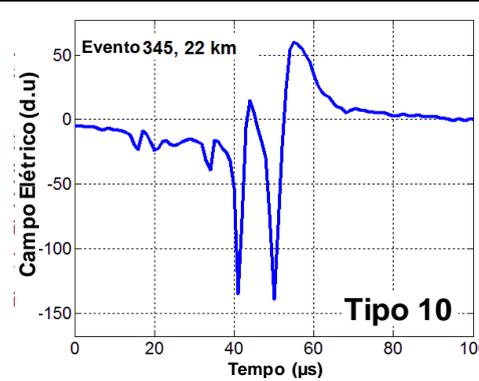
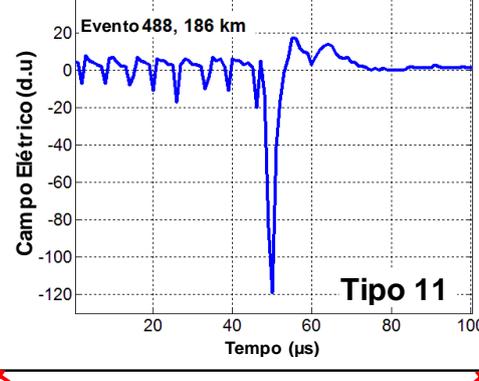
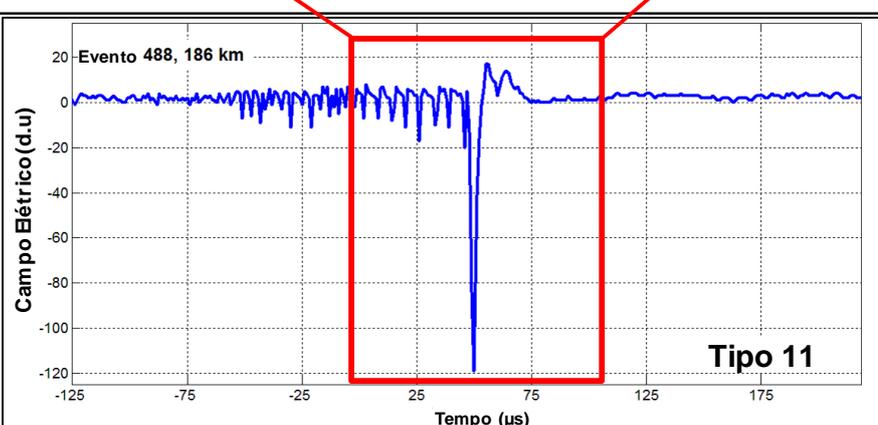
Tipo do CID	Descrição	Forma de onda representativa	Ocorrência		Porcentagem de CIDs positivos
			Número	Porcentagem	
5	O mesmo que o 3, porem com ondulações no overshoot.		69	7,15%	0,00%
6	O mesmo que o 4, porem com ondulações no overshoot.		27	2,80%	0,00%
7	Forma de onda bipolar suave com "slow front"		24	2,49%	0,00%
8	Forma de onda unipolar		2	0,21%	0,00%

Tabela 9. Classificação das formas de onda de campos elétricos produzidos por CIDs (3).

Tipo do CID	Descrição	Forma de onda representativa	Ocorrência		Porcentagem de CIDs positivos
			Número	Porcentagem	
9	Grandes ondulações no overshoot e "slow front"	 <p>Evento 176, 21 km</p> <p>Tipo 9</p>	2	0,21%	0,00%
10	Meio-ciclo inicial com múltiplos picos e overshoot suave	 <p>Evento 345, 22 km</p> <p>Tipo 10</p>	9	0,93%	0,00%
11	Forma de onda bipolar característica, precedida por um trem de pulsos menores.	 <p>Evento 488, 186 km</p> <p>Tipo 11</p>	19	1,97%	5,26%
Todos	-	-	965	100%	1,58%



Evento 488, 186 km

Tipo 11

8.3 Contexto de ocorrência dos CIDs

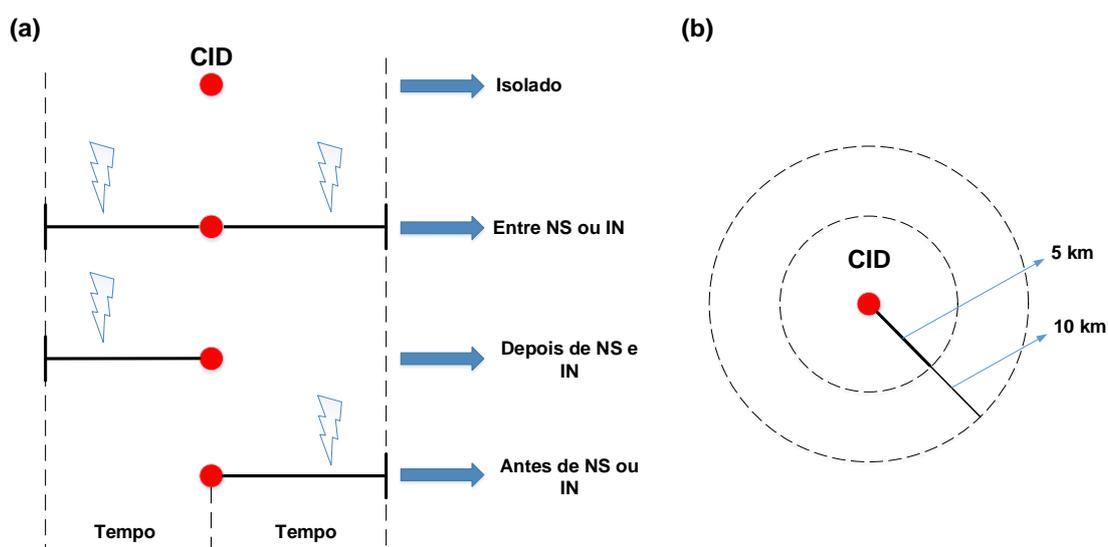
Este tópico aborda o contexto de ocorrência dos CIDs, baseado em 1168 CIDs positivos e negativos registrados pelo LDWSS. O contexto de ocorrência refere-se a quais eventos tendem a ocorrer antes e depois dos CIDs, e qual a tendência dos CIDs ocorrerem de forma isolada de outros eventos.

Diversos estudos, relataram que os CIDs tendem a ocorrer de forma isolada temporalmente e espacialmente (LE VINE, 1980), (WILLETT; BAILEY; KRIDER, 1989) e (SMITH et al., 1999), ou seja, não existe relato de outros tipos de descargas antes ou depois de sua ocorrência. Entretanto, alguns estudos relatam a ocorrência de CIDs antes de descargas intra-nuvem (RISON et al., 1999), podendo ser, de certa forma, um processo de “ignição”.

Foram aplicados oito critérios para investigar o contexto de ocorrência espacial e temporal dos CIDs, dois critérios espaciais (5 e 10 km) e quatro critérios temporais (10, 100, 500 e 1000 ms). Os dados da NLDN foram utilizados nessa investigação.

A fim de classificar os tipos de isolamento dos CIDs, foram criadas quatro categorias: CID isolado; CID entre raios NS ou IN; CID depois de raios NS ou IN e; CID antes de raios NS ou IN. As quatro categorias sempre levam em consideração aspectos temporais e espaciais.

Figura 80 – Critérios de isolamento dos CIDs. (a) Critérios temporais. (b) Critérios espaciais.



Fonte: Do autor.

O resultado da análise dos oito critérios, referente ao contexto de isolamento, encontra-se na Tabela 10. A quantidade de CIDs isolados aumenta com a diminuição dos valores dos critérios de isolamento temporal e espacial. Entretanto, para todos os critérios aplicados, a maioria dos CIDs sempre ocorre de forma isolada (Tipo 1), reafirmando os resultados obtidos por Le Vine (1980), (Willett, Bailey e Krider (1989) e Smith et al. (1999). O segundo maior tipo de ocorrência para os oito diferentes critérios, foi o Tipo 4, no qual o CID ocorre antes de um evento IC ou NS, podendo ele ser o gatilho para estes eventos, conforme afirmaram Rison et al. (1999). A ocorrência de CIDs entre dois eventos, foi o tipo de isolamento menos frequente.

Tabela 10. Porcentagem de CIDs para cada categoria de isolamento, considerando os 8 critérios adotados.

	Critérios de isolamento (Tempo (ms)/ Distância (km))							
	1000/10	1000/5	500/10	500/5	100/10	100/5	10/10	10/5
Tipo1	54%	66%	59%	70%	73%	79%	89%	91%
Tipo2	7%	4%	6%	3%	3%	2%	1%	1%
Tipo3	9%	6%	8%	5%	5%	3%	2%	1%
Tipo4	30%	25%	28%	22%	19%	15%	8%	7%

Afim de detalhar o contexto de ocorrência dos CIDs, escolheu-se o critério de 500ms e 10 km para fazer uma análise detalhada dos eventos que precedem e sucedem os CIDs não isolados. Este critério foi adotado, pois outros autores utilizaram parâmetros bem parecidos – por exemplo Karunarathne et al. (2015) utilizaram o critério de 660 ms e 10 km, e Nag et al. (2010) utilizaram o critério temporal de 500 ms após um CID e 100 ms antes.

Tabela 11. Contexto de ocorrência detalhado do CIDs considerando o parâmetro temporal 500 ms e espacial 10 km.

Critério de isolamento 500 ms / 10 km																			
	N	CID				Evento anterior						Evento posterior							
		MG Ip (kA)	MA Ip (kA)	MG Ip (kA)	MA Ip (kA)	IC		CG		MA dd (km)	MA dt (ms)	MG Ip (kA)	MA Ip (kA)	IN		NS		MA dd (km)	MA dt (ms)
						Pos	Neg	Pos	Neg					Pos	Neg	Pos	Neg		
Tipo 1	690	30,9	37,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Tipo 2	68	26,3	28,5	10,0	13,1	49,0	2,0	11,0	6,0	3,4	85,8	7,9	12,2	54,0	3,0	6,0	5,0	3,0	109,9
Tipo 3	88	30,0	39,7	8,2	12,2	63,0	4,0	11,0	10,0	4,5	145,2	-	-	-	-	-	-	-	-
Tipo 4	322	33,1	39,2	-	-	-	-	-	-	-	-	7,3	10,2	274,0	6,0	24,0	18,0	2,8	101,8

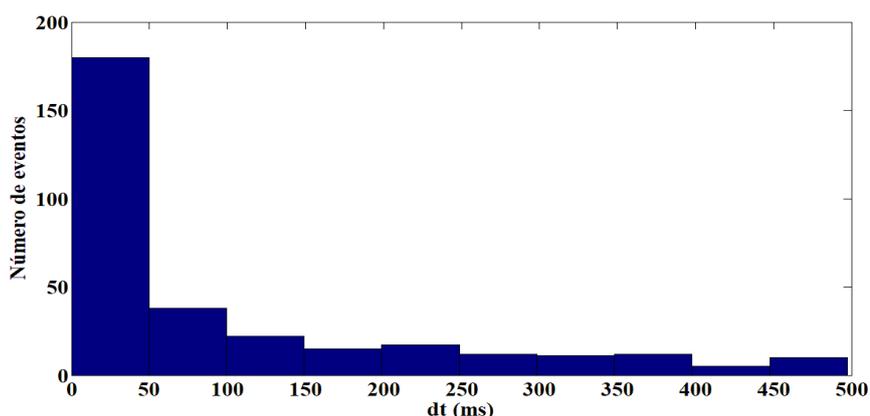
O tipo de isolamento que apresentou corrente de pico média mais elevada foi o tipo 4, onde o CID “teoricamente” quebra a rigidez do ar e viaja sobre o ar virgem, entre os centros de carga da nuvem e em seguida outra descarga ocorre. A segunda maior corrente média pertence ao tipo 1, que também “teoricamente” viaja entre os centros de carga através do ar virgem, sem a existência prévia de um canal ionizado. A corrente média dos CIDs é cerca de três vezes maior que a corrente média dos eventos que os antecedem ou sucedem.

Considerando o tipo de isolamento 2, em que os CIDs ocorrem entre dois eventos, os CIDs em sua maioria ocorrem em flashes intra nuvem positivos. Para este mesmo tipo de isolamento, a distância média dos eventos que precedem os CIDs é 3,4 km e a dos que sucedem é 3 km, o espaçamento temporal médio é de 85, 8 ms antes e 110 ms depois.

Aparentemente, é rara a ocorrência de CIDs relacionada a ocorrência de raios nuvem-solo. Na maioria dos casos em que CIDs ocorrem próximos a outro evento, este evento é uma descarga do tipo nuvem positiva.

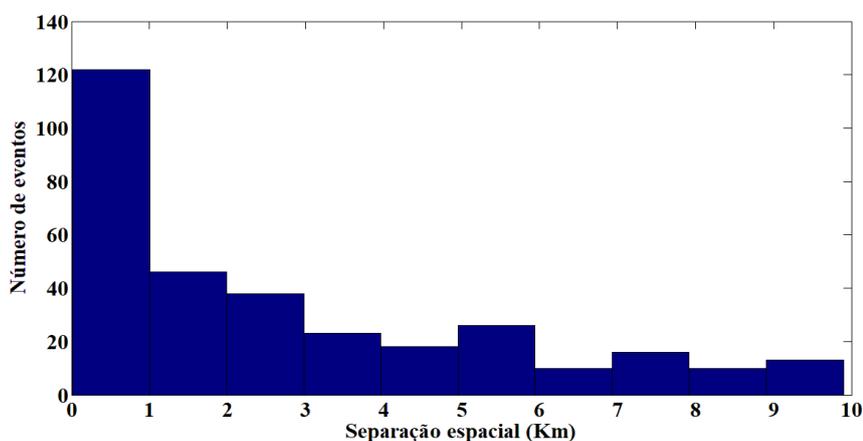
No tipo de isolamento 4, onde acredita-se que o CID seja a ignição de descargas atmosféricas que lhe sucedem, a grande maioria dessas descargas são raios intra-nuvem positivos e, a segunda maior quantidade são +NS. A maioria desses eventos ocorrem a menos de 50 ms do CID (Figura 81) e a menos de 1 km de distância (Figura 82). Isso pode indicar que realmente, eles foram iniciados devido a ocorrência do CID.

Figura 81 – Histograma da diferença temporal entre o CID e o evento após sua ocorrência.



Fonte: Do autor.

Figura 82 – Histograma da diferença espacial entre o CID e o evento após sua ocorrência.



Fonte: Do autor.

A fim de avaliar se o contexto de ocorrência dos CIDs varia com a intensidade do evento, ou seja, com o pico de corrente, calculou-se a porcentagem dos quatro tipos de isolamento para diferentes faixas de corrente, considerando o critério 500 ms e 10 km, conforme Tabela 12. Observa-se que a distribuição dos tipos de isolamento com a variação da corrente não é significativa, logo, para qualquer faixa de corrente os CIDs continuam tendendo a ocorrer de forma isolada.

Tabela 12. Porcentagem de CIDs para cada categoria de isolamento, considerando diferentes faixas de corrente.

	Critério de isolamento (500 ms / 10 km). Intervalos de correntes em KA					
	0 a 20	20 a 40	40 a 60	60 a 80	80 a 100	> 100
Tipo1	61%	59%	59%	59%	54%	64%
Tipo2	9%	5%	5%	4%	2%	4%
Tipo3	9%	5%	5%	9%	15%	14%
Tipo4	21%	31%	31%	27%	29%	18%

Com estas análises é reforçado que de fato CIDs tendem a ocorrer de forma isolada, e que podem ser a ignição de outros tipos de descargas atmosféricas.

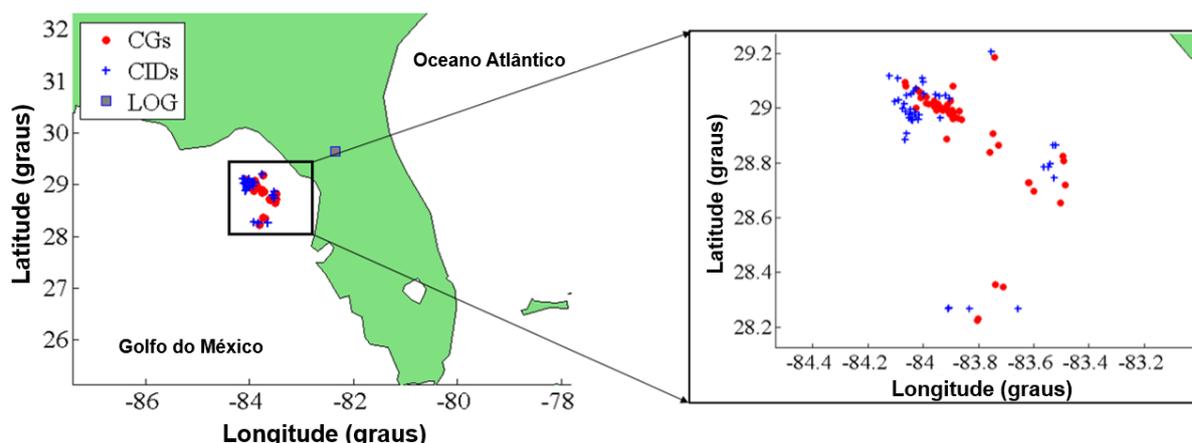
8.4 Investigação da interação de raios NS (-CG) e IN (CID) com a ionosfera.

Este tópico apresenta a utilização de dados registrados pelo LDWSS na estimação da altura de reflexão da ionosfera. Os resultados aqui apresentados foram apresentados por Leal, Rakov e Rocha (2017).

O conhecimento da altura da ionosfera é importante, principalmente para sistemas de telecomunicações, pois, em comunicações a longas distâncias por rádio frequência, utiliza-se o guia de onda formado entre a terra e a ionosfera para a propagação de sinais.

Leal, Rakov e Rocha (2017), inferiram a altura da reflexão ionosférica utilizando formas de onda de campo elétrico de descargas nuvem-solo e descargas nuvem, provenientes da mesma tempestade, algo nunca realizado anteriormente. Existem trabalhos que inferem a altura da ionosfera, ou somente utilizando raios nuvem (SMITH et al., 1999), (SMITH et al., 2004), ou ainda somente raios nuvem-solo (MCDONALD et al., 1979).

Figura 83 – Localização de todos os 82 eventos analisados.



Fonte: Do autor.

Todos os eventos analisados ocorreram sobre o Golfo do México, no período da noite, no dia 7 de agosto de 2016. Foram utilizadas 42 formas de onda de NS e 42 formas de onda CIDs, que são um tipo de raio nuvem. A localização de todos os eventos está presente na Figura 83.

Foram empregadas três metodologias para estimar a altura ionosférica. A primeira e segunda utilizam as formas de onda de raios nuvem-solo, onde as formas de onda dos campos são radiadas por uma sessão próxima do nível do solo e diferem entre si pela utilização da geometria plana e esférica, para a curvatura da terra. A terceira metodologia utiliza as formas de onda de CIDs, que tem seus campos radiados de fontes elevadas, utilizando a geometria plana para a curvatura terrestre. As metodologias são expostas a seguir.

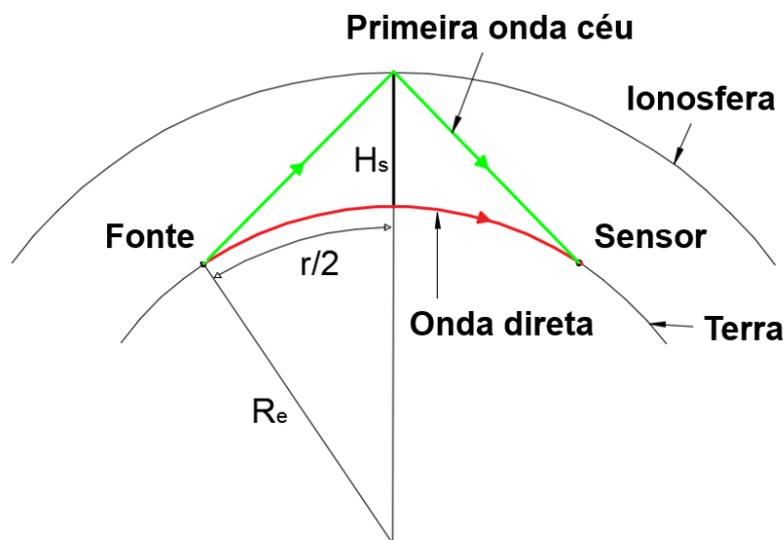
8.4.1 Cálculo da altura da reflexão ionosférica a partir de raios nuvem-solo

Para o caso da geometria esférica, mostrada na Figura 84, a altura da reflexão ionosférica, considerando a primeira onda céu (*first skywave*) pode ser calculada utilizando a equação (51). Já para o caso da geometria plana, ilustrada na Figura 85, a altura da reflexão ionosférica pode ser calculada utilizando a equação (52). Em ambos os casos é necessário computar a diferença do tempo de chegada entre a onda de chão (*ground wave*) – ou onda direta – e a primeira reflexão ionosférica (*first skywave*). Esse tempo está relacionado à variável t_1 nas equações. Essa diferença no tempo de chegada, está relacionada aos diversos percursos que a radiação leva para chegar no sensor.

$$H_s = R_e \left[\cos \left(\frac{r}{2R_e} \right) - 1 \right] + \sqrt{R_e^2 \left[\cos^2 \left(\frac{r}{2R_e} \right) - 1 \right] + \left(\frac{ct_1 + r}{2} \right)^2} \quad (51)$$

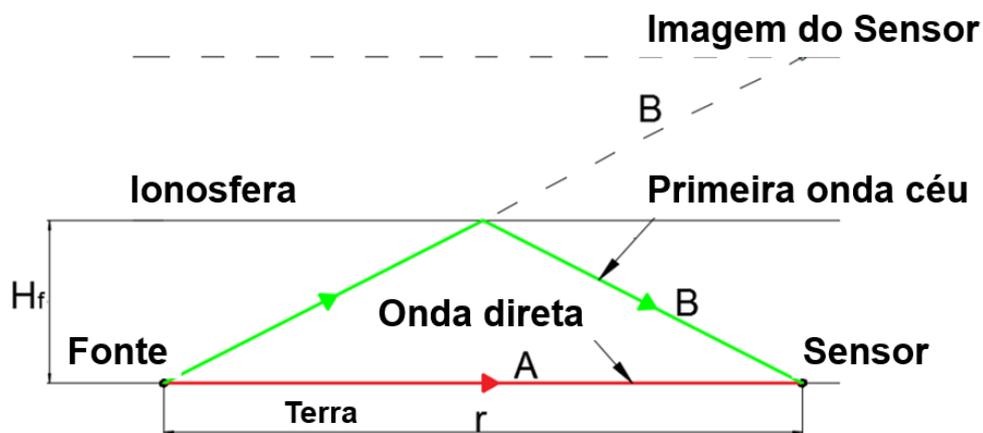
$$H_p = \frac{\sqrt{(ct_1)^2 + 2ct_1r}}{2} \quad (52)$$

Figura 84 – Representação esquemática da propagação, de um sinal eletromagnético gerado por um raio, entre o guia de onda formado pela ionosfera e a Terra considerando a geometria esférica da Terra.



Fonte: Do autor.

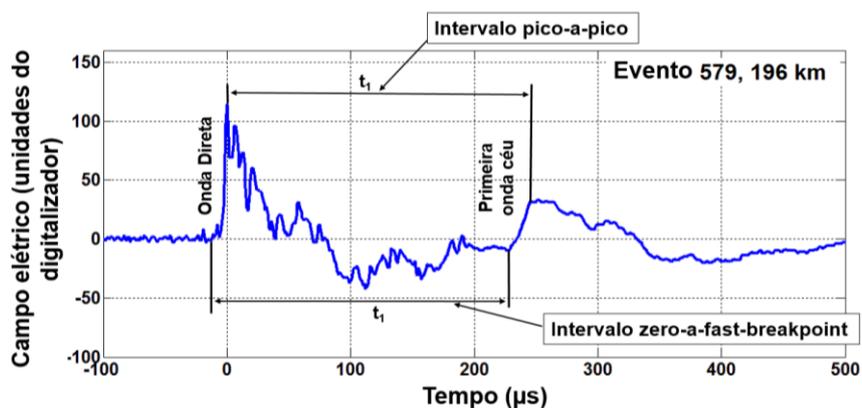
Figura 85 – Representação esquemática da propagação, de um sinal eletromagnético gerado por um raio, entre o guia de onda formado pela ionosfera e a Terra considerando a geometria plana da Terra.



Fonte: Do autor.

Nas equações (51) e (52), os termos R_e e r representam o raio da Terra e a distância horizontal (km) entre o sensor e o raio, respectivamente. Os intervalos temporais (t_1) foram medidos considerando os parâmetros exemplificados na Figura 86.

Figura 86 – Esquema de medição dos dois métodos utilizados para medir o atraso no tempo de chegada t_1 entre a onda direta e a primeira onda céu, para raios nuvem-solo.

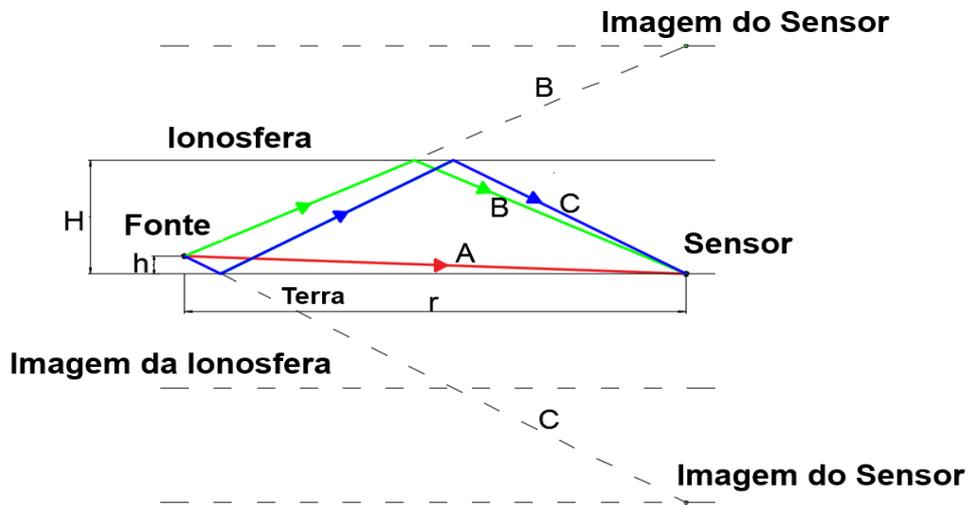


Fonte: Do autor.

8.4.2 Cálculo da altura da reflexão ionosférica a partir de CIDs

Para o cálculo da altura da reflexão ionosférica, utilizando uma fonte elevada, utilizou-se a metodologia apresentada por Smith et al. (1999). Fontes elevadas apresentam pares de reflexões ionosféricas, devido aos diferentes percursos, até atingirem o sensor (Figura 87 e Figura 88). A onda direta A e as ondas céu B (t_1) e C (t_2), têm seus percursos calculados pelas seguintes equações:

Figura 87 – Representação esquemática da propagação, de um sinal eletromagnético gerado por um CID, entre o guia de onda formado pela ionosfera e a Terra considerando a geometria plana da Terra.



Fonte: Do autor.

$$P_A = \sqrt{r^2 + h^2} \quad (53)$$

$$P_B = \sqrt{r^2 + (2H - h)^2} \quad (54)$$

$$P_C = \sqrt{r^2 + (2H + h)^2} \quad (55)$$

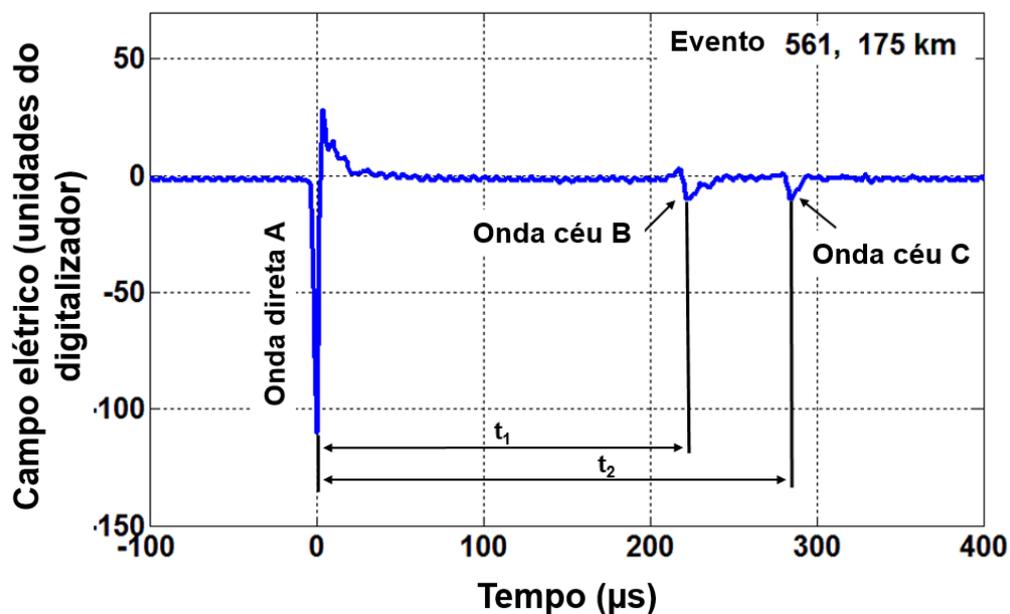
A diferença entre os percursos está relacionada aos atrasos t_1 e t_2 , e podem ser expressados pelas equações abaixo, onde c representa a velocidade da luz:

$$P_B - P_A = t_1 c \quad (56)$$

$$P_C - P_A = t_2 c \quad (57)$$

Resolvendo este sistema de duas equações, é possível encontrar a altura da refletividade da ionosfera (H) e a altura da fonte (h).

Figura 88 – Esquema de medição da diferença dos tempos de chegada t_1 e t_2 entre a onda direta e a (B) primeira e (C) segunda ondas céu.



Fonte: Do autor.

8.4.3 Resultados

Para formas de onda NS a diferença entre as médias da altura ionosférica, calculada pelo método que utiliza a geometria plana e esférica da Terra, foi menor que 570 m. Isso representa menos de 1% dos valores médios da altura da refletividade ionosférica. Logo, para distâncias inferiores a 200 km, a geometria plana pode ser utilizada sem maiores problemas de aproximação.

A média da altura da reflexão ionosférica, calculada utilizando NS e CIDs, são muito similares, 90-92 km e 91 km, respectivamente. Logo, conclui-se que, tanto formas de onda de fontes não elevadas (NS), quanto as de fontes elevadas (CIDs), podem ser utilizadas para estimar a altura efetiva da ionosfera.

Tabela 13. Estatísticas da estimação da altura da reflexão ionosférica utilizando formas de onda do campo elétrico de raios NS e CIDs.

Parâmetros	NS (N=42)				Distancia	CID (N=42)		
	Geometria esférica		Geometria plana			Hp-p	h	Distancia
	Hp-p	Hz-b	Hp-p	Hz-b				
Média aritmética, km	91,7	89,7	92,3	90,3	170	90,8	13,4	176
Mediana, km	91,7	89,5	92,3	90,1	-	90,6	13,1	-
Desvio Padrão, km	1,0	1,1	1,0	1,1	-	0,8	1,0	-
Máximo, km	93,6	92,9	94,2	93,4	212	93,7	15,9	216
Mínimo, km	90,1	87,6	90,6	88,2	144	89,1	11,8	143
Numero de eventos	42					42		

8.5 Investigação da diferença entre formas de ondas detectadas em diferentes bandas de frequência.

Este tópico aborda a utilização do LDWSS, em seu modo de operação Multi-Banda, na investigação da polaridade de descargas atmosféricas detectadas na banda VLF. Os resultados apresentados neste tópico foram apresentados por Leal et al. (2016b).

Sensores eletromagnéticos utilizados na detecção de descargas atmosféricas, podem operar em um grande intervalo de frequências. Este intervalo, que pode variar do ELF até UHF, e essa banda de operação do sistema, irão delimitar a sua eficiência e qual tipo de informação ele poderá inferir.

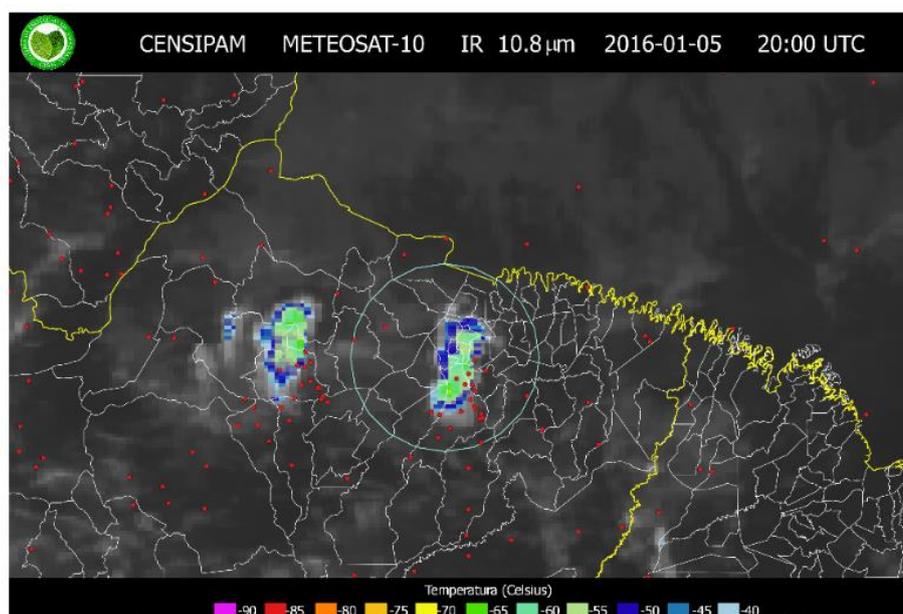
Sistemas que operam na banda VLF, por exemplo, STARNET e WWLL, são conhecidos por serem sistemas de longo alcance, uma vez que, nesta banda os campos eletromagnéticos radiados pelos raios se propagam por grandes distâncias, utilizando o guia de onda formado pela Terra e a Ionosfera, sem grande atenuação. Porém, sistemas que operam em VLF apresentam baixa eficiência na detecção de “*strokes*”, “*flashes*” e descargas nuvem, além de baixa acurácia na aferição da corrente de pico e polaridade.

As análises da polaridade das descargas atmosféricas neste tópico, foram feitas considerando a convenção de polaridade da eletricidade atmosférica, e a polaridade foi inferida baseando-se somente no pico inicial do raio detectado.

Objetivando o estudo do mesmo evento em duas bandas de frequência, o LDWSS foi configurado para operar simultaneamente nas bandas VLF (7KHz to 15kHz) e ULF / VLF (350Hz to 25Khz).

Foram analisados dados do dia 5 de janeiro de 2016, quando o sistema estava em operação no prédio do “Sistema de Proteção da Amazônia – SIPAM”. Para tornar mais confiáveis os dados de raios analisados, verificamos as condições meteorológicas para o mesmo intervalo de tempo.

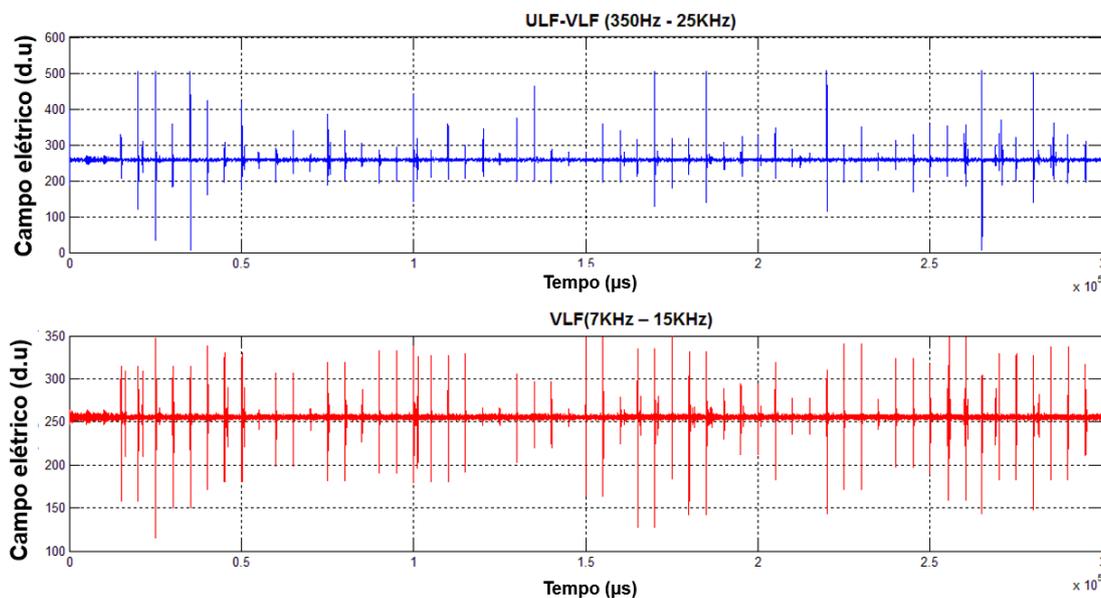
Figura 89 – Imagem de satélite indicando as condições meteorológicas durante o registro dos 60 eventos. Os pontos vermelhos representam a localização de descargas atmosféricas reportado pela rede STARNET para o mesmo intervalo temporal. O sensor está localizado no centro do círculo delimitado pelo círculo azul.



Fonte: Do autor.

Como observado na Figura 89, nesse dia estava em andamento uma tempestade na região. Para essa campanha de medição foram analisados sessenta eventos (*strokes*). Todos os eventos estão presentes na Figura 90.

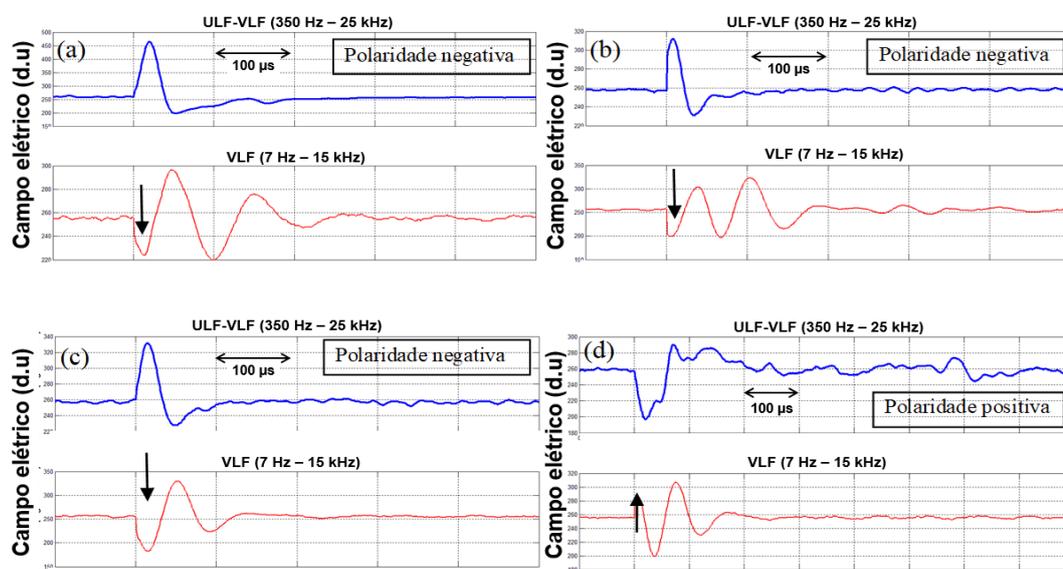
Figura 90 – Formas de onda dos 60 eventos registrados. No painel superior temos os eventos na banda ULF-VLF e no painel inferior em VLF.



Fonte: Do autor.

Dentre os sessenta eventos analisados, 93,3% foram identificados com a mesma polaridade nas duas bandas, porém em 6,7% foi verificada polaridade reversa. Entre os raios que foram identificados com polaridade reversa na banda VLF, 75% foram identificados como raios nuvem-solo negativos na banda ULF-VLF, e 25% foram identificados como raios nuvem-solo positivos. Os eventos que apresentaram polaridade reversa estão expostos na Figura 91.

Figura 91 – Formas de onda dos eventos identificados com a polaridade reversa.



Fonte: Do autor.

Inferir a polaridade de uma descarga atmosférica a longas distâncias, com redes que operem em VLF, não é uma tarefa trivial. A longas distâncias, a onda direta se degrada e se une às reflexões ionosféricas. Essa superposição e as ondulações das formas de onda detectadas em VLF, causam dificuldade na identificação da polaridade de uma descarga. Logo, a comparação direta entre forma de onda do mesmo evento em diferentes frequências, surge como uma ferramenta para facilitar essa tarefa.

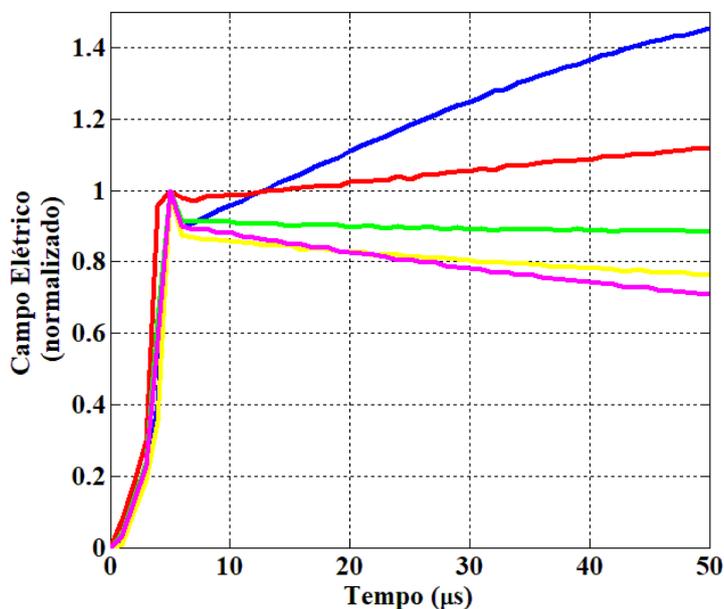
8.6 Banco de dados de formas de onda do campo elétrico de descargas atmosféricas

Um banco de dados contendo mais de oito mil formas de onda da componente vertical do campo elétrico, de diferentes tipos de descargas atmosféricas, foi elaborado com intuito de prover consistentes dados experimentais, para colaborar com o melhor entendimento do fenômeno “Raios”.

O banco de dados pode ser utilizado em diversas aplicações na pesquisa de raios, como: validação de diferentes modelos utilizados na simulação da descarga de retorno; validação de métodos computacionais utilizados no cálculo de campos elétricos gerados por raios; estudo da interação dos campos eletromagnéticos gerados por raios com a ionosfera; investigação dos efeitos do meio de propagação no registro dos sinais eletromagnéticos gerados por raios e; técnicas de classificação de diferentes tipos de descargas atmosféricas, dentre outras aplicações.

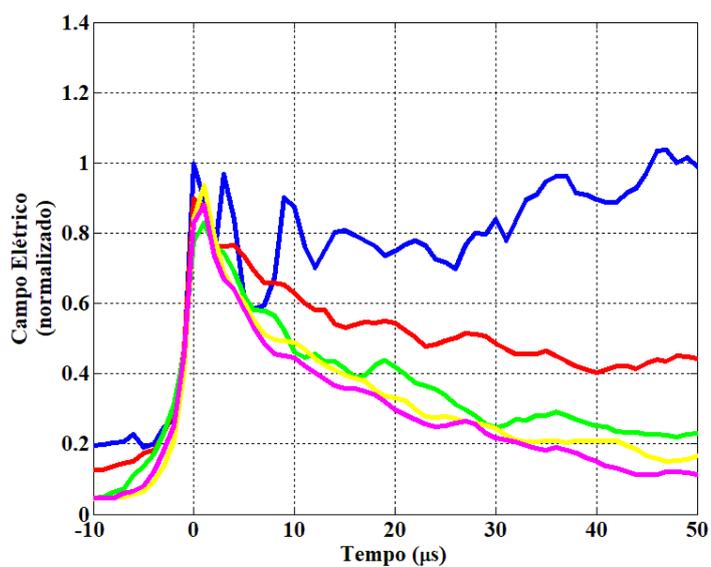
As Figuras 92 e 93 representam uma aplicação do banco de dados na validação de métodos computacionais, utilizados no cálculo de campos elétricos gerados por raios. A Figura 92 apresenta a forma de onda da componente vertical do campo elétrico, calculada utilizando as equações exatas para cálculo de campos eletromagnéticos radiados por raios apresentadas no capítulo 3. Cada cor representa a mesma descarga, observada a uma distância diferente, variando de 10 km a 50 km. Assumiu-se a velocidade de propagação da frente de corrente no canal igual a 1.3 Mm/s, o comprimento do canal igual a 7 Km, e a velocidade da luz igual a 2,998 Mm/s. A Figura 93 apresenta dados experimentais, retirados do banco de dados, para as mesmas distâncias da Figura 92.

Figura 92 – Formas de onda da componente vertical E_z do campo elétrico total, calculadas utilizando o modelo de linha de transmissão (TL) para a corrente no canal e assumindo a corrente padrão (CIGRE) para a primeira descarga de retorno. O traçado azul representa E_z a 10 km, vermelho a 20 km, verde a 30 km, amarelo a 40 km e magenta a 50 km.



Fonte: Do autor.

Figura 93 – Formas de onda da componente vertical E_z do campo elétrico registradas pelo LDWSS e armazenadas no banco de dados. O traçado azul representa a média das formas de onda registradas a 10 km, vermelho a 20 km, verde a 30 km, amarelo a 40 km e magenta a 50 km.



Fonte: Do autor.

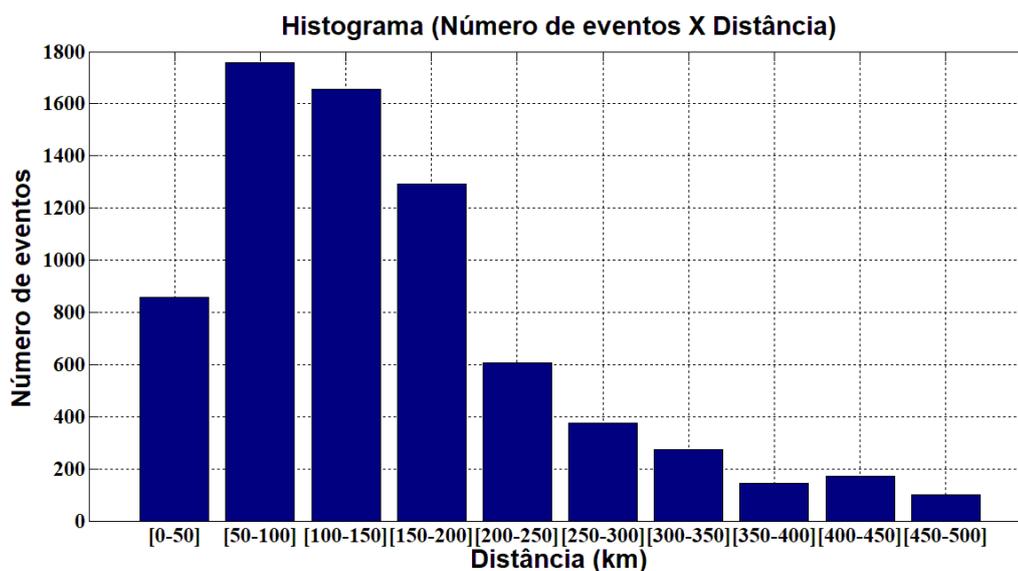
Dentre os mais de oito mil eventos contidos no banco de dados, existem descargas nuvem-solo negativas (-CG) e positivas (+CG), e descargas nuvem do tipo CID. Só foram incluídas no banco descargas nuvem do tipo CID, porque elas têm a assinatura de seu campo elétrico bem definida. Tanto as formas de onda de raios nuvem-solo (CG) quanto dos CIDs foram observadas no período diurno e noturno. Dentre os raios nuvem-solo, encontram-se formas de onda de raios que ocorreram entre 6 e 500 km afastados do sensor. Para os CIDs temos o intervalo de distância entre 30 e 494 km.

Todos os eventos contidos no banco de dados foram registrados pelo LDWSS, quando em operação na Universidade da Florida no mês de agosto de 2016. Cada evento contém 1,6 ms com resolução de 1 us, sendo 100 us antes da maior deflexão da forma de onda, e 1500 us após. Foi adotado esse intervalo de 1,6 ms, pois com 1,5 ms após o pico da onda direta da descarga de retorno é possível identificar até três ondas céu – informação importante para diferenciar formas de onda observadas a diferentes distâncias.

Através da correlação temporal entre os dados do LDWSS e da rede NLDN, foi possível a identificação do local de ocorrência, da corrente de pico e da distância do evento registrado.

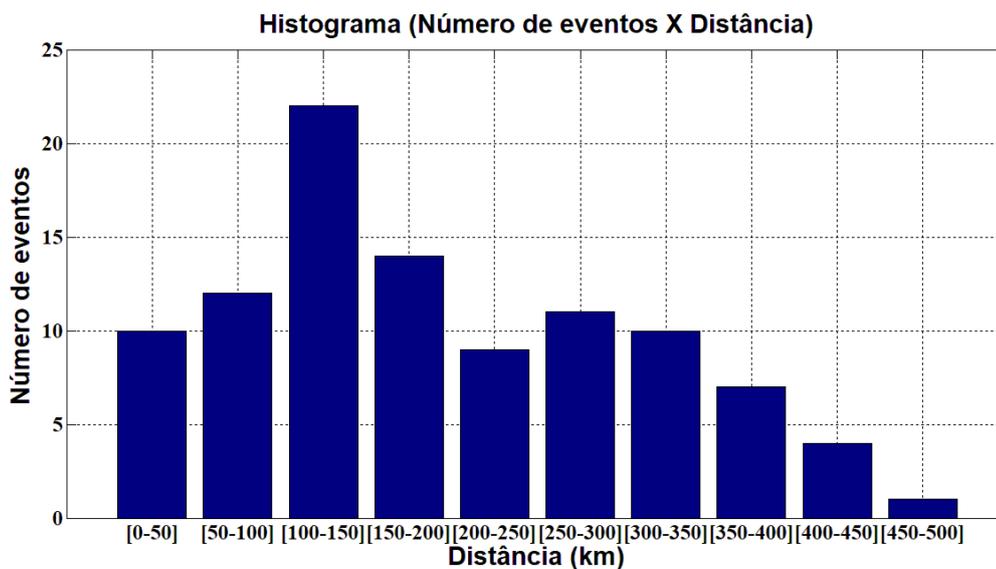
A seguir, serão apresentadas as distribuições da quantidade de eventos em relação a distância de observação, para cada tipo de descarga contida na base de dados. Primeiramente, temos o histograma dos raios nuvem-solo negativos (-CG), em seguida raios nuvem-solo positivos (+CG) e por último os CIDs.

Figura 94 – Histograma da distribuição de raios (-CG) quanto a distância.



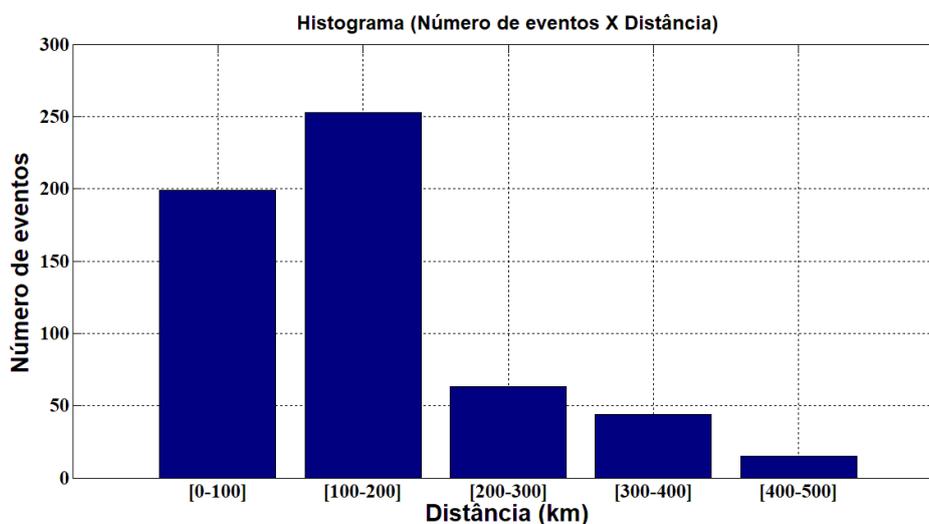
Fonte: Do autor.

Figura 95 – Histograma da distribuição de raios (+CG) quanto a distância.



Fonte: Do autor.

Figura 96 – Histograma da distribuição de raios (CID) quanto a distância.

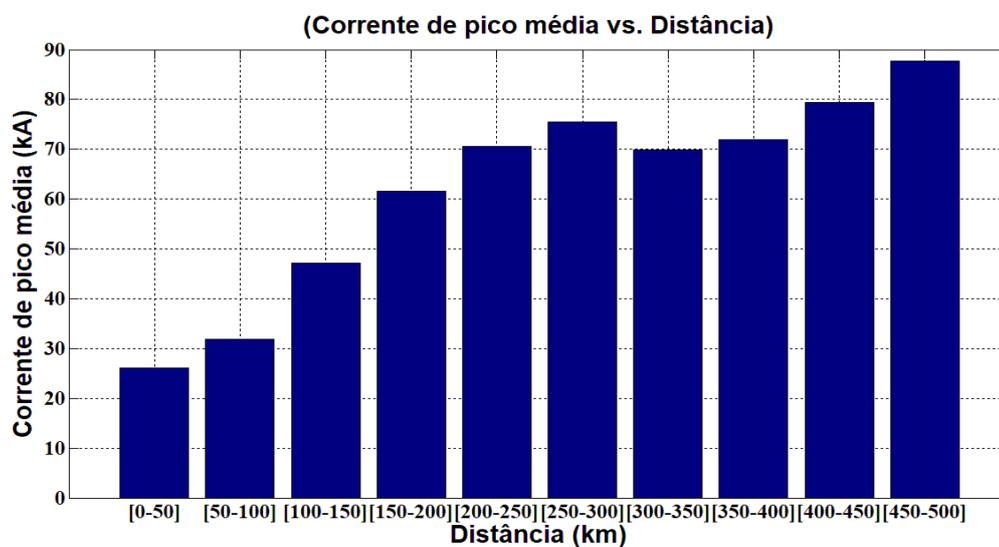


Fonte: Do autor.

A partir do agrupamento de eventos dentro de um mesmo intervalo de distância, que variam de 50 em 50 km, calculou-se a média aritmética da corrente de pico para a quantidade de eventos dentro de um mesmo intervalo.

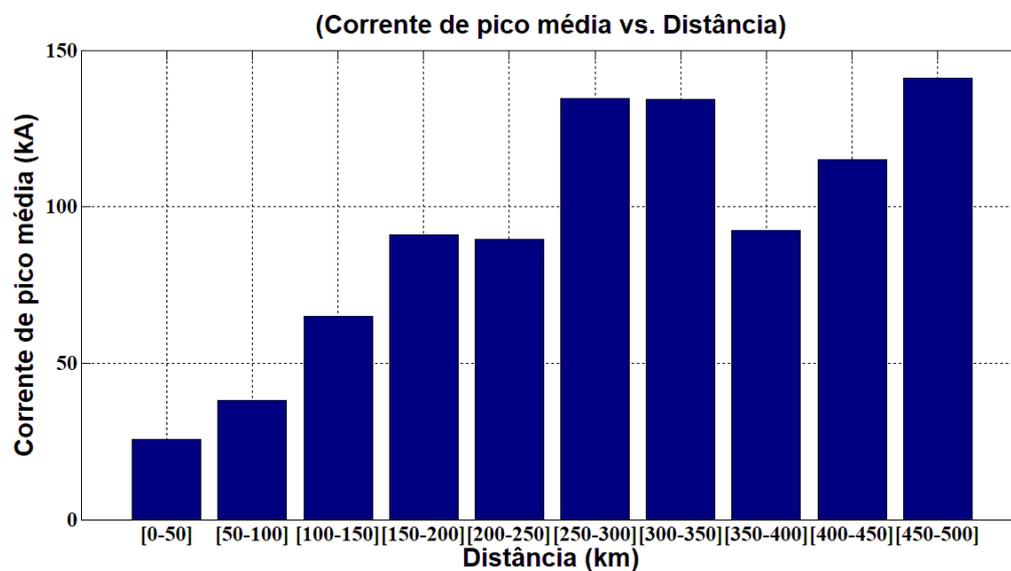
Os gráficos contendo a média da corrente de pico para cada intervalo, e para cada tipo de descarga -CG, +CG e CID estão presentes nas figuras a seguir.

Figura 97 – Relação entre a média aritmética da corrente de pico e intervalos de distância de 50 km, variando de 0 a 500 km. Para raios nuvem-solo negativos.



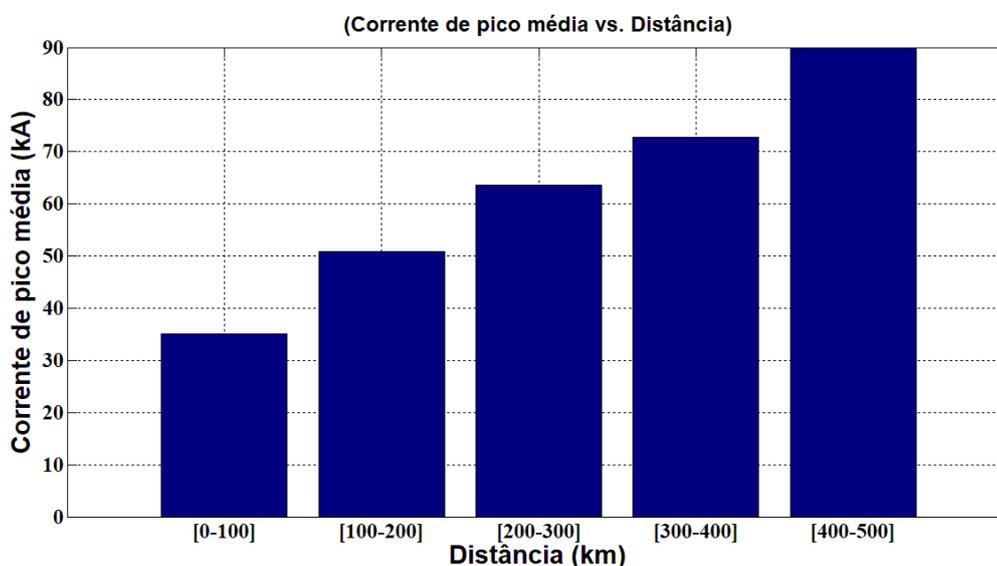
Fonte: Do autor.

Figura 98 – Relação entre a média aritmética da corrente de pico e intervalos de distância de 50 km, variando de 0 a 500 km. Para raios nuvem-solo positivos.



Fonte: Do autor.

Figura 99 – Relação entre a média aritmética da corrente de pico e intervalos de distância de 50 km, variando de 0 a 500 km. Para CIDs.



Fonte: Do autor.

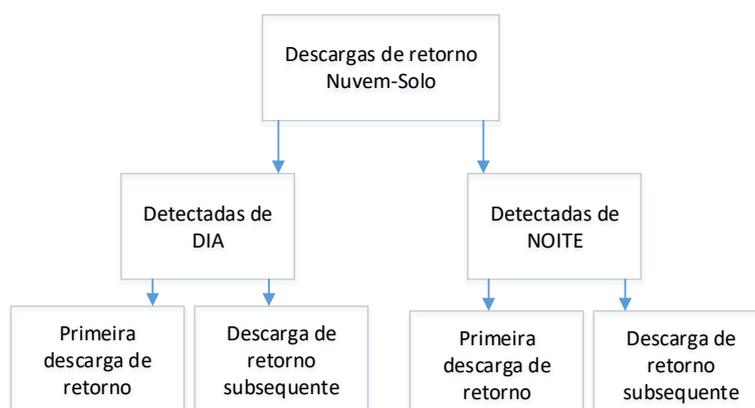
Os histogramas de número de eventos e média de corrente de pico versus distância refletem o comportamento de um sistema de detecção de raios contendo um único sensor, isto é, eventos distantes (maior que 200 km) são detectados em menor quantidade e com correntes mais elevadas, já eventos muito próximos aparecem em menor quantidade devido a saturação do sistema e a probabilidade de ocorrência em uma região menor.

8.6.1 Assinatura de formas de onda do campo elétrico gerado por raios no domínio do tempo e da frequência.

Utilizando o banco de dados, agrupou-se as formas de onda com mesmas características para gerar uma forma de onda padrão para cada agrupamento. Essa abordagem foi realizada tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Para as descargas nuvem-solo positivas (-CG) e negativas (-CG) os agrupamentos foram gerados por intervalos de distâncias, período de ocorrência (noturno ou diurno) e foi considerado se o evento era uma descarga subsequente ou uma primeira descarga de retorno (Figura 100).

Para os CIDs foi considerado somente o agrupamento quanto a distância de ocorrência.

Figura 100 – Ilustração da subdivisão dos agrupamentos gerados para descargas nuvem-solo positivas e negativas para cada intervalo de distância.



Fonte: Do autor.

Assinaturas características das formas de onda do campo elétrico de diferentes descargas atmosféricas no domínio do tempo e da frequência, são importantes para a identificação dos diferentes tipos de descargas pelos sistemas de detecção e localização de raios.

As assinaturas das formas de onda do campo elétrico, tanto no domínio do tempo quanto da frequência, podem ser identificadas pelo traçado preto nos gráficos relacionados no apêndice B. O traçado preto é composto pela média aritmética de cada instante de tempo (t) das formas de onda dentro de um mesmo grupo. As formas de onda foram traçadas em diferentes cores com uma linha mais fina. Cada grupo é formado por um intervalo de distância indicado em cada figura. É também indicada a quantidade de eventos que compõem cada grupo (N) e as médias aritméticas das distâncias e dos picos de corrente dos elementos do grupo.

Todos os eventos foram registrados em uma banda relativamente larga (160 Hz a 500 kHz) pelo LDWSS. As figuras com todos os agrupamentos encontram-se no apêndice B.

8.6.1.1 Raios nuvem-solo negativos (-CG)

Os raios nuvem-solo negativos (-CG) foram divididos em quatro grupos, levando-se em conta o período de observação (diurno ou noturno) e se eram primeiras ou subsequentes descargas de retorno. O grupo 1 contém as primeiras descargas de retorno observadas de dia, o grupo 2 as descargas subsequentes observadas de dia, o grupo 3 as primeiras descargas de retorno observadas de noite e o grupo 4 contém as descargas subsequentes observadas de noite.

Devido à grande quantidade de eventos –CG, optou-se pela divisão das distâncias em: 0 a 20 km; 20 a 40 km; 40 a 60 km; 60 a 100 km; 100 a 150 km; 150 a 200 km; 200 a 300 km; 300 a 400 km e; 400 a 500 km.

8.6.1.2 Raios nuvem-solo positivos (+CG)

Os raios nuvem-solo positivos (+CG) foram divididos nos mesmo subgrupos dos (-CG), porém devido ao número reduzido de eventos (+CG) optou-se pela seguinte subdivisão dos grupos de distâncias: 0 a 100 km; 100 a 200 km; 200 a 300 km; 300 a 400 km e; 400 a 500 km. Mesmo com essa subdivisão, houveram agrupamentos sem eventos para representa-los.

8.6.1.3 CIDs

Para os CIDs foi considerado somente o agrupamento quanto a distância de ocorrência. Optou-se pela seguinte subdivisão dos grupos de distâncias: 0 a 100 km; 100 a 200 km; 200 a 300 km; 300 a 400 km e; 400 a 500 km.

8.6.1.4 Discussão

Analisando as figuras do Apêndice B, observa-se um pico no espectro de frequência em aproximadamente 150 kHz. Esse pico está relacionado a ruídos dos sistemas de digitalização. Para identificar a origem do ruído, desconectou-se o pré-amplificador da unidade principal do LDWSS e registrou-se janelas de 5 ms com a entrada em aberto. Após analisar os sinais digitalizados, verificou-se que o ruído em aproximadamente 150 kHz persistia. Esse ruído ocorre, principalmente, devido a utilização de circuitos a capacitor chaveado, porém, não afeta a integridade da forma de onda no domínio do tempo.

Das assinaturas características dos raios nuvem-solo negativos e positivos, pode-se inferir que apresentam características muito parecidas no domínio da frequência para os mesmos intervalos de distâncias. Aparentemente, o comportamento apresentado nos espectros de frequência indica uma “modulação” das formas de onda devido ao guia de onda formado pela Terra e Ionosfera.

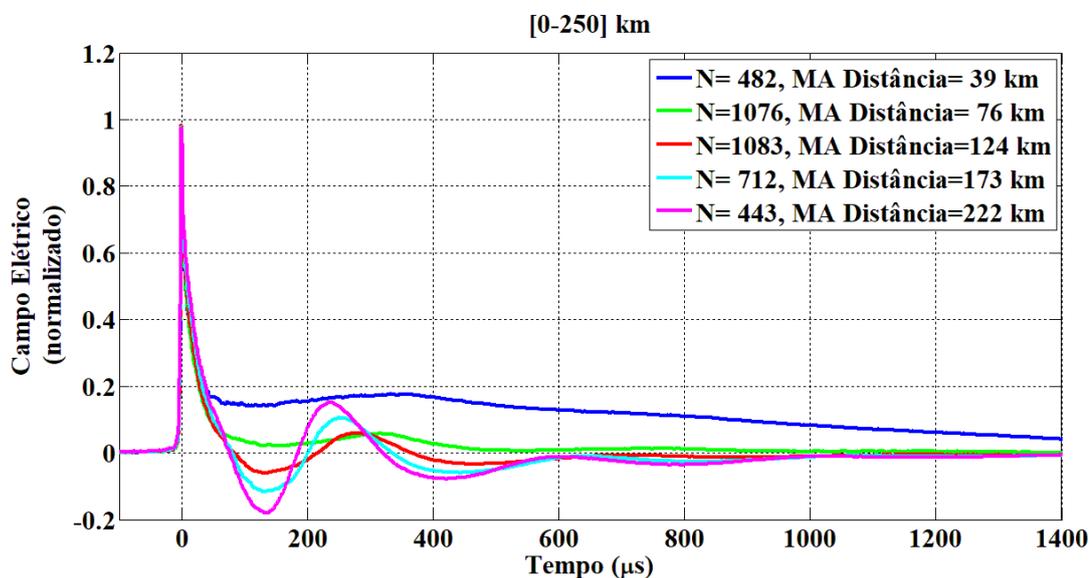
No domínio do tempo, formas de onda de -CG e +CG diferem entre si, basicamente, pela polaridade da onda direta, ou pico inicial. As formas de onda de –CG têm sua polaridade

positiva e as de +CG têm sua polaridade negativa, considerando a convenção da eletricidade atmosférica na medição das formas de onda do campo elétrico.

As assinaturas das descargas do tipo CID não apresentaram diferenças significativas no domínio do tempo para diferentes distâncias de observação. Aparentemente, formas de onda de campos elétricos gerados por fontes elevadas sofrem menos modificações, pois o campo registrado é devido principalmente a componente radiação. Uma pequena diferença pode ser notada nas posições dos pares das reflexões ionosféricas, porém, a onda direta para todos os intervalos de distâncias encontra-se quase que inalterada.

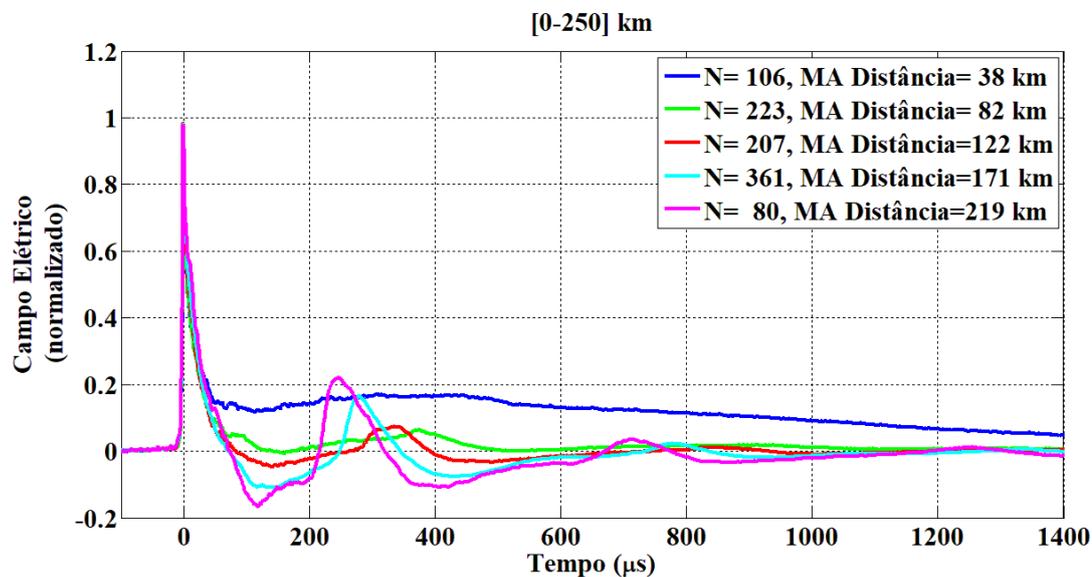
A fim de avaliar as variações das formas de onda de descargas nuvem-solo negativas com a distância, traçou-se para cada intervalo de 50 km uma forma de onda média, que representa esse intervalo. Foram considerados os mesmos agrupamentos utilizados para gerar a forma de onda característica (período de ocorrência, noturno ou diurno, e sequência de ocorrência, subsequente ou primeira descarga de retorno).

Figura 101 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 50 km variando de 0 a 250 km para primeiras descargas de retorno em raios nuvem-solo negativos (-CG) observados no período diurno.



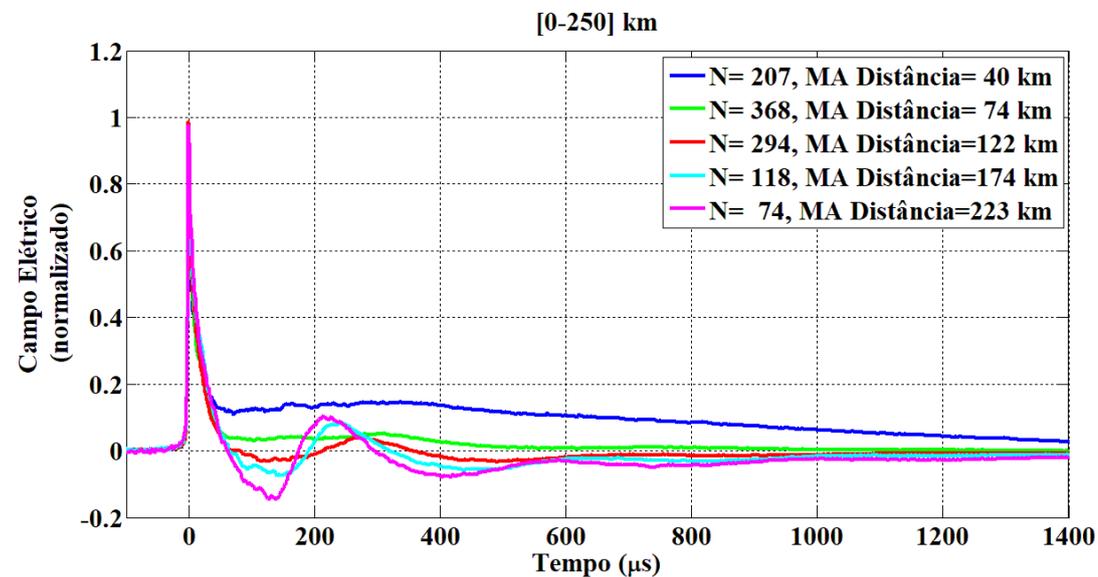
Fonte: Do autor.

Figura 102 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 50 km variando de 0 a 250 km para primeiras descargas de retorno em raios nuvem-solo negativos (-CG) observados no período noturno.



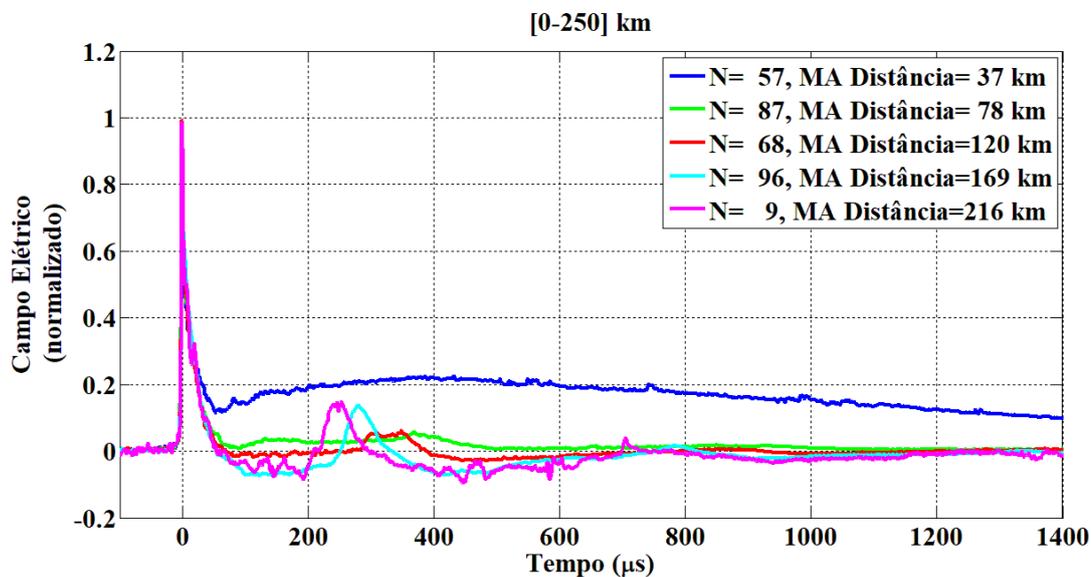
Fonte: Do autor.

Figura 103 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 50 km variando de 0 a 250 km para descargas de retorno subsequentes em raios nuvem-solo negativos (-CG) observados no período diurno.



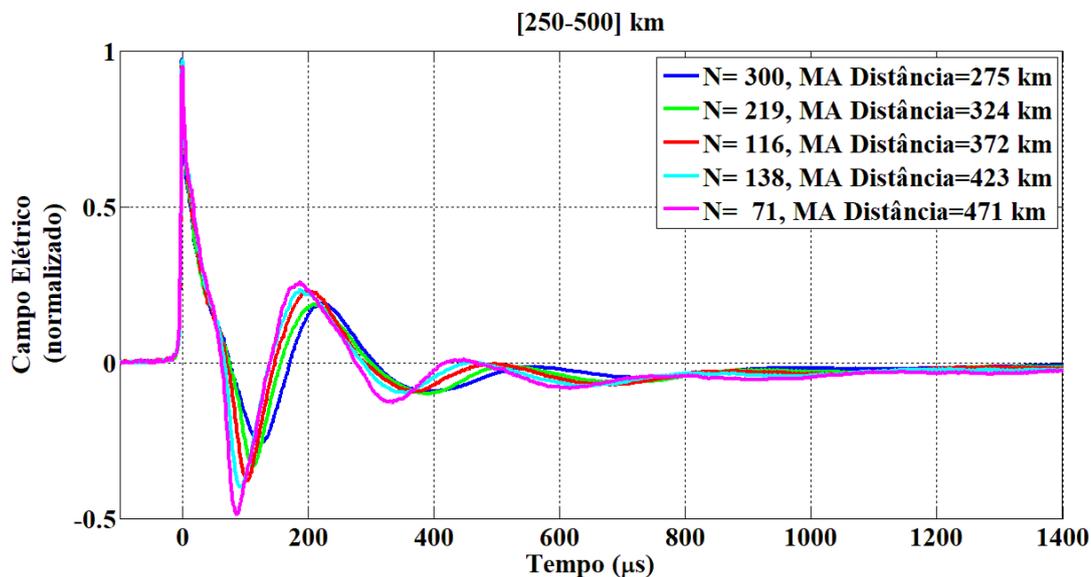
Fonte: Do autor.

Figura 104 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 50 km variando de 0 a 250 km para descargas de retorno subsequentes em raios nuvem-solo negativos (-CG) observados no período noturno.



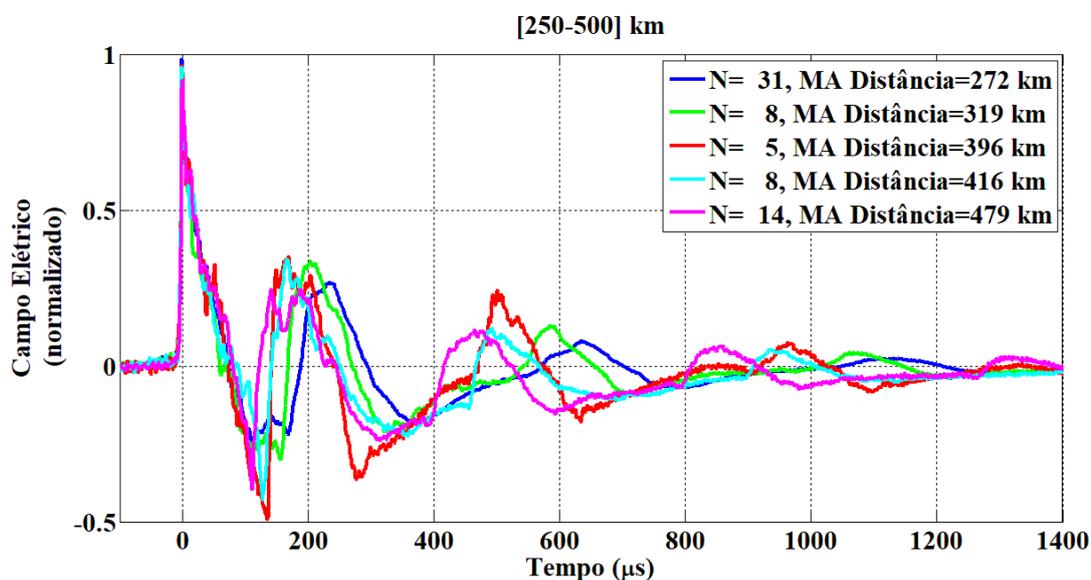
Fonte: Do autor.

Figura 105 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 50 km variando de 250 a 500 km para primeiras descargas de retorno em raios nuvem-solo negativos (-CG) observados no período diurno.



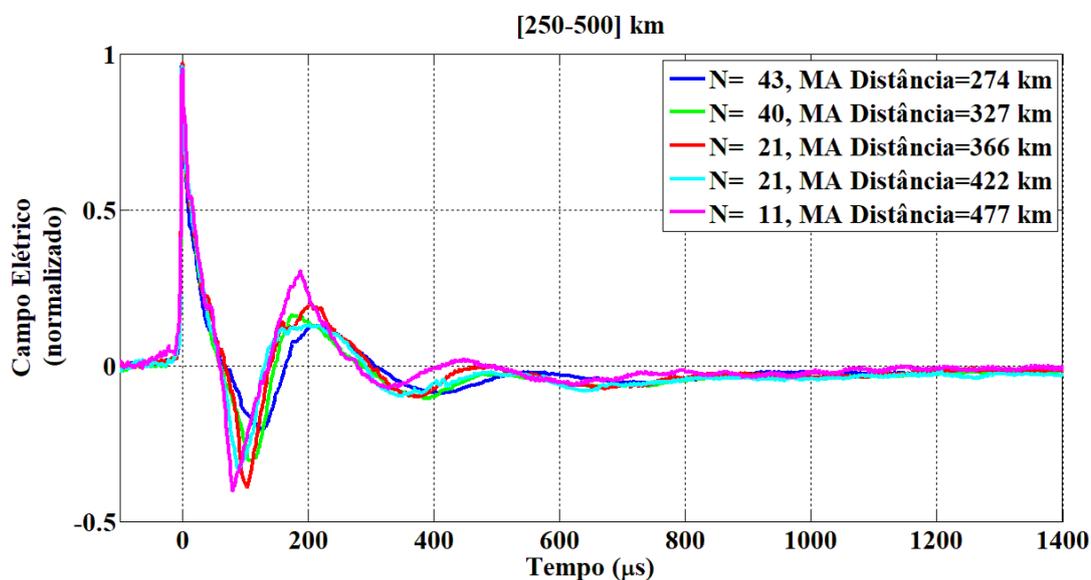
Fonte: Do autor.

Figura 106 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 50 km variando de 250 a 500 km para primeiras descargas de retorno em raios nuvem-solo negativos (-CG) observados no período noturno.



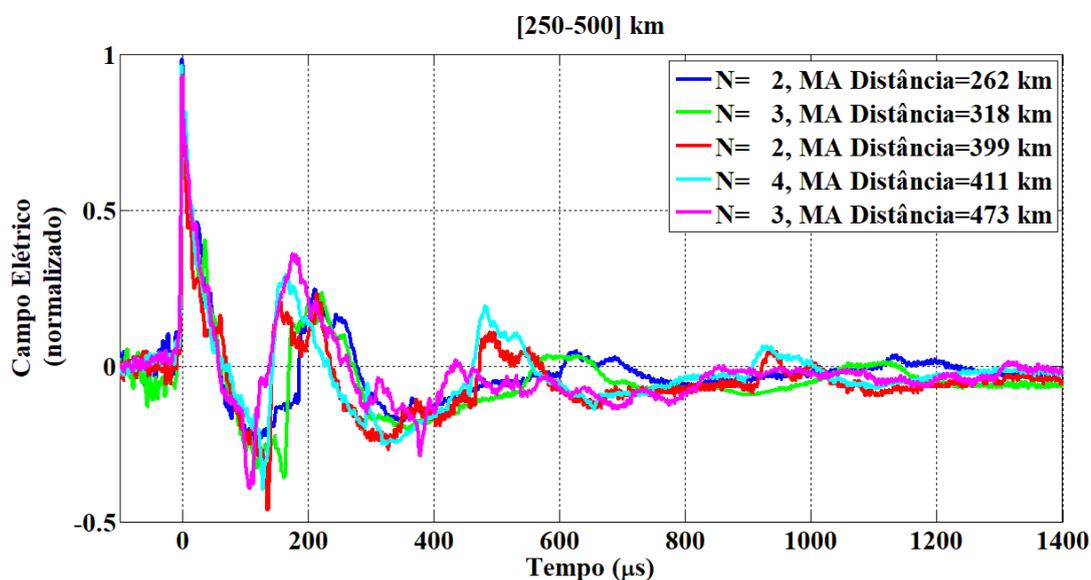
Fonte: Do autor.

Figura 107 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 50 km variando de 250 a 500 km para descargas de retorno subsequentes em raios nuvem-solo negativos (-CG) observados no período diurno.



Fonte: Do autor.

Figura 108 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 50 km variando de 250 a 500 km para descargas de retorno subsequentes em raios nuvem-solo negativos (-CG) observados no período noturno.



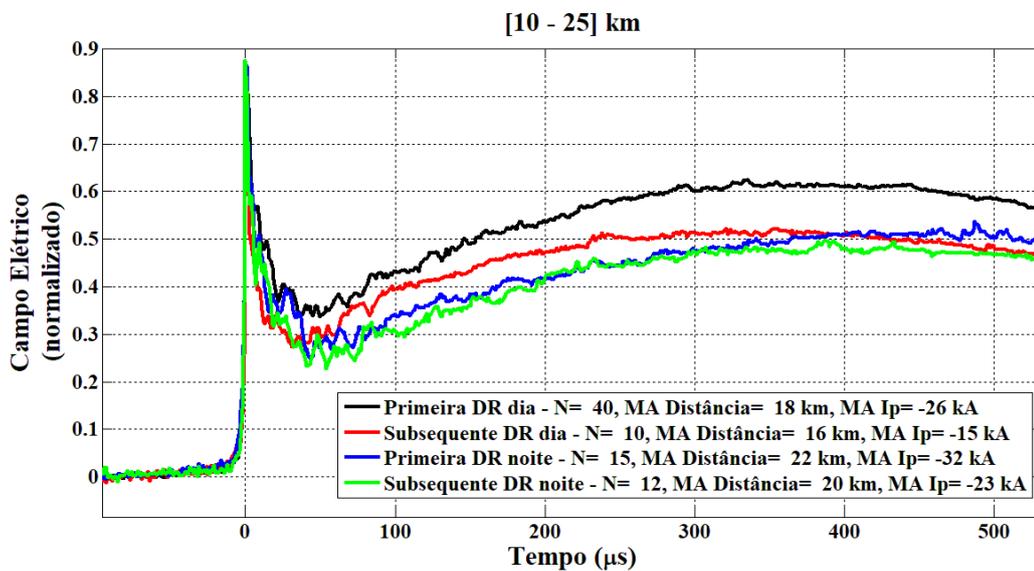
Fonte: Do autor.

Com o auxílio das Figuras 101, 102, 103 e 104 (traçado azul), pode-se notar que a componente eletrostática está presente tanto em formas de onda observadas no período noturno quanto no diurno e em descargas de retorno subsequentes e primeiras.

Para todos os agrupamentos, a principal diferença entre as formas de onda, considerando somente a variação da distância, é o deslocamento do pico referente às ondas céu. Em todos os casos, a onda céu se desloca em direção a onda-chão, conforme aumenta a distância de ocorrência do raio.

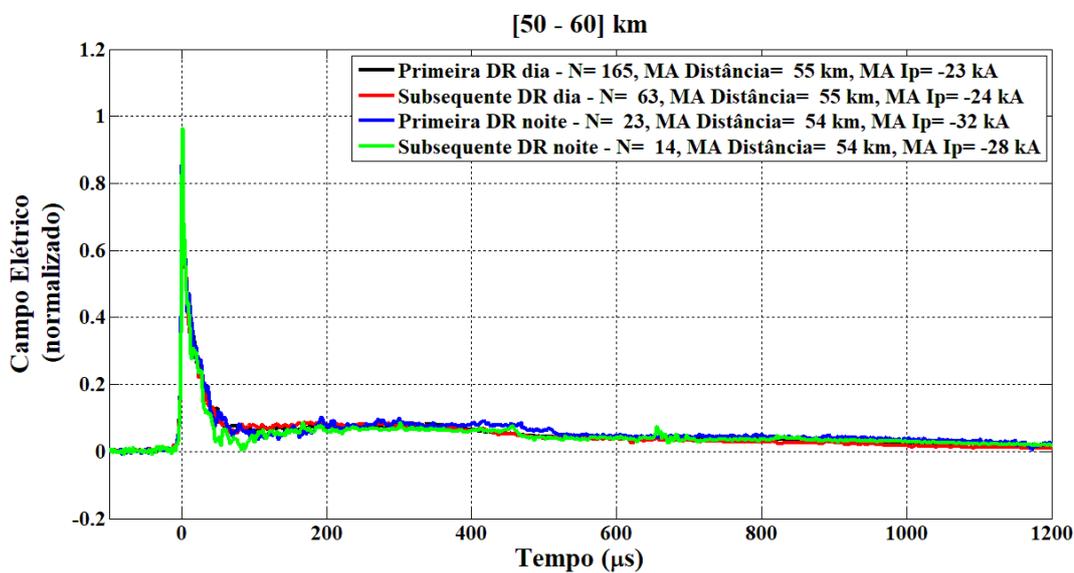
A fim de avaliar a diferença das formas de onda de cada agrupamento, traçou-se essas formas de onda em um mesmo gráfico, admitindo uma mesma distância. Os intervalos de distância adotados foram: 10 a 25 km; 50 a 60 km; 100 a 110; 150 a 160 km e; 200 a 250 km. Foram admitidos intervalos de distâncias pequenas, que tinham uma quantidade razoável de eventos em cada agrupamento.

Figura 109 – Comparação entre as formas de primeiras e subsequentes descargas de retorno negativas (-CG) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 10 e 25 km.



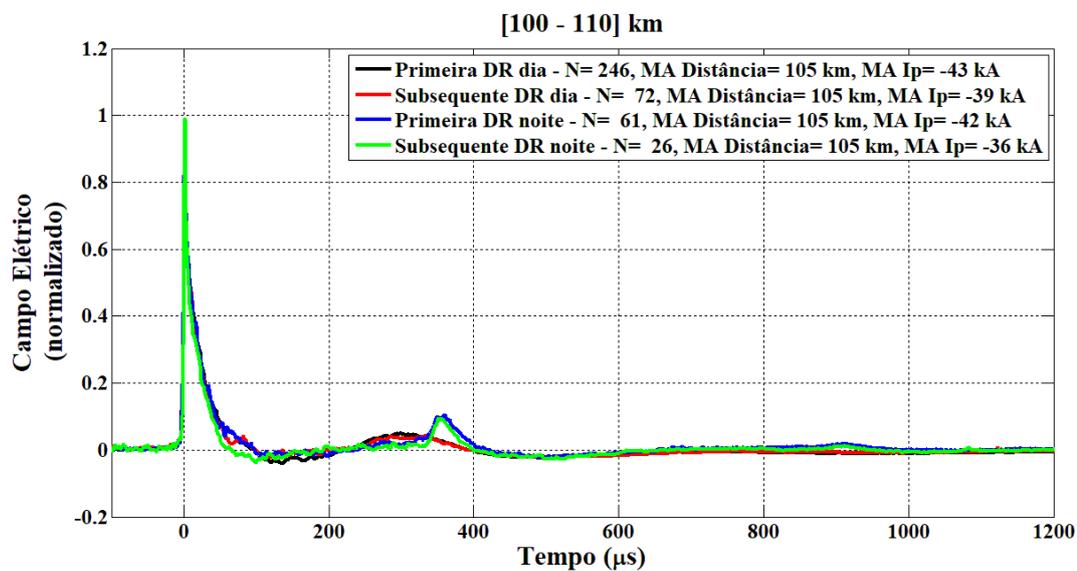
Fonte: Do autor.

Figura 110 – Comparação entre as formas de primeiras e subsequentes descargas de retorno negativas (-CG) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 50 e 60 km.



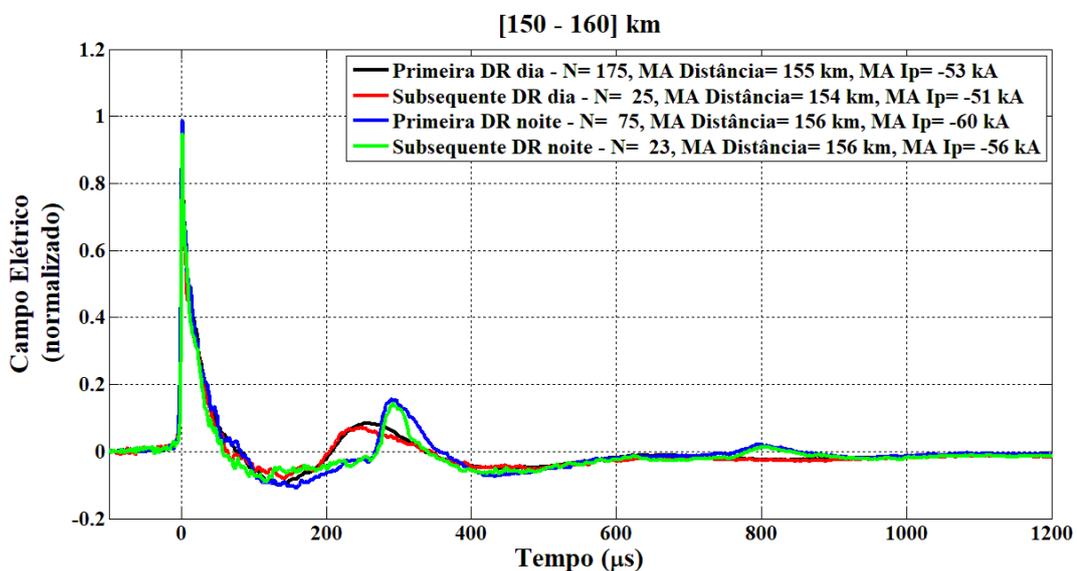
Fonte: Do autor.

Figura 111 – Comparação entre as formas de primeiras e subsequentes descargas de retorno negativas (-CG) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 100 e 110 km.



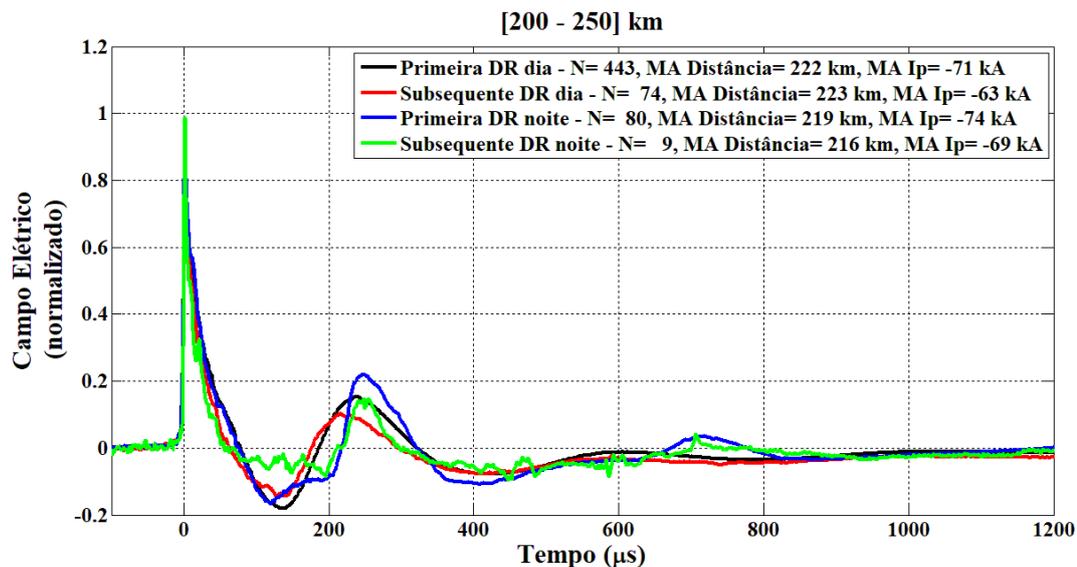
Fonte: Do autor.

Figura 112 – Comparação entre as formas de primeiras e subsequentes descargas de retorno negativas (-CG) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 150 e 160 km.



Fonte: Do autor.

Figura 113 – Comparação entre as formas de primeiras e subsequentes descargas de retorno negativas (-CG) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 200 e 250 km.



Fonte: Do autor.

A componente eletrostática está presente para os quatro agrupamentos na Figura 109, exemplificando que essa componente não sofre influência do período de observação e nem da sequência de ocorrência.

Até aproximadamente 60 km, as formas de onda para os quatro agrupamentos não apresentam picos devido a reflexões ionosféricas. Percebe-se apenas uma pequena variação quanto a largura de pulso da onda-chão.

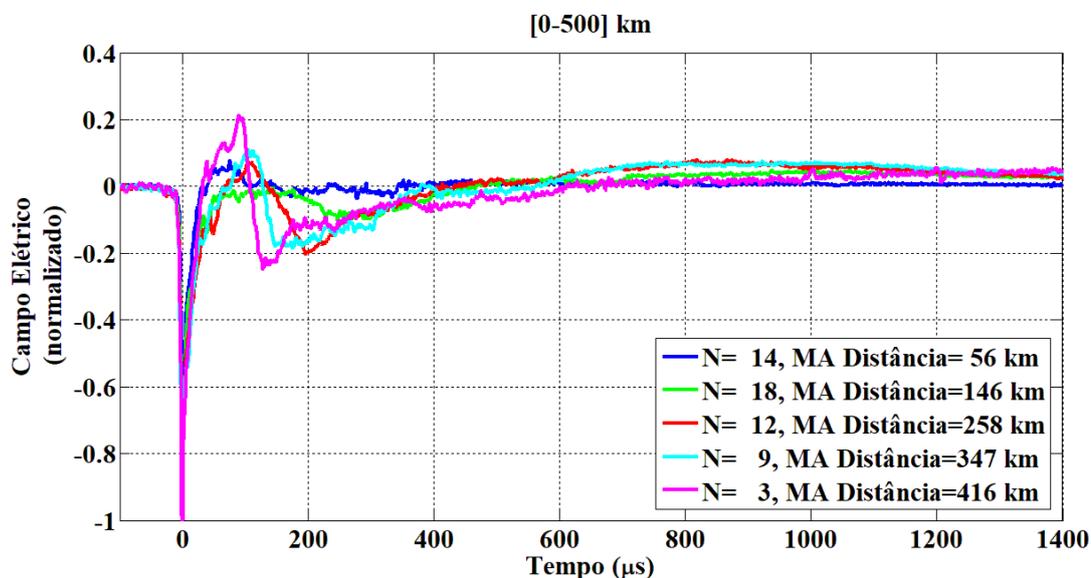
Nas Figuras 111, 112 e 113 observa-se o nítido deslocamento da onda céu, quanto ao período de observação. Tendo as formas de onda observadas no período noturno, um pico mais evidente, tanto para primeiras ou subsequentes descargas de retorno.

Pode-se observar, principalmente na Figura 113, um deslocamento entre os picos da onda céu devido às descargas subsequentes e primeiras, sendo que as ondas céu devido as descargas subsequentes ocorrem primeiro, ou em outras palavras, estão mais próximas da onda de chão. Isso foi observado em outros trabalhos (SOMU et al., 2015), e influencia na medição da altura da ionosfera utilizando formas de onda de campo elétrico de primeiras descargas de retorno e subsequentes.

O mesmo estudo comparativo foi realizado para os raios nuvem-solo positivos, porém devido a baixa quantidade de eventos, o intervalo de distância adotado foi de 100 km, diferente do intervalo de 50 km adotado para os raios nuvem-solo negativos. Mesmo considerando um

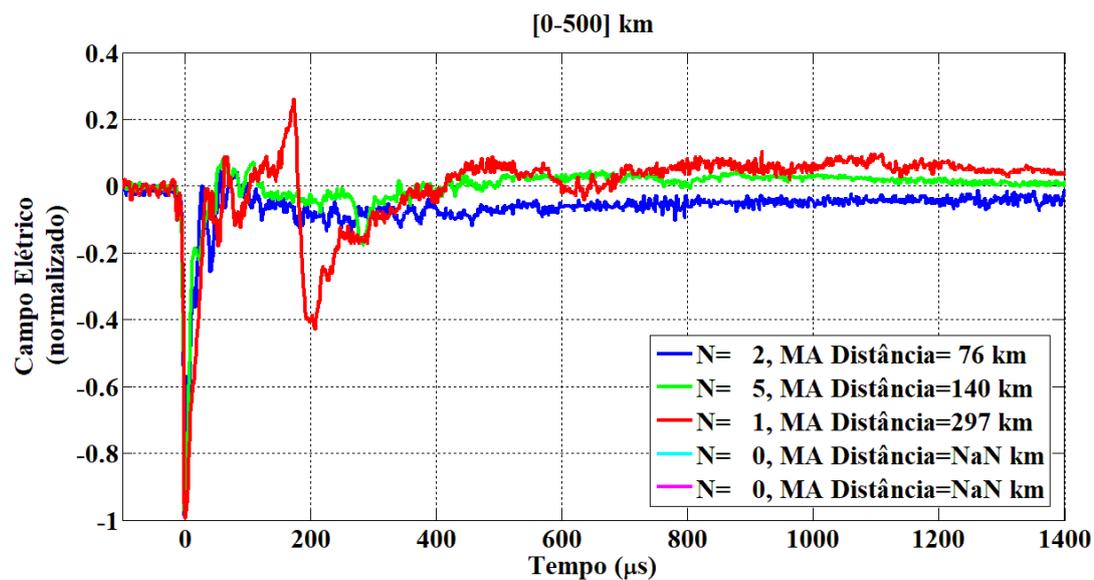
amplo intervalo de distâncias para cada agrupamento, ainda se verifica agrupamentos sem elementos.

Figura 114 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 100 km variando de 0 a 500 km para primeiras descargas de retorno em raios nuvem-solo positivos (+CG) observados no período diurno.



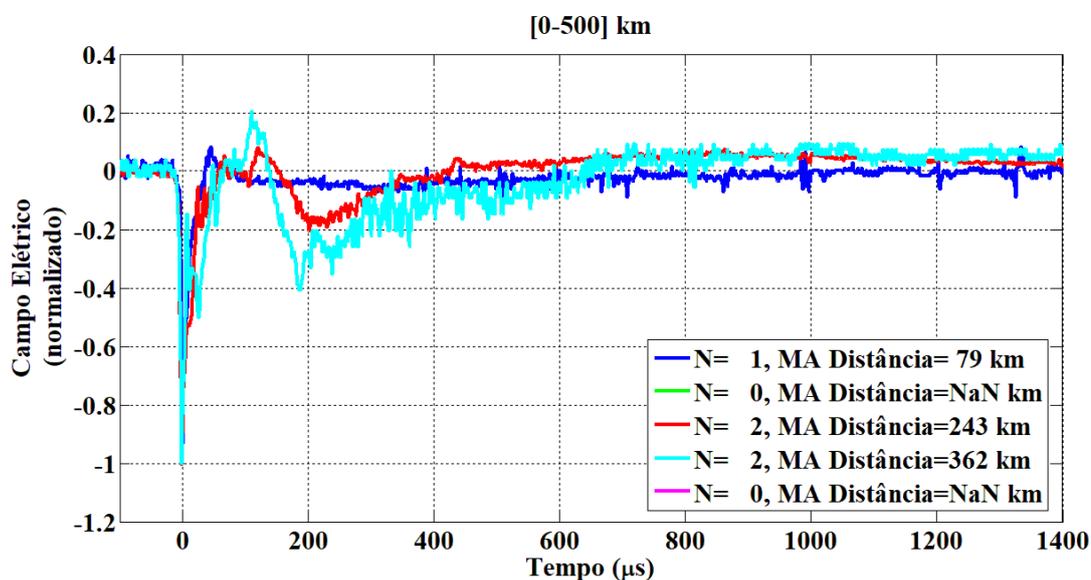
Fonte: Do autor.

Figura 115 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 100 km variando de 0 a 500 km para primeiras descargas de retorno em raios nuvem-solo positivos (+CG) observados no período noturno.



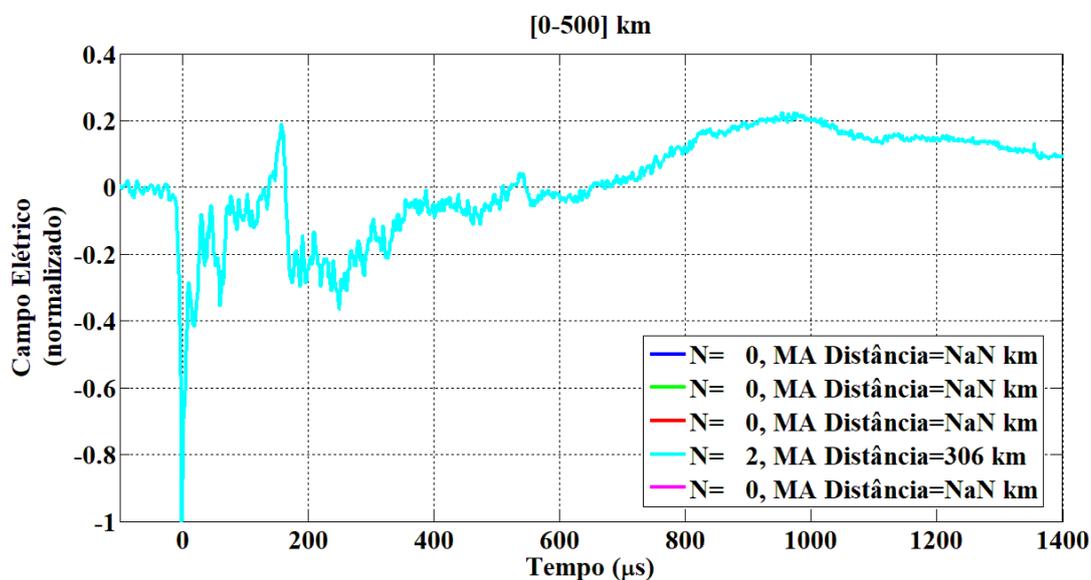
Fonte: Do autor.

Figura 116 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 100 km variando de 0 a 500 km para descargas de retorno subsequentes em raios nuvem-solo positivos (+CG) observados no período diurno.



Fonte: Do autor.

Figura 117 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 100 km variando de 0 a 500 km para descargas de retorno subsequentes em raios nuvem-solo positivos (+CG) observados no período noturno.



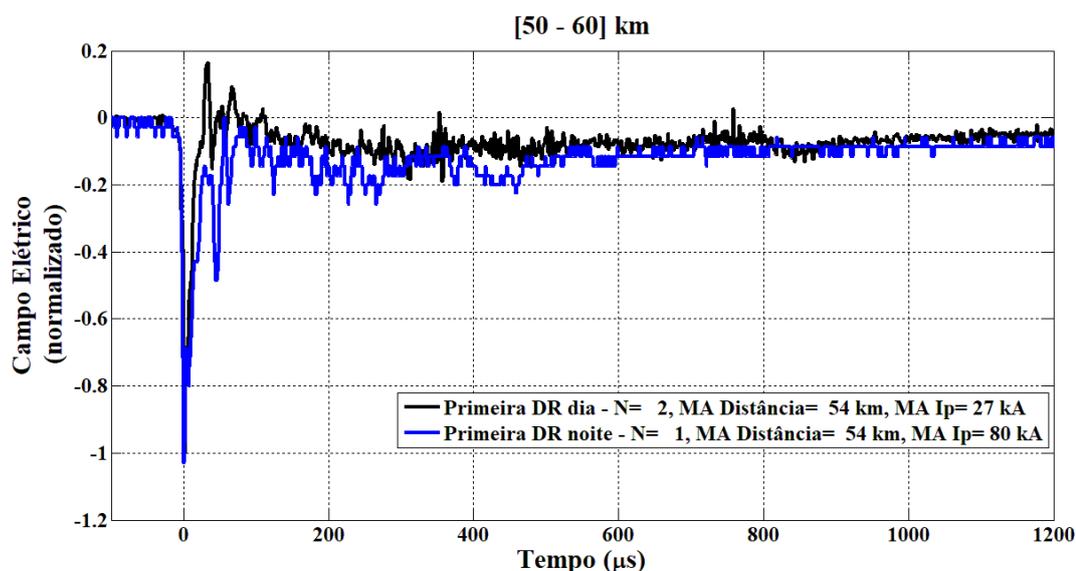
Fonte: Do autor.

Assim como nos eventos (-CG), as formas de onda dos (+CG) apresentaram o deslocamento da onda céu, conforme a variação da distância. Esse comportamento foi observado para todos os agrupamentos.

Devido ao baixo número de eventos (+CG) na base de dados, não existem intervalos de distâncias com os quatro agrupamentos. Por isso, optou-se por fazer as comparações para o mesmo intervalo de distância apenas entre eventos detectados de noite e de dia, ou entre descargas de retorno primeiras e subsequentes.

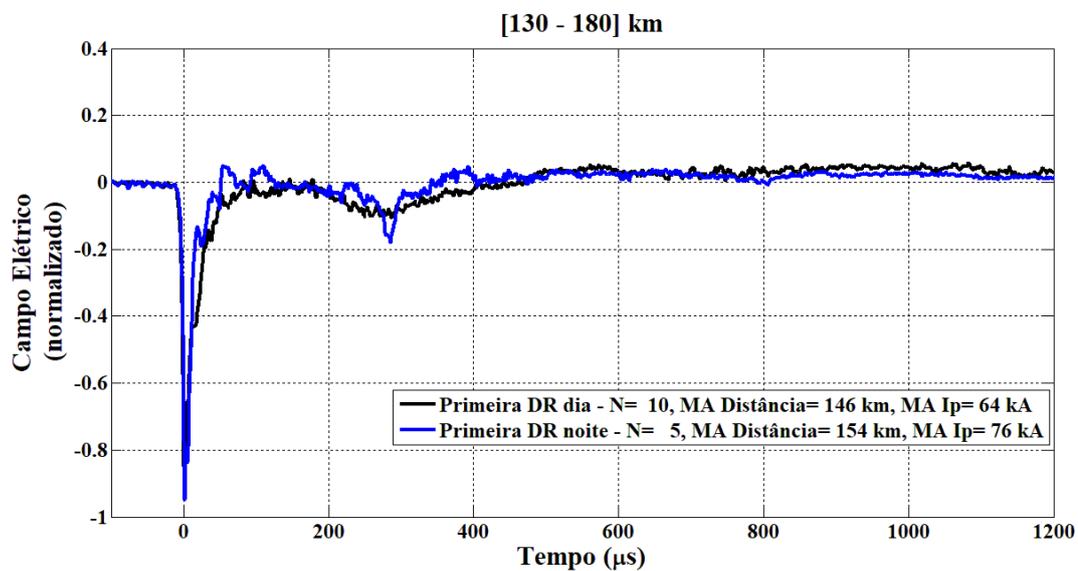
Primeiramente, apresenta-se a comparação entre primeiras descargas de retorno detectadas de dia e de noite, e em seguida entre primeiras e subsequentes descargas de retorno detectadas durante o dia.

Figura 118 – Comparação entre as formas de primeiras descargas de retorno positivas (+CG) observadas no período diurno e noturno no intervalo de distância entre 50 e 60 km.



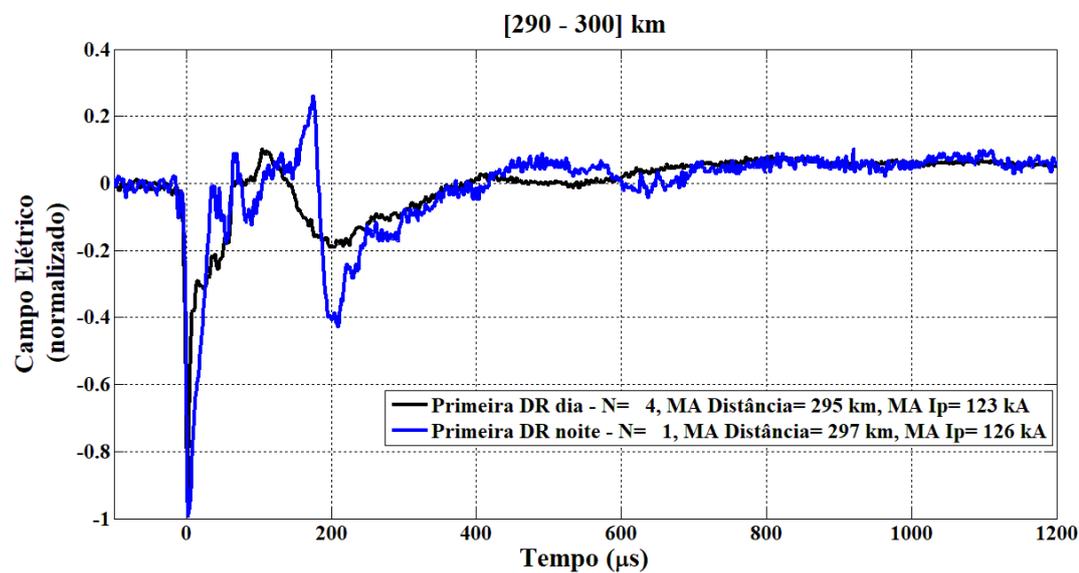
Fonte: Do autor.

Figura 119 – Comparação entre as formas de primeiras descargas de retorno positivas (+CG) observadas no período diurno e noturno no intervalo de distância entre 130 e 180 km.



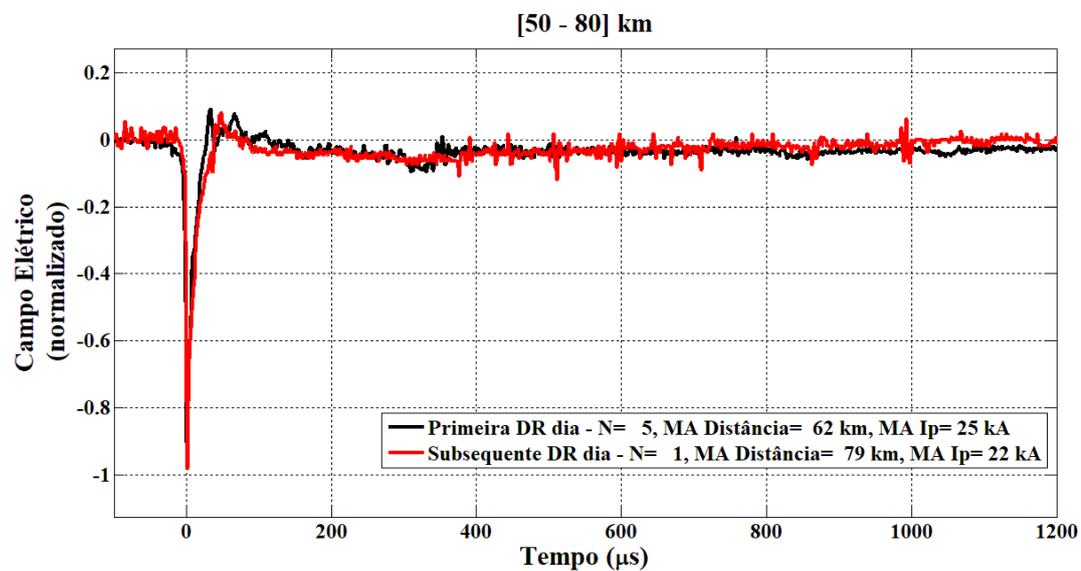
Fonte: Do autor.

Figura 120 – Comparação entre as formas de primeiras descargas de retorno positivas (+CG) observadas no período diurno e noturno no intervalo de distância entre 290 e 300 km.



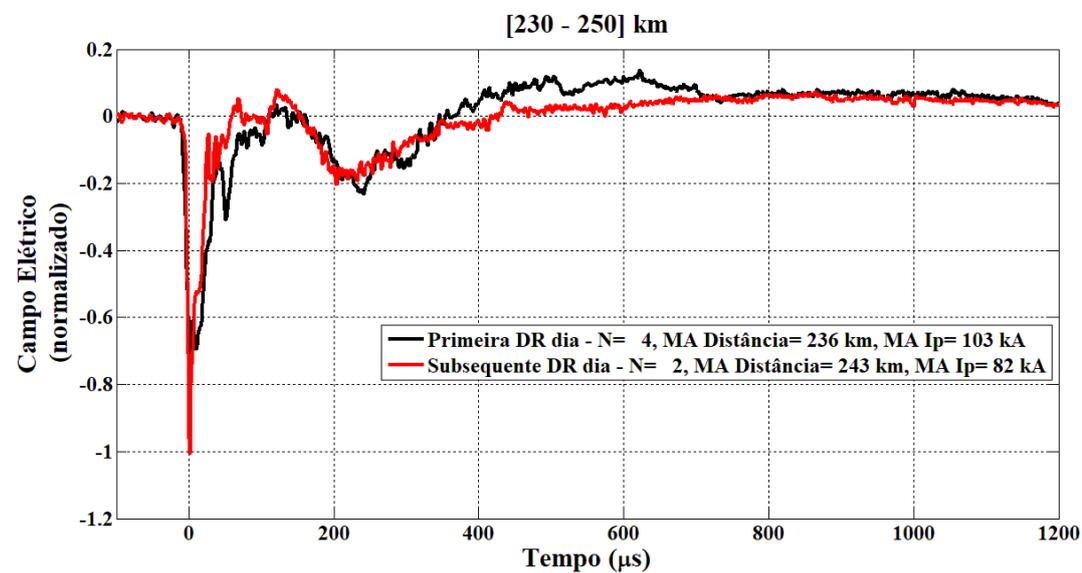
Fonte: Do autor.

Figura 121 – Comparação entre as formas de primeiras e subsequentes descargas de retorno positivas (+CG) observadas no período diurno no intervalo de distância entre 50 e 80 km.



Fonte: Do autor.

Figura 122 – Comparação entre as formas de primeiras e subsequentes descargas de retorno positivas (+CG) observadas no período diurno no intervalo de distância entre 230 e 250 km.



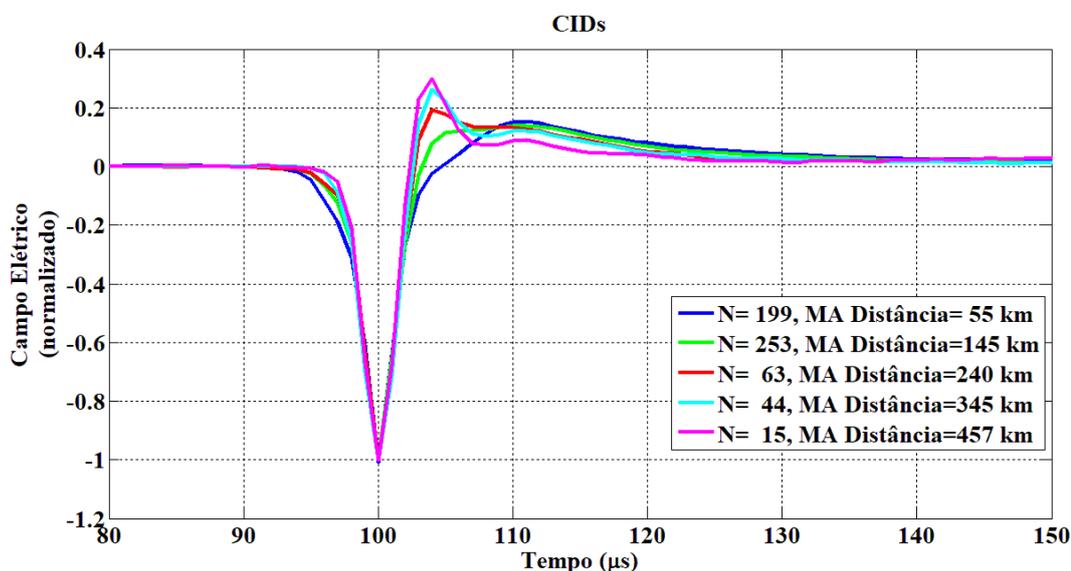
Fonte: Do autor.

O comportamento das formas de onda, geradas por raios nuvem-solo positivos para um mesmo intervalo de distância, é semelhante ao observado em raios nuvem-solo negativos. A primeira onda céu é mais evidente quando o evento ocorre no período noturno. Para curtas distâncias e as formas de onda são muito semelhantes, independentemente do período de observação, a primeira onda céu de descargas de retorno subsequentes são ligeiramente mais próximas da onda de chão.

Os raios intra-nuvem (CIDs) foram analisados de maneira distinta dos raios nuvem-solo. Para esse tipo de descarga atmosférica, analisou-se o comportamento da forma de onda do campo elétrico com a distância (0 a 500 km), e as diferenças entre os eventos observados nos períodos noturno e diurno.

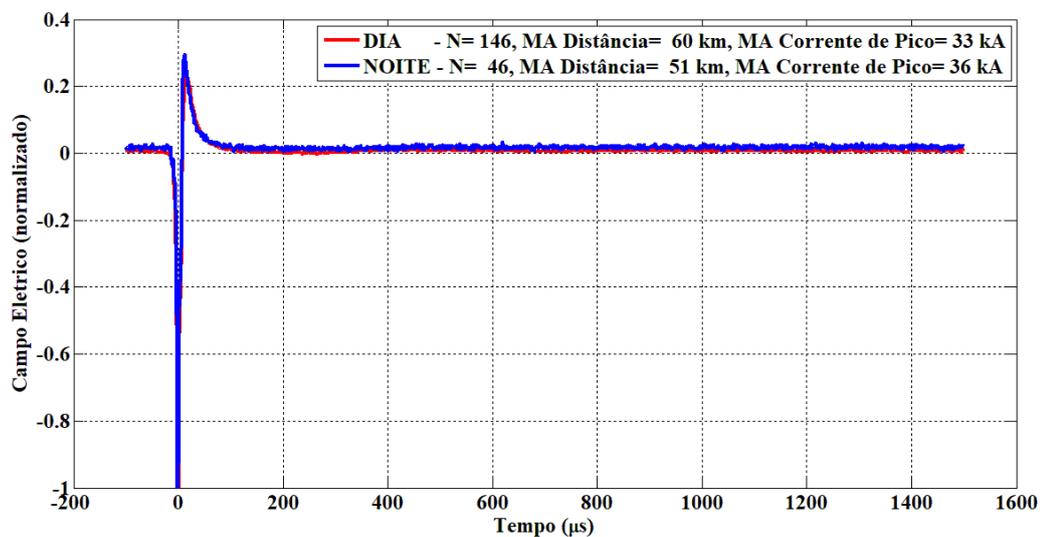
A primeira figura referente aos CIDs apresenta o comportamento do campo elétrico para o intervalo de 0 a 500 km, variando de 100 em 100km. Em seguida apresenta-se a diferença entre os eventos observados nos períodos diurno e noturno.

Figura 123 – Composição da forma de onda média para intervalos de distância de 100 km variando de 0 a 500 km para raios (CID).



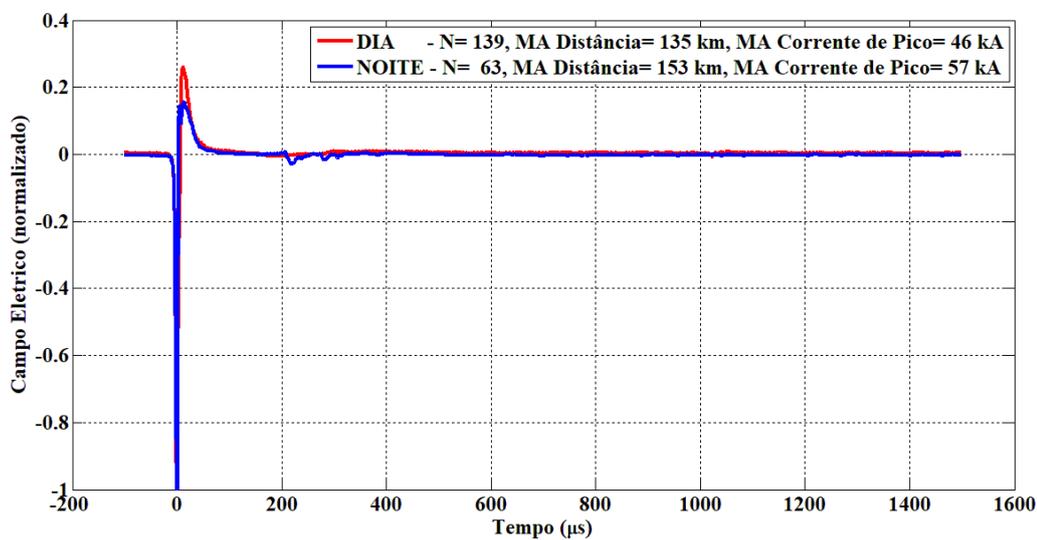
Fonte: Do autor.

Figura 124 – Comparação entre as formas de onda média para raios (CID) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 0 e 100 km



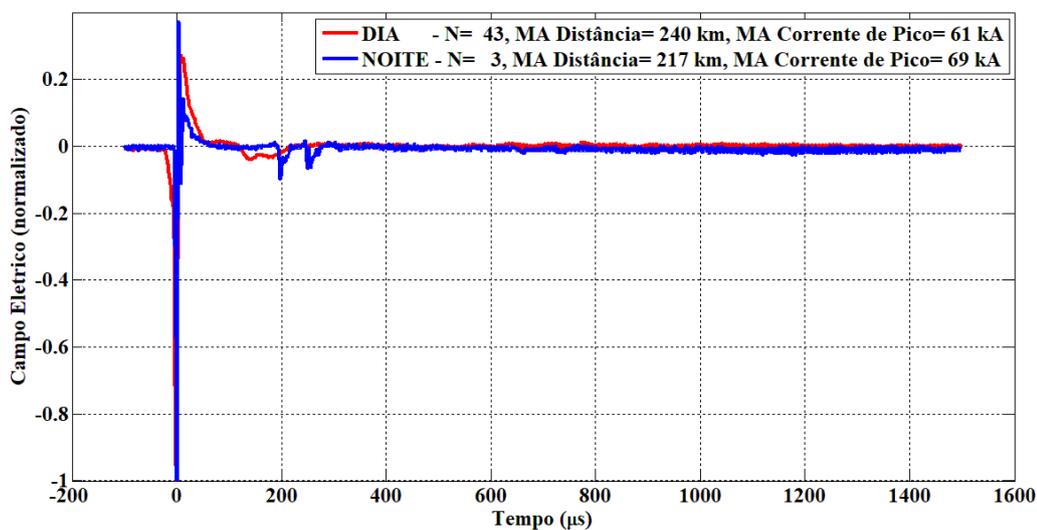
Fonte: Do autor.

Figura 125 – Comparação entre as formas de onda média para raios (CID) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 100 e 200 km



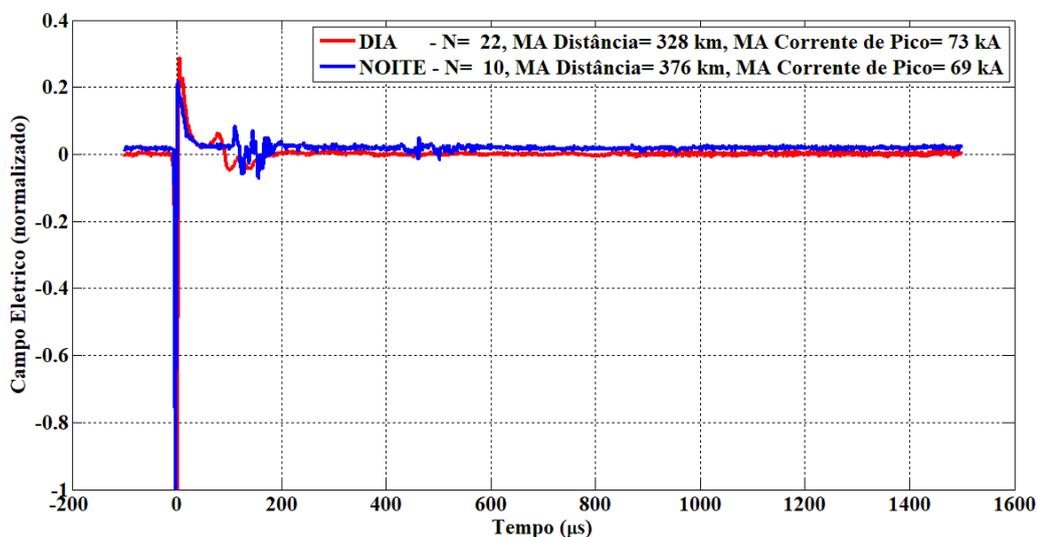
Fonte: Do autor.

Figura 126 – Comparação entre as formas de onda média para raios (CID) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 200 e 300 km.



Fonte: Do autor.

Figura 127 – Comparação entre as formas de onda média para raios (CID) observados nos períodos diurno e noturno, no intervalo de distância entre 300 e 400 km.



Fonte: Do autor.

Os CIDs são descargas atmosféricas que não tocam o solo, e nota-se que suas formas de onda não se alteram significativamente com a distância. A onda direta recebida pelo sensor é praticamente a mesma para todos os intervalos de distâncias observados. Porém, percebe-se

uma sutil variação de sua largura do pulso, sendo os CIDs detectados a curtas distâncias com pulsos mais largos, e os detectados a longas distâncias com pulsos mais estreitos.

A diferença entre as formas de onda será mais significativa nas ondas céu. Como apresentado em tópicos anteriores, fontes elevadas irão produzir pares de onda céu, esses pares se deslocam na direção da onda direta, conforme a distância de observação aumenta. Isso pode ser observado nas Figuras 124, 125, 126 e 127.

Outra característica observada, é que as forma de onda de CIDs também não se alteram significativamente quanto ao período de observação (manhã ou noite), porém, para o mesmo intervalo de distância, apresentam o par de ondas céu em posições diferentes para ondas observadas de dia e de noite. Isso ocorre, pois, a altura da ionosfera é diferente para o dia e para a noite.

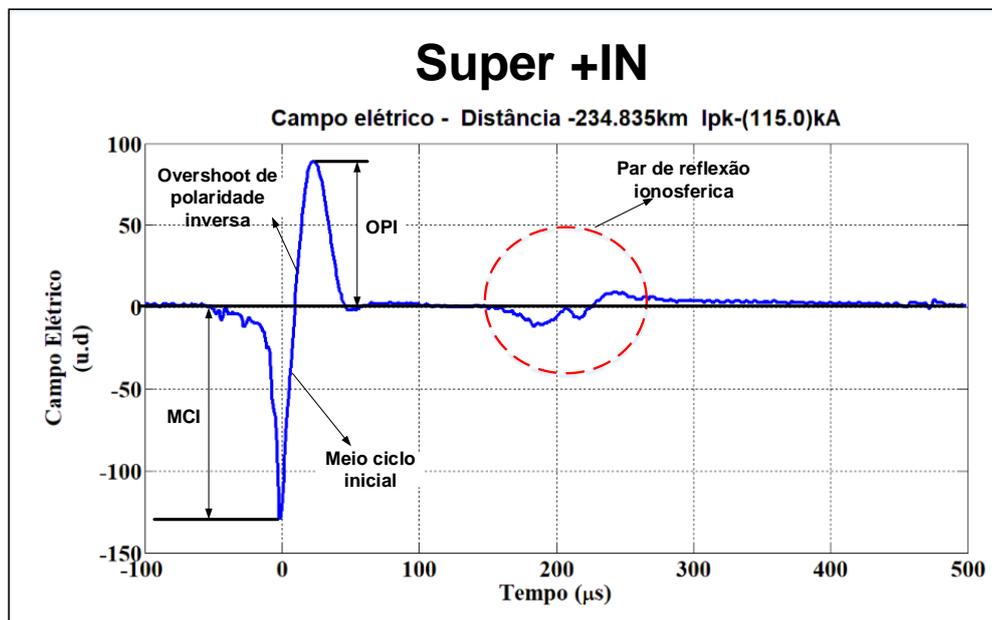
8.7 Super descargas nuvem (Super +IN)

Durante a construção do banco de dados de formas de onda de descargas atmosféricas, foram identificados eventos com altas correntes de pico, relatados pela NLDN como raios nuvem-solo positivos. Mas quando se analisou suas formas de onda no domínio do tempo, percebeu-se que na verdade eram eventos intra-nuvem.

Tal fato chamou atenção, pois não existem relatos desse tipo de descarga na literatura. Assim, este tópico apresenta os resultados preliminares das análises sobre essa classe de descargas atmosféricas intra-nuvem (IN) de alta intensidade que foi denominada de Super +IN.

Um exemplo de forma de onda “representativa” deste tipo de descarga é apresentado na Figura 128.

Figura 128 – Exemplo de uma forma de onda representativa de um Super +IN, com indicações de algumas características como: *Overshoot* de polaridade inversa (OPI), Meio ciclo inicial (MCI) e par de reflexão ionosférica.



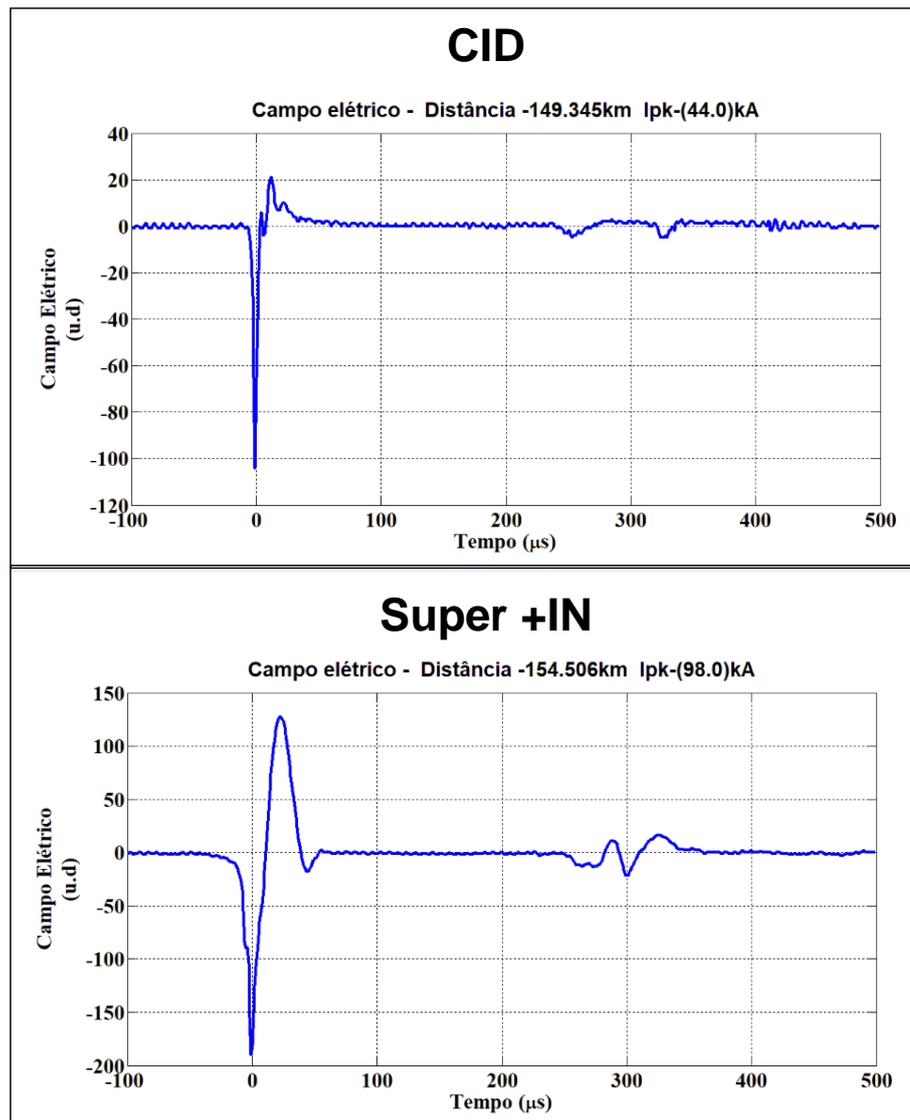
Fonte: Do autor.

8.7.1 Principais diferenças entre CIDs e as super descargas nuvem positivas

Outros tipos de descargas atmosféricas intra-nuvem também apresentam alta intensidade, tais como os CIDs, porém os Super +IN têm sua forma de onda no domínio do tempo diferente das formas de onda características dos CIDs.

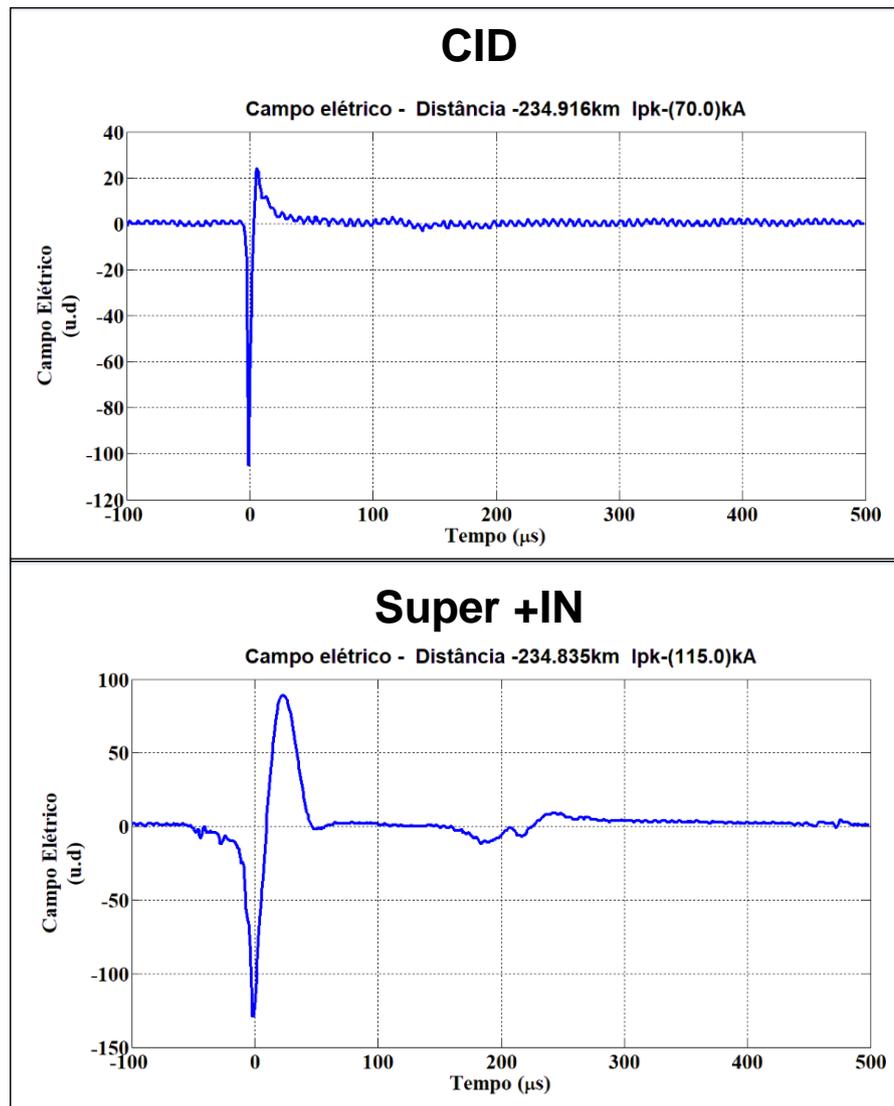
A fim de comparar as formas de onda dos CIDs e Super +IN, apresenta-se nas figuras que seguem quatro comparações de CIDs e Super +IN, detectados a distâncias similares.

Figura 129 – Exemplo de formas de onda de um CID em um Super +IN detectados a distâncias semelhantes entre 149 e 154 km.



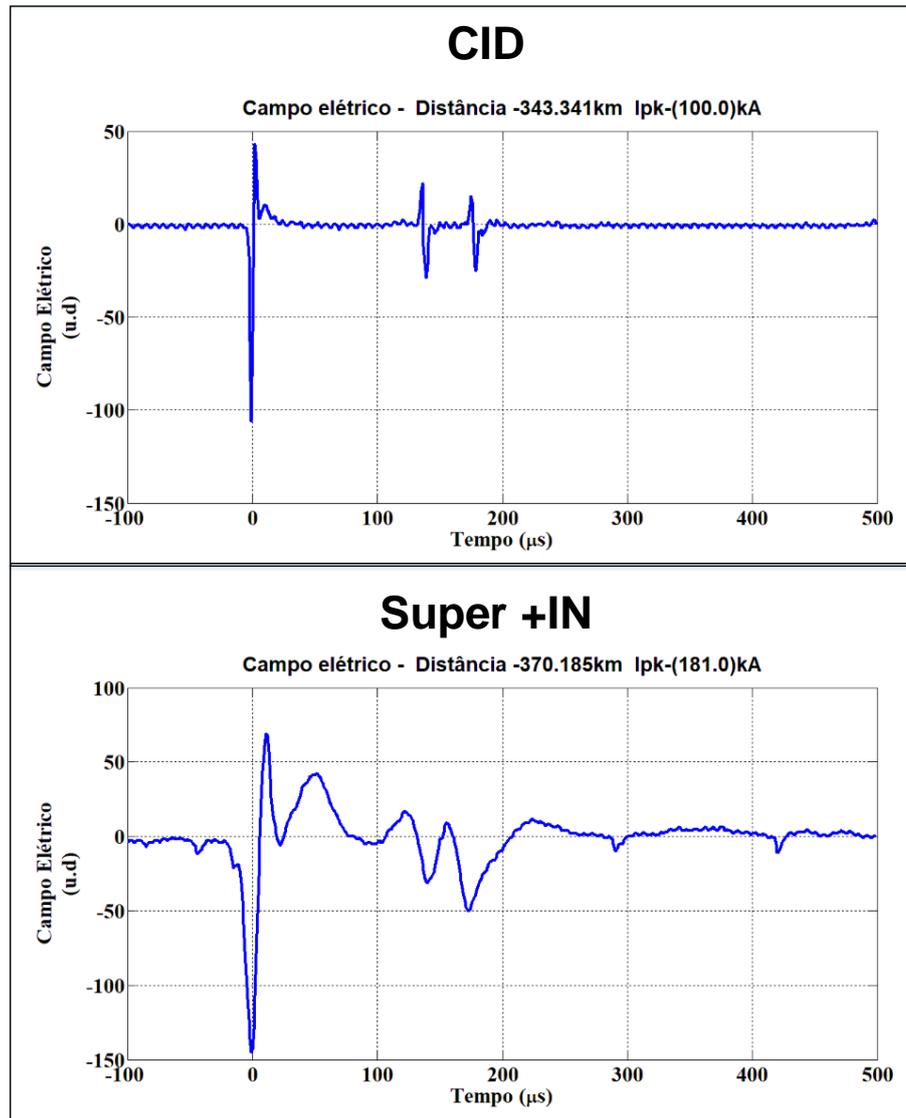
Fonte: Do autor.

Figura 130 – Exemplo de formas de onda de um CID em um Super +IN detectados a distância de 234 km.



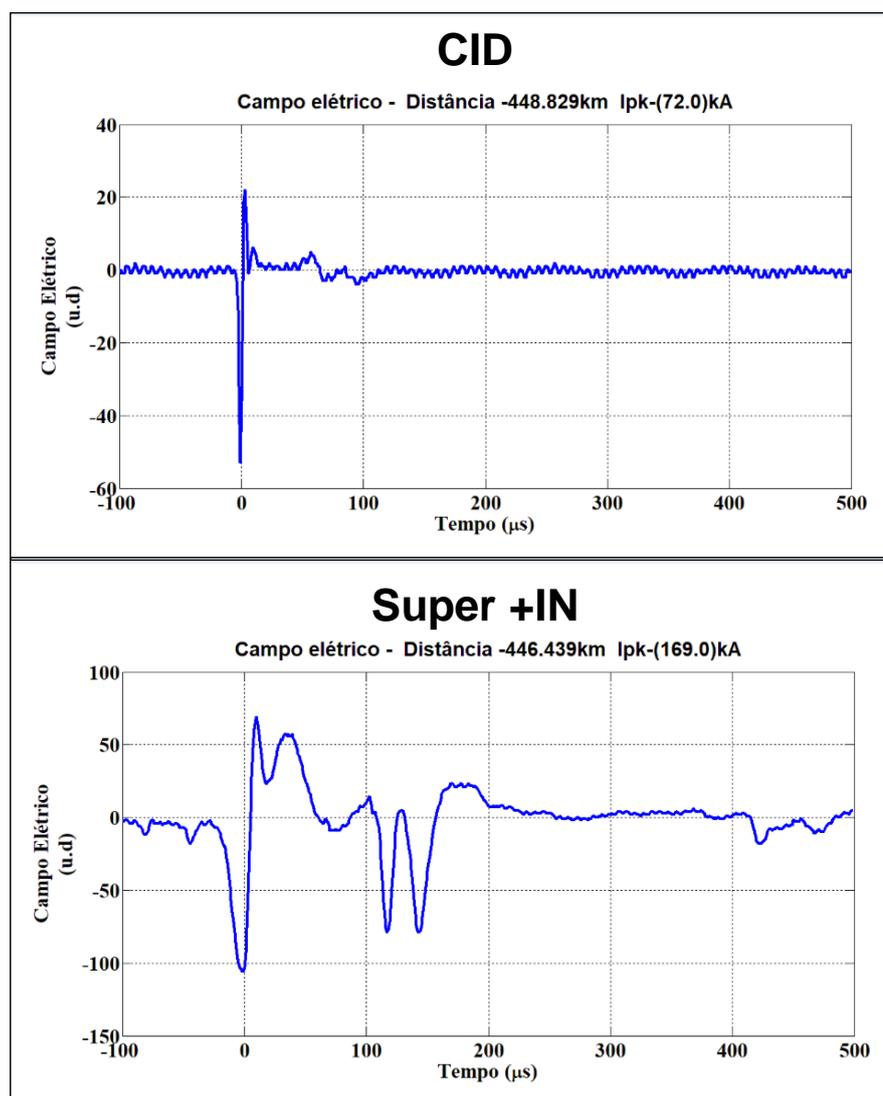
Fonte: Do autor.

Figura 131 – Exemplo de formas de onda de um CID em um Super +IN detectados a distâncias semelhantes.



Fonte: Do autor.

Figura 132 – Exemplo de formas de onda de um CID em um Super +IN detectados a distâncias semelhantes.



Fonte: Do autor.

Os Super +IN têm largura de pulso superior aos CIDs e apresentam a amplitude do *overshoot* de polaridade inversa (OPI) elevada, comparável com a do meio ciclo inicial (MCI). Uma das características das formas de onda dos Super +IN, que demonstra que eles são, de fato, descargas do tipo nuvem, é a presença de dois picos referentes a ondas céu, algo que ocorre somente quando a fonte do campo elétrico se encontra elevada em relação ao nível do solo.

Outra característica que diferencia os Super +IN dos CIDs é o seu contexto de ocorrência. CIDs tendem a ocorrer de forma isolada, conforme exposto no item 8.3, mas os Super +IN tendem a ocorrer entre dois eventos (Tabela 14).

Tabela 14. Porcentagem de super ICs para cada categoria de isolamento, considerando os 8 critérios adotados.

	Critérios de isolamento (Tempo (ms)/ Distância (km))							
	1000/10	1000/5	500/10	500/5	100/10	100/5	10/10	10/5
Tipo1	16%	18%	16%	18%	16%	18%	23%	26%
Tipo2	50%	44%	50%	44%	46%	41%	32%	28%
Tipo3	5%	8%	5%	8%	8%	10%	20%	22%
Tipo4	29%	29%	29%	29%	30%	30%	25%	25%

Assim como para os CIDs, analisou-se de forma mais detalhada o contexto de ocorrência dos Super +IN de acordo com o critério de isolamento 500 ms / 10 km.

Tabela 15. Contexto de ocorrência detalhado do CIDs considerando o parâmetro temporal 500 ms e espacial 10 km.

Critério de isolamento 500 ms / 10 km																			
	N	Super IN		Evento anterior								Evento posterior							
		MG Ip (kA)	MA Ip (kA)	MG Ip (kA)	MA Ip (kA)	IC		CG		MA dd (km)	MA dt (ms)	MG Ip (kA)	MA Ip (kA)	IN		NS		MA dd (km)	MA dt (ms)
						Pos	Neg	Pos	Neg					Pos	Neg	Pos	Neg		
Tipo 1	17	44	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tipo 2	55	52	63	10	12	49	1	4	1	1	5	10	14	43	2	10	0	2	29
Tipo 3	5	73	104	13	27,4	3	0	2	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Tipo 4	32	43	46	0	0	0	0	0	0	0	0	10	14	25	0	4	3	2	8

Nota-se a partir da Tabela 15, que os Super +IN, em sua maioria, ocorrem entre raios intra-nuvem positivos. Considerando os Super +IN no contexto de ocorrência tipo 2, nota-se que eles estão separados temporalmente, em média 5 ms de um evento anterior e 29 ms de um evento posterior. A corrente média dos Super +IN é cerca de cinco vezes superior à corrente dos eventos anteriores e posteriores a eles. O contexto de ocorrência que apresentou maior média referente às correntes de pico foi o tipo 3, porém foi o que ocorreu com menor frequência.

8.7.2 Local de ocorrência dos Super +IN no interior das nuvens

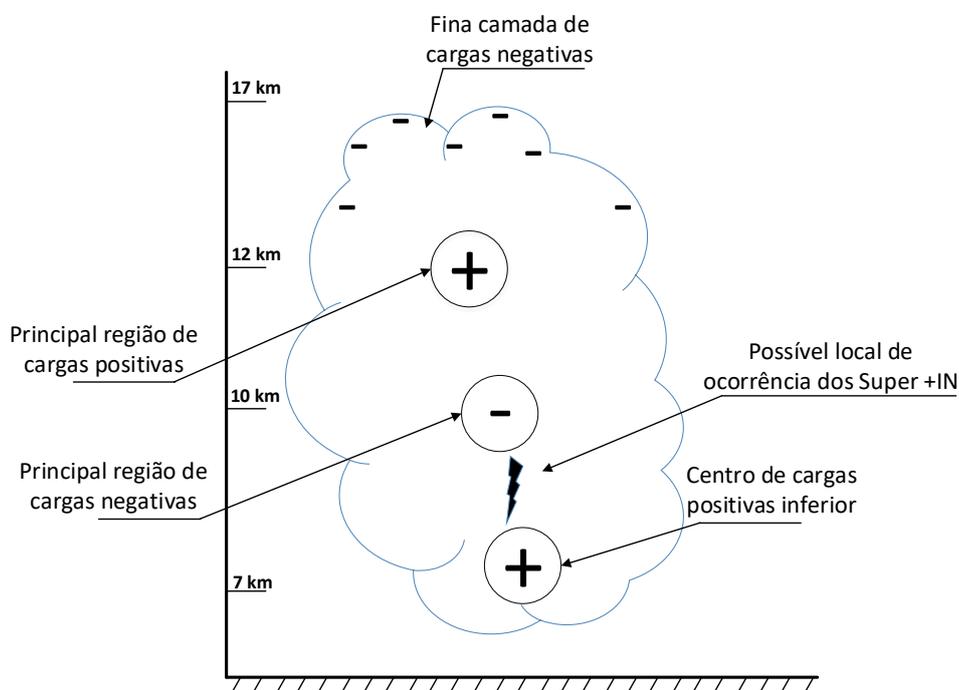
Utilizando as equações 56 e 57, calculou-se a altura de ocorrência - altura da fonte emissora do campo - dos Super +IN que apresentavam o par de reflexão ionosférica visível em suas formas de onda. Vinte e quatro eventos apresentaram par de reflexão ionosférica visível em suas formas de onda. A média aritmética e geométrica para a altura de ocorrência dos eventos foram 8,5 km e 8,1 km respectivamente.

De acordo com Karunarathne et al., (2015) que investigaram CIDs na Florida, USA, CIDs tendem a ocorrer a uma altitude média de 13 km. Karunarathna et al., (2015) compararam

dados de radar com medições de campo elétrico de CIDs pra identificar seu possível local de ocorrência nas nuvens, sua hipótese é que eles ocorram entre o centro de carga positivo superior e uma fina camada de cargas negativas na borda superior da nuvem.

Uma das hipóteses desta tese é que os super +IN ocorrem entre o centro de cargas positivas inferior e o centro principal de cargas negativas. Como todas as medições de campo elétrico foram realizadas assumindo a convenção de sinal da eletricidade atmosférica, o MCI dos Super +IN são produzidos por movimento de cargas negativas ascendentes ou por movimento de cargas positivas descendentes.

Figura 133 – Possível local de ocorrência dos Super IN.



Fonte: Do autor.

O exposto nos três últimos parágrafos reafirma que o Super +IN apresentados nesse tópico não podem ser classificados como CIDs, e necessitam ser melhor investigados devido sua alta intensidade e baixa altitude de ocorrência.

8.8 Instalação e operação do LDWSS na região Amazônica

O LDWSS, em sua versão atual, após o desenvolvimento de todas as metodologias de calibração e validação dos dados, foi instalado na Região Amazônica, especificamente na cidade de Belém, no dia 01/11/2017. O primeiro sensor foi instalado no prédio do Censipam, regional Belém.

Figura 134 – Mapa de localização do LDWSS em Belém, PA.



Fonte: Do autor.

Optou-se pela instalação de dois sistemas independentes no Censipam, um de alto ganho e um de baixo ganho. As antenas instaladas podem ser visualizadas na Figura 135. Com essa configuração diminui-se de certa forma o tempo morto, uma vez que existe um sistema dedicado para o alto ganho e outro para o baixo ganho.

Figura 135 – Local de instalação do LDWSS no prédio do Censipam, regional Belém.



Fonte: Do autor.

Para cada antena com pré-amplificador existe um sistema de digitalização independente. As antenas são conectadas aos sistemas de digitalização através de cabos coaxiais com extensão menor que 10 m em descida vertical.

Um único notebook foi utilizado para armazenar os dados dos sistemas de alto e baixo ganho.

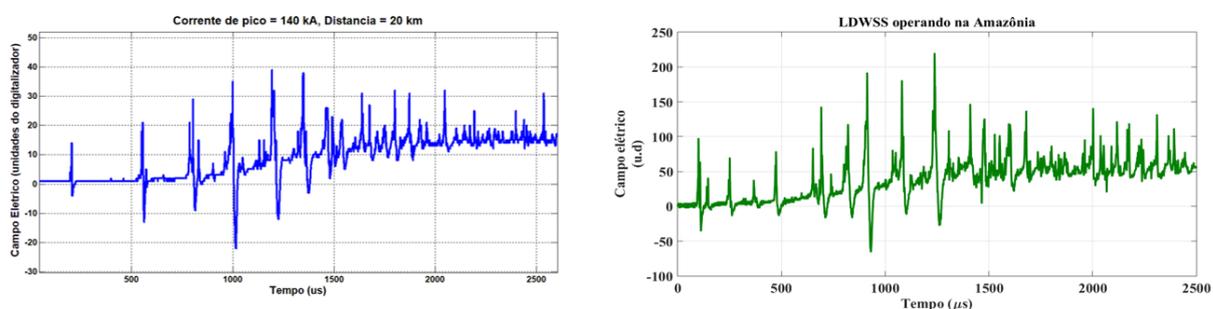
Figura 136 – Sistema de digitalização e notebook instalados no Censipam, regional Belém.



Fonte: Do autor.

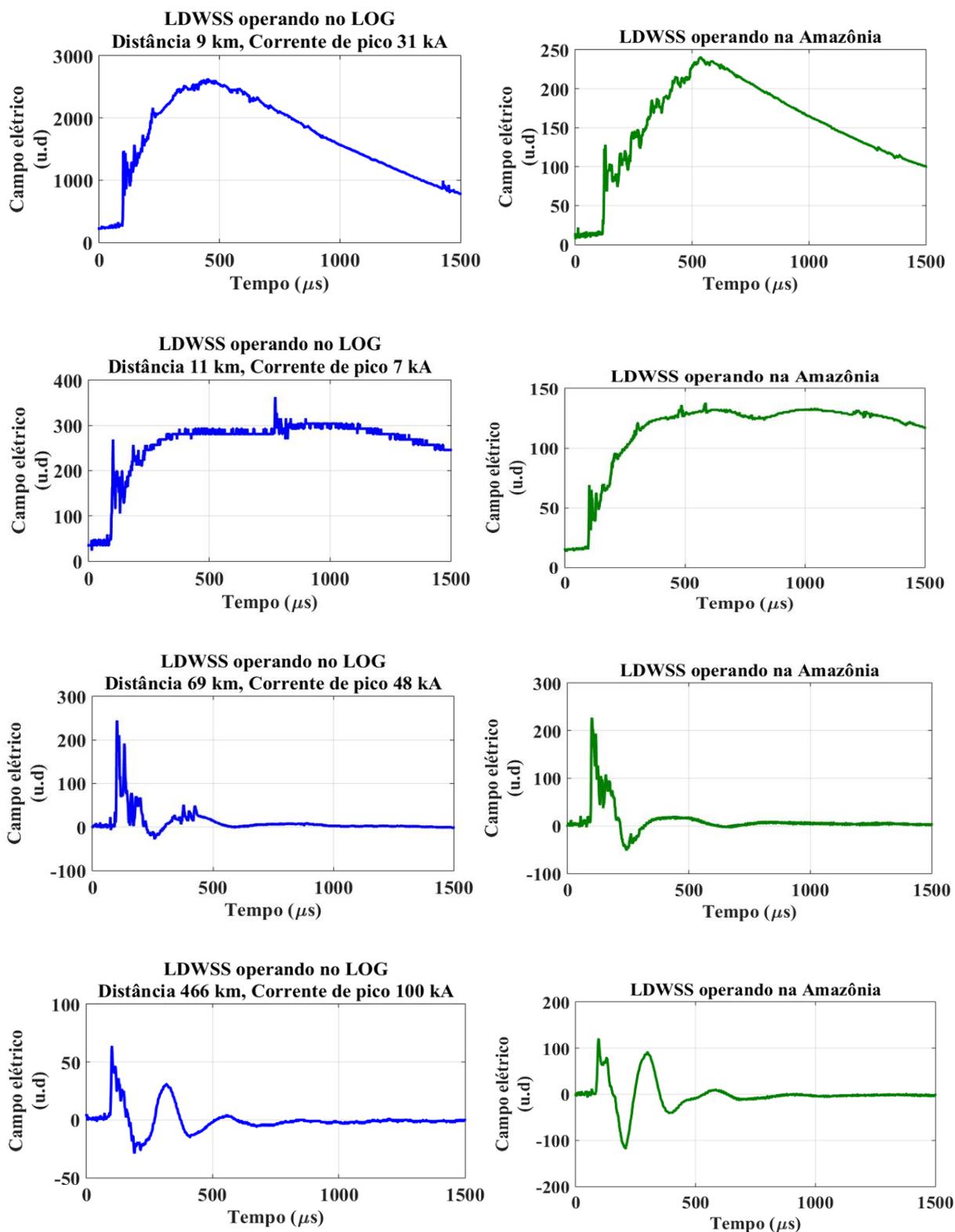
A fim de realizar uma prévia avaliação das formas de onda registradas pelo sistema em operação na Amazônia, comparou-se essas formas com as registradas pelo mesmo sistema, quando em operação no LOG. A comparação ocorreu utilizando diferentes tipos de eventos atmosféricos como: colapsos preliminares; descargas de retorno negativas e positivas; CIDs e; super raios intra-nuvem.

Figura 137 – Comparação entre formas de onda de campos elétricos gerados por pulsos de colapsos preliminares (PB) registrados na Florida, U.S (primeira coluna, traçado em azul) e registrados no Pará, BR (segunda coluna, traçado em verde). O evento detectado quando o LDWSS estava operando no LOG apresenta informações da distância de detecção e corrente de pico do evento detectado.



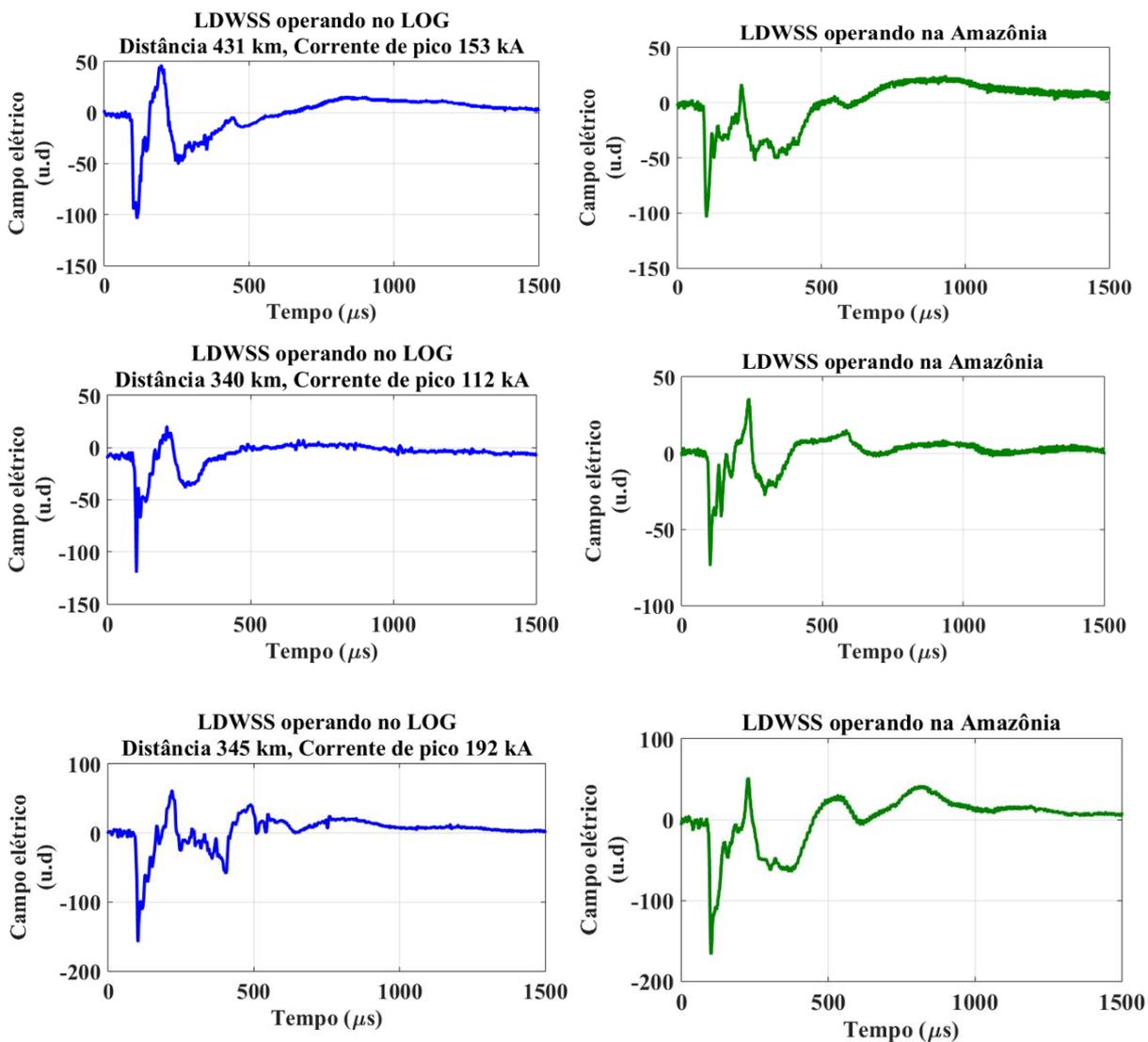
Fonte: Do autor.

Figura 138 – Comparação entre formas de onda de campos elétricos gerados por raios nuvem-solo negativos registrados na Florida, U.S (primeira coluna, traçado em azul) e registrados no Pará, Brasil (segunda coluna, traçado em verde). Os eventos detectados quando o LDWSS estava operando no LOG apresentam informações da distância de detecção e corrente de pico do evento detectado.



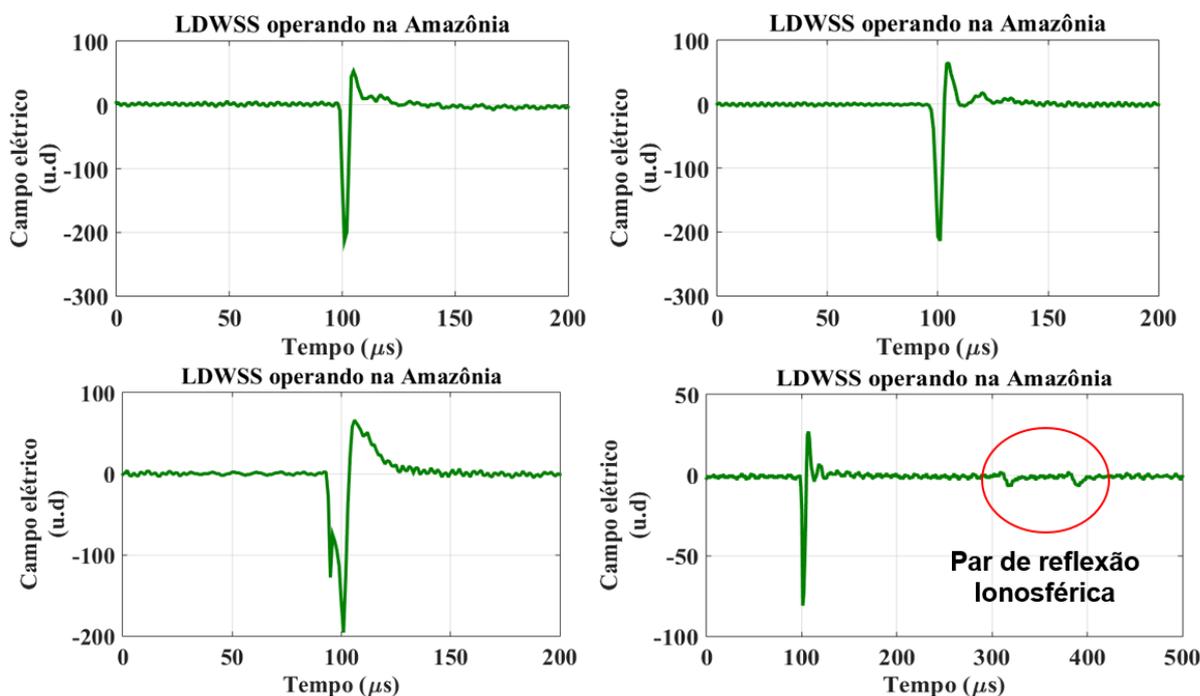
Fonte: Do autor.

Figura 139 – Comparação entre formas de onda de campos elétricos gerados por raios nuvem-solo positivos registrados na Florida, U.S (primeira coluna, traçado em azul) e registrados no Pará, BR (segunda coluna, traçado em verde). Os eventos detectados quando o LDWSS estava operando no LOG apresentam informações da distância de detecção e corrente de pico do evento detectado.



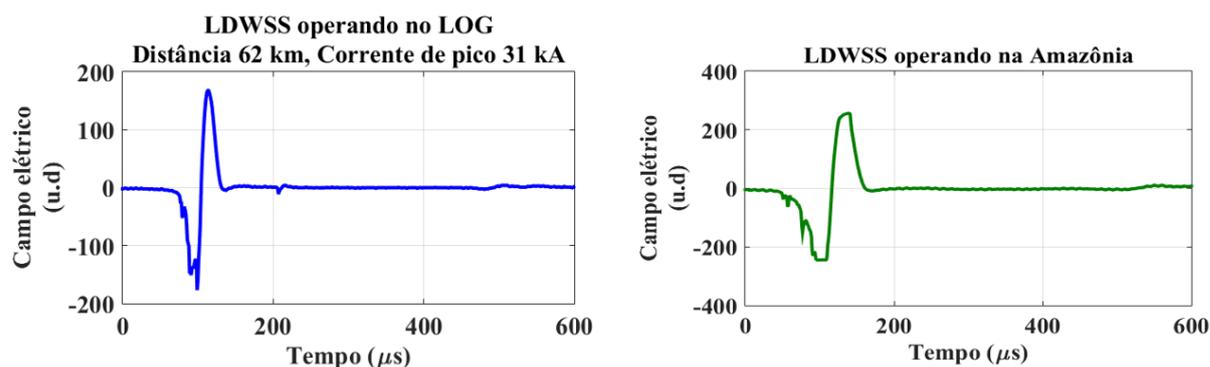
Fonte: Do autor.

Figura 140 – Exemplos de CIDs registrados pelo LDWSS em operação na região amazônica.



Fonte: Do autor.

Figura 141 – Comparação entre formas de onda de campos elétricos gerados por super raios intra-nuvem positivos registrados na Florida, U.S (primeira coluna, traçado em azul) e registrados no Pará, BR (segunda coluna, traçado em verde). O evento detectado quando o LDWSS estava operando no LOG apresenta informações da distância de detecção e corrente de pico do evento detectado.



Fonte: Do autor.

Conforme observa-se nas figuras de 137, 138, 139, 140 e 141, as formas de onda do campo elétrico das descargas atmosféricas detectadas na Amazônia apresentam características bem semelhantes das detectadas na Florida, U.S.A pelo mesmo sistema. Análises mais profundas são necessárias para determinar as peculiaridades dos raios na Amazônia.

9 CONCLUSÃO

Essa tese apresentou maneiras de otimizar a detecção e o registro de campos eletromagnéticos gerados por descargas atmosféricas. Para tanto, o sistema LDWSS foi desenvolvido. O dispositivo passou por diversas etapas de projeto e prototipagem nos últimos quatro anos até alcançar o patamar atual, onde encontra-se consolidado como ferramenta de baixo custo aplicada ao estudo de descargas atmosféricas, principalmente na Região Amazônica.

Dentre os principais pontos aprimorados destacam-se;

- Aumento do alcance dinâmico, com a utilização de dois canais funcionando de forma paralela, possibilitando assim, que o sistema possa detectar tanto eventos próximos quanto eventos que venham a ocorrer distantes do sensor. O aumento do alcance dinâmico possibilitou ao sistema medir variações de campo elétrico, na ordem de 4 V/m até cerca de 240 V/m, com uma boa resolução e baixa relação sinal/ruído;
- Inclusão de filtros analógicos reprogramáveis, permitindo o registro de formas de onda de um mesmo evento em bandas de frequência distintas;
- Calibração do sistema, tornando possível inferir a corrente de pico dos eventos detectados;
- Compactação dos módulos do sistema, tornando-o de fácil transporte (móvel);
- Redução do custo final do sistema, com a utilização de componentes de baixo custo e fácil aquisição, e desenvolvimento de grande parte do hardware e software, sem a necessidade de aquisição de licenças para operar o sistema.

A metodologia de calibração aplicada ao LDWSS apresentou, de forma sistemática, os diferentes fatores que devem ser considerados na calibração de um sistema de medição de campo elétrico genérico. Estes fatores são: ganho devido à elevação da antena em relação ao chão; ganho relacionado a edificação onde a antena está instalada; ganho devido aos componentes eletrônicos; geometria do elemento sensor e; valor do capacitor integrador. Dessa forma, a metodologia desenvolvida pode ser replicada a qualquer outro sistema de medição de campo elétrico, instalado em qualquer edificação.

O sistema desenvolvido foi validado através da comparação direta com dado de raio induzido no ICLRT, dados da NLDN e dados do sistema de medição de campo elétrico do

LOG. Além desse tipo de validação, o LDWSS foi utilizado na investigação de relevantes tópicos, relacionados a descargas atmosféricas. Dentre os quais pode-se citar:

- Cuidados com a calibração de sistemas de medição de campo elétrico aplicados na detecção de raios;
- Estimação da corrente de pico de raios nuvem-solo artificiais e naturais.
- Classificação de CIDs;
- Contexto de ocorrência dos CIDs;
- Investigação da interação de raios NS (-CG) e IN (CID) com a ionosfera;
- Investigação da diferença entre formas de ondas detectadas em diferentes bandas de frequência;
- Banco de dados de formas de onda do campo elétrico radiado por descargas atmosféricas;
- Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência de diferentes tipos de raios, detectados de manhã e à noite em um intervalo de 500 km;
- Primeiro relato sobre descargas do tipo nuvem de alta intensidade que ocorrem em baixa altitude.

O LDWSS atingiu todos os objetivos esperados e, desde o dia 01 de novembro de 2017 - sua última versão, com todos os recentes pontos otimizados - encontra-se detectando e registrando formas de onda do campo elétrico emitidos por descargas atmosféricas na Amazônia, tornando-se assim, o primeiro sistema para tal propósito em operação na região atualmente.

Por fim, o LDWSS continua em constante evolução para aprimorar a qualidade dos dados que fornece. Os softwares para análises dos dados brutos do LDWSS continuam em desenvolvimento, com o objetivo principal de classificar automaticamente os eventos detectados.

No intuito de fornecer indicações para a continuidade desta tese, recomenda-se as seguintes sugestões para pesquisas futuras:

- Utilização de inteligência computacional na análise dos dados brutos do LDWSS;
- Implementação de uma rede de localização de raios, utilizando o LDWSS como sensor;

- Estudos dos efeitos de propagação das ondas eletromagnéticas no ambiente amazônico, utilizando formas de onda detectadas por mais de um sensor em locais diferentes (experimentos com múltiplas estações de medição);
- Investigação dos CIDs na Amazônia.

REFERÊNCIAS

- AHRAM, T. Z.; KARWOWSKI, W.; SOARES, M. M. Embedded systems engineering for products and services design. **Work (Reading, Mass.)**, v. 41 Suppl 1, p. 941–8, 2012.
- BABA, Y.; RAKOV, V. A. Electromagnetic Fields at the Top of a Tall Building Associated With Nearby Lightning Return Strokes. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 49, n. 3, p. 632–643, ago. 2007.
- BAHARUDIN, Z. A. et al. Electric field changes generated by the preliminary breakdown for the negative cloud-to-ground lightning flashes in Malaysia and Sweden. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 84–85, p. 15–24, ago. 2012.
- BAUM, C. E. **Measurement of closure position between downward and upward leaders: Return-stroke initiation position.** (U. R. S. I. (URSI) D. Erricolo, Ed.)XXIX General Assembly of the International Union of Radio Science. **Anais...Chicago, USA: 2008**
- BENETTI, C. A. A. et al. **Ridat – Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas no Brasil: Situação Atual, Aplicações e Perspectivas.** XI Congr. Bras. Met. **Anais...Rio de Janeiro, Rj: 2004**
- BRUCE, C. E. R.; GOLDE, R. H. The lightning discharge. **Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part II: Power Engineering**, v. 88, n. 6, p. 487–505, dez. 1941.
- CAMPBELL, James A. Electric Field Mill Fabrication. Disponível em: <<http://www.precisionstrobe.com/jc/fieldmill/fieldmill.html/>>. Acesso em: 04 Jul. 2017.
- CHRONIS, T. G.; ANAGNOSTOU, E. N. Evaluation of a long-range lightning detection network with receivers in Europe and Africa. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 6, p. 1504–1510, jun. 2006.
- COORAY, V. **The Lightning Flash.** [s.l: s.n.].
- COTTON, W. R.; ANTHES, R. A. Storm and Cloud Dynamics. **International Geophysics Series**, v. 44, p. 809, 1989.
- COX, D. B.; LIN, L. T.; FLOREK, R. S. A real-time programmable switched-capacitor filter. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 15, n. 6, p. 972–977, dez. 1980.
- DE SÁ, J. A. S. **DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NA AMAZÔNIA: Reconhecimento e análise dos parâmetros de interesse para o planejamento estratégico dos sistemas de proteção de linhas de transmissão.** [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2011.
- DEFER, E. et al. An overview of the lightning and atmospheric electricity observations collected in southern France during the HYdrological cycle in Mediterranean EXperiment (HyMeX), Special Observation Period 1. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 8, n. 2, p. 649–669, 9 fev. 2015.
- DENTEL, L. M. **Modelagem de Sistemas de Detecção de Descargas Atmosféricas na Amazônia.** [s.l.] Universidade Federal do Pará, 2013.
- DIENDORFER, G.; UMAN, M. A. An improved return stroke model with specified channel-base current. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D9, p. 13621, 1990.

ERIKSSON, A. J. The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 2, n. 3, p. 859–870, 1987.

ESA, M. R. M. et al. Distinctive features of radiation pulses in the very first moment of lightning events. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 109, p. 22–28, mar. 2014.

FOSSATI, L.; ILSTAD, J. **The future of embedded systems at ESA: Towards adaptability and reconfigurability**. 2011 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS). **Anais...IEEE**, jun. 2011Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5963924/>>

HADDAD, M. A.; RAKOV, V. A.; CUMMER, S. A. New measurements of lightning electric fields in Florida: Waveform characteristics, interaction with the ionosphere, and peak current estimates. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 117, n. D10, p. n/a-n/a, 27 maio 2012.

HEIDLER, F. **Traveling current source model for LEMP calculation**. 6th Int. Zurich Symp. on Electromagnetic Compatibility. **Anais...Zurich, Switzerland: 1985**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **INPE avalia prejuízos causados por raios**. Notícias, 15/01/2007. Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=936>. Acesso em: 12 outubro 2017.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/ELAT. **Vítimas de raios - Infográfico**. Sala de Imprensa, 23/10/2015. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/noticias/>>. Acesso em: 12 outubro 2017.

JAYARATNE, R. Thunderstorm electrification mechanisms. In: **The Lightning Flash**. IET Power and Energy Series 34, 2008.

JORDAN, D. M. et al. Observed dart leader speed in natural and triggered lightning. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 97, n. D9, p. 9951–9957, 20 jun. 1992.

KARNAS, G. et al. **Calibration of electric field antennae operating in the ELF-MF frequency range at the lightning research station in Rzeszow**. 2016 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE). **Anais...IEEE**, maio 2016Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7800197/>>

KARUNARATHNA, N. et al. Narrow bipolar pulse locations compared to thunderstorm radar echo structure. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 120, n. 22, p. 11,690-11,706, 27 nov. 2015.

KARUNARATHNE, S. et al. Observations of positive narrow bipolar pulses. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 120, n. 14, p. 7128–7143, 27 jul. 2015.

KREHBIEL, P. R. The Electrical Structure of Thunderstorms. In: **The Earth's Electrical Environment**. Washington, DC: The National Academies Press, 1986. p. 90–113.

KUTUK, H.; SUNG-MO KANG. **A field-programmable analog array (FPAA) using switched-capacitor techniques**. 1996 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Circuits and Systems Connecting the World. ISCAS 96. **Anais...IEEE**, 1996Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/541896/>>

- LEAL, A. F. R. et al. **Microcontroller-based electric field measurement system with programmable pre-amplifier and filtering for use in the Amazon region**. 2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA). **Anais...2015**
- LEAL, A. F. R. et al. **A Multiband Lightning Detector**. ILPS 2016 - International Lightning Protection Symposium. **Anais...Porto, Pt: 2016a**
- LEAL, A. F. R. et al. **Lightning waveforms polarity analysis in different frequency bands detected simultaneously**. International Colloquium on Lightning and Power Systems. **Anais...BOLOGNA, IT: 2016b**
- LEAL, A. F. R. et al. A Low-Cost System for Measuring Lightning Electric Field Waveforms, its Calibration and Application to Remote Measurements of Currents. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. PP, n. 99, p. 1–9, 2017.
- LEAL, A. F. R.; RAKOV, V. A.; DA ROCHA, B. R. P. **Classification of CIDs observed in Florida using the Lightning Detection and Waveform Storage System (LDWSS)**. 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA). **Anais...Natal, Br: 2017**
- LEAL, A. F. R.; RAKOV, V. A.; ROCHA, B. R. P. **Estimation of Ionospheric Reflection Heights Using CG and IC Lightning Electric Field Waveforms**. 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA). **Anais...2017**
- LEAL, A. F. R.; ROCHA, B. R. P. **Low cost sensor for measuring keraunic index and lightning density in the Amazon Region**. ILPS 2014 - International Lightning Protection Symposium. **Anais...Chamonix, Fr: 2014**
- LE VINE, D. M. Sources of the strongest RF radiation from lightning. **Journal of Geophysical Research**, v. 85, n. C7, p. 4091, 1980.
- LIN, Y. T. et al. Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 84, n. C10, p. 6307, 1979.
- LOJOU, J. Y.; MURPHY, M. J.; HOLLE, R. L. Nowcasting of Thunderstorms Using VHF Measurements. In: H.-D. BETZ, U. SCHUMANN, AND P. L. (Ed.). **Lightning: Principles, Instruments and Applications**. Dordrecht (NL): Betz, 2008. p. 253–270.
- MACGORMAN, D. R.; RUST, W. D. **The Electrical Nature of Storms**. New York: Oxford University Press, 1998.
- MALLICK, S. et al. On remote measurements of lightning return stroke peak currents. **Atmospheric Research**, v. 135–136, p. 306–313, jan. 2014.
- MCDONALD, T. B. et al. Lightning location and lower-ionospheric height determination from two-station magnetic field measurements. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 84, n. C4, p. 1727–1734, 20 abr. 1979.
- MCLAIN, D. K.; UMAN, M. A. Exact expression and moment approximation for the electric field intensity of the lightning return stroke. **Journal of Geophysical Research**, v. 76, n. 9, p. 2101–2105, 20 mar. 1971.
- MESQUITA, C. R. DE. **NOVA METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG, 2006.

MIDDLESTEAD, R. W. APPENDIX B: DIGITAL FILTER DESIGN AND APPLICATIONS. In: **Digital Communications with Emphasis on Data Modems**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2017. p. 747–753.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. Sudeste registra maior número de mortes por raios. Notícias MCTI, 28/01/2013. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/344944/Sudeste_registra_maior_numero_de_mortes_por_raios.html>. Acesso em: 10 outubro 2016.

MIRANDA, B. N. P. DE. **ESTIMAÇÃO DO LOCAL DE INCIDÊNCIA DA DESCARGA ATMOSFÉRICA UTILIZANDO O MÉTODO TOA E TEMPOS ARTIFICIAIS DE DETECÇÃO DOS SENSORES**. [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ (UFPA), 2016.

MONTEIRO, J. B.; PETRAGLIA, A.; LEME, C. A. Filtro recursivo analógico digitalmente programável por controle de carga. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 13, n. 3, p. 337–344, set. 2002.

MOSADDEGHI, A. et al. **Distortion of Electric and Magnetic Fields from Lightning Due to Close-By Metallic Structures**. 2007 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. **Anais...IEEE**, jun. 2007 Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4371702/>>

NACCARATO, K. P. et al. Total Lightning Flash Detection from Space A CubeSat Approach. **24th International Lightning Detection Conference**, n. July, p. 7, 2016.

NAG, A. **CHARACTERIZATION AND MODELING OF LIGHTNING PROCESSES WITH EMPHASIS ON COMPACT INTRACLOUD DISCHARGES**. [s.l.] UNIVERSITY OF FLORIDA, 2010.

NAG, A. et al. On phenomenology of compact intracloud lightning discharges. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. D14, p. D14115, 29 jul. 2010.

NAG, A. et al. Lightning locating systems: Insights on characteristics and validation techniques. **Earth and Space Science**, v. 2, n. 4, p. 65–93, abr. 2015.

NUCCI, C. A. et al. **On lightning return stroke models for LEMP calculations**. 19th International Conference on Lightning Protection. **Anais...Graz: 1988**

Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, 16/11/2017. Disponível em: <http://ons.org.br/PublishingImages/paginas/sobre_sin/mapas/SistemadeTransmissao_Horizonte2017.jpg>. Acesso em: 12 outubro 2017.

ORVILLE, R. E. et al. The North American Lightning Detection Network (NALDN)—Analysis of Flash Data: 2001–09. **Monthly Weather Review**, v. 139, n. 5, p. 1305–1322, maio 2011.

PESSI, A. T. et al. Development of a Long-Range Lightning Detection Network for the Pacific: Construction, Calibration, and Performance*. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 26, n. 2, p. 145–166, fev. 2009.

PINTO JR., O. et al. Recent Upgrades to the Brazilian Integrated Lightning Detection Network. **19th International Lightning Detection Conference**, p. 7, 2006.

PINTO JUNIOR, O. **The history of lightning detection and location in Brazil**. International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA). **Anais...Natal, Br: 2017**

- RACHIDI, F. et al. Effect of vertically extended strike object on the distribution of current along the lightning channel. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 107, n. D23, p. ACL 16-1-ACL 16-6, 16 dez. 2002.
- RAKOV, V. A. **Lightning electromagnetic fields: Modeling and measurements**. 12th Int. Zurich Symposium on Electromagnetic. **Anais...**1997
- RAKOV, V. A. et al. New insights into lightning processes gained from triggered-lightning experiments in Florida and Alabama. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 103, n. D12, p. 14117–14130, 27 jun. 1998.
- RAKOV, V. A. **Lightning Electric and Magnetic Fields**. Proc. of the 13th Int. Zurich Symp. on EMC. **Anais...**Zurich, Switzerland: 1999
- RAKOV, V. A. et al. Lightning Observatory in Gainesville (LOG), Florida: A review of recent results. **Electric Power Systems Research**, v. 113, p. 95–103, 2014.
- RAKOV, V. A. **Fundamentals of Lightning**. New York: Cambridge University Press, 2016.
- RAKOV, V. A.; DULZON, A. . Calculated electromagnetic fields of lightning return stroke. **Tekhnicheskaya Elektrodinamika**, n. 1, p. 97–89, 1987.
- RAKOV, V. A.; THOTTAPPILLIL, R.; UMAN, M. A. On the empirical formula of Willett et al. relating lightning return-stroke peak current and peak electric field. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D11, p. 11527, 1992.
- RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: Physics and Effects**. New York: Cambridge University Press, 2003.
- RISON, W. et al. A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico. **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 23, p. 3573–3576, 1 dez. 1999.
- ROCHA, B. R. P.; SOUZA, J. R. S.; COSTA, M. J. **Electric and Magnetic Fields from Lightning in Belem**. Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. **Anais...**Ouro Preto, MG: 1996
- ROMPS, D. M. et al. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. **Science**, v. 346, n. 6211, p. 851–854, 14 nov. 2014.
- RUBINSTEIN, M.; MONTANDON, E.; IANOZ, E. **ANALYSIS OF MULTI-STATION CLOUD LIGHTNING ELECTRIC FIELD PULSES RECORDED WITH THE SWISS LPATS NETWORK**. 22nd International Conference on Lightning Protection. **Anais...**1994
- SANTOS, R. C. B. DOS; NICOLOSI, D. E. C. **Microcontrolador Psoc - Uma Nova Tecnologia, uma Nova Tendência**. [s.l.] Erica, 2006.
- SCHONLAND, B. F. J. et al. The Wave Form of Atmospheric at Night. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 176, n. 965, p. 180–202, 9 out. 1940.
- SCHULZ, W. et al. The European lightning location system EUCLID – Part 1: Performance analysis and validation. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 16, n. 2, p. 595–605, 2 mar. 2016.

SHINKAI, R. D. A. **UM SIMULADOR PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS LOCAIS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NUVEM-SOLO EM SISTEMAS DE DETECÇÃO INDIRETA.** [s.l.] UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, 2016.

SMITH, D. A. et al. A distinct class of isolated intracloud lightning discharges and their associated radio emissions. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 104, n. D4, p. 4189–4212, 27 fev. 1999.

SMITH, D. A. et al. A method for determining intracloud lightning and ionospheric heights from VLF/LF electric field records. **Radio Science**, v. 39, n. 1, p. n/a-n/a, fev. 2004.

SOMU, V. B. et al. A study of changes in apparent ionospheric reflection height within individual lightning flashes. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 136, p. 66–79, 2015.

SOUZA, J. R. S. et al. **Características dos Eventos de Raios Nuvem-Solo e sua Distribuição em Área no Leste do Pará.** Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica. **Anais...**São Paulo: 1997

SOUZA, J. R. S.; ROCHA, B. R. P.; CARREIRA, G. T. **CG - Lightning Observation (and applications) Around Belém, During the 1995-1998 Period.** International Symposium on Lighting Protection. **Anais...**São Paulo: 1999

THOMAS, R. J. Accuracy of the Lightning Mapping Array. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. D14, p. D14207, 2004.

THOMSON, E. M. Exact expressions for electric and magnetic fields from a propagating lightning channel with arbitrary orientation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 104, n. D18, p. 22293–22300, 27 set. 1999.

THOTTAPPILLIL, R.; RAKOV, V. A. On different approaches to calculating lightning electric fields. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 106, n. D13, p. 14191–14205, 16 jul. 2001.

THOTTAPPILLIL, R.; RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Distribution of charge along the lightning channel: Relation to remote electric and magnetic fields and to return-stroke models. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 102, n. D6, p. 6987–7006, 27 mar. 1997.

UMAN, M. A. **The Lightning Discharge.** Orlando, FL: Academic Press, 1987.

UMAN, M. A.; MCLAIN, D. K. Magnetic field of lightning return stroke. **Journal of Geophysical Research**, v. 74, n. 28, p. 6899–6910, 20 dez. 1969.

UMAN, M. A.; MCLAIN, D. K. Lightning return stroke current from magnetic and radiation field measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 75, n. 27, p. 5143–5147, 20 set. 1970.

UMAN, M. A.; MCLAIN, D. K.; KRIDER, E. P. The electromagnetic radiation from a finite antenna. **American Journal of Physics**, v. 43, n. 1, p. 33–38, jan. 1975.

VAMILTON, 2006 Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Torres_238_e_241_em_Almeirin_Par%C3%A1.jpg>. Acesso em: 10 Novembro 2017.

WAHLIN, L. **Atmospheric Electrostatics.** RESEARCH ST ed. Boulder, Colorado, USA: [s.n.].

WILLETT, J. C. et al. Submicrosecond intercomparison of radiation fields and currents in

triggered lightning return strokes based on the transmission-line model. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. D11, p. 13275, 1989.

WILLETT, J. C.; BAILEY, J. C.; KRIDER, E. P. A class of unusual lightning electric field waveforms with very strong high-frequency radiation. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. D13, p. 16255, 1989.

ZHU, Y. et al. A study of National Lightning Detection Network responses to natural lightning based on ground truth data acquired at LOG with emphasis on cloud discharge activity. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 121, n. 24, p. 14,651-14,660, 27 dez. 2016.

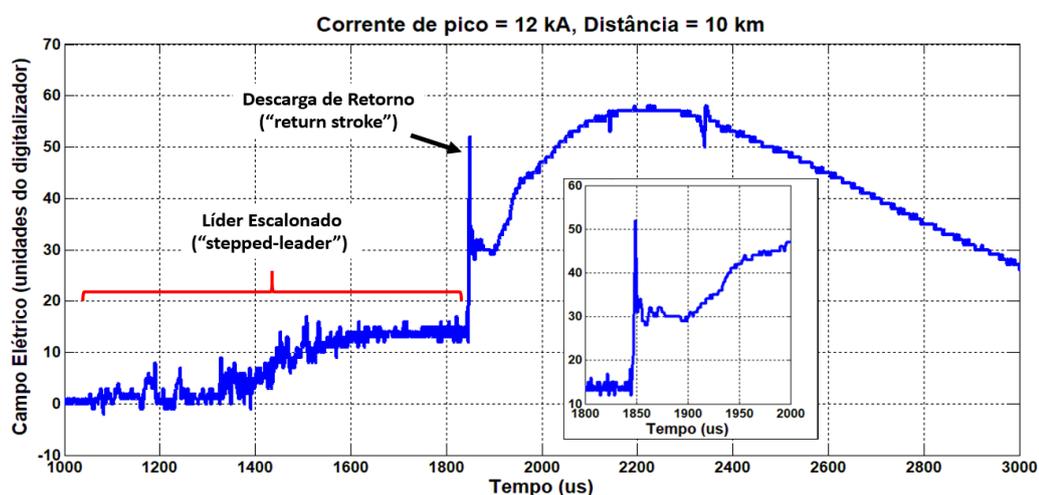
ZHU, Y.; RAKOV, V.; TRAN, M. A Study of Preliminary Breakdown and Return Stroke Processes in High-Intensity Negative Lightning Discharges. **Atmosphere**, v. 7, n. 10, p. 130, 16 out. 2016.

APÊNDICE A - COMPORTAMENTO DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS ASSOCIADOS A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS REGISTRADOS PELO LDWSS

As formas de onda apresentadas nesta seção foram registradas pelo sistema desenvolvido pelo autor (LDWSS) (LEAL et al., 2017), em operação no Observatório de Raios de Gainesville. Todos os picos de corrente e as distâncias dos eventos foram reportados pela Rede Nacional de Detecção de Raios Norte Americana (*National Lightning Detection Network* - NLDN), através do cruzamento temporal entre os dados da NLDN e as estampas de tempo do LDWSS.

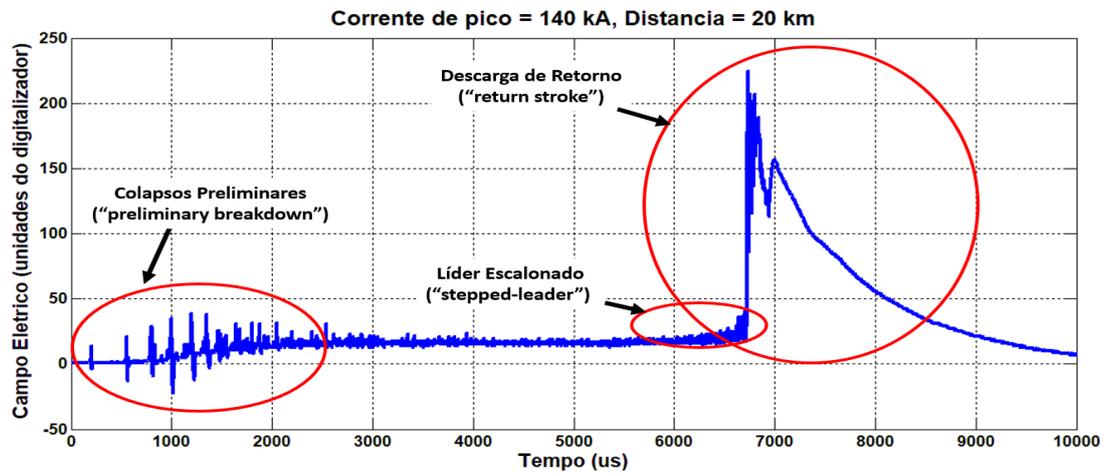
Essas formas de onda, são apresentadas para comparação com as expostas no capítulo 4, onde estão presentes formas de onda já publicadas na literatura.

Figura A- 1 – Forma de onda do campo elétrico radiado por uma descarga de retorno, a uma distância de 10 km e corrente de pico de 12 kA reportado pela rede NLDN. Com a indicação do campo referente ao líder escalonado.



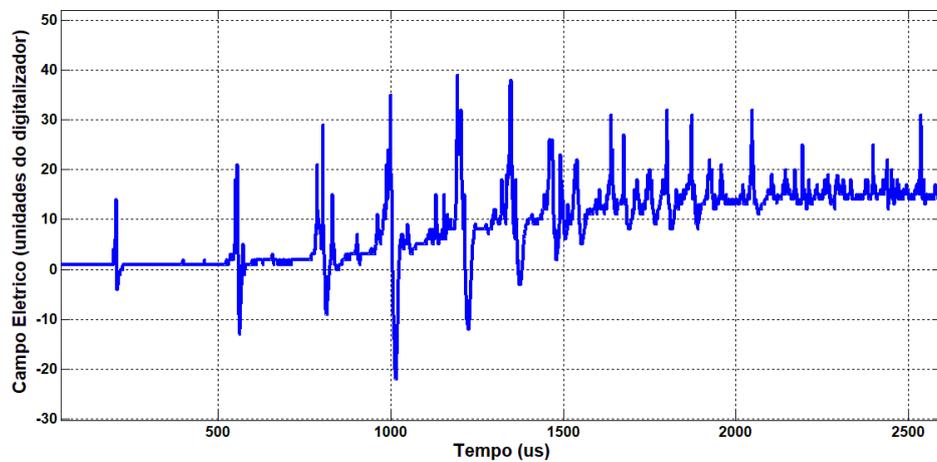
Fonte: Do autor.

Figura A- 2 – Forma de onda do campo elétrico radiado por uma descarga de retorno, a uma distância de 20 km e corrente de pico de 140 kA reportado pela rede NLDN Com a indicação dos pulsos dos colapsos preliminares e do líder escalonado.



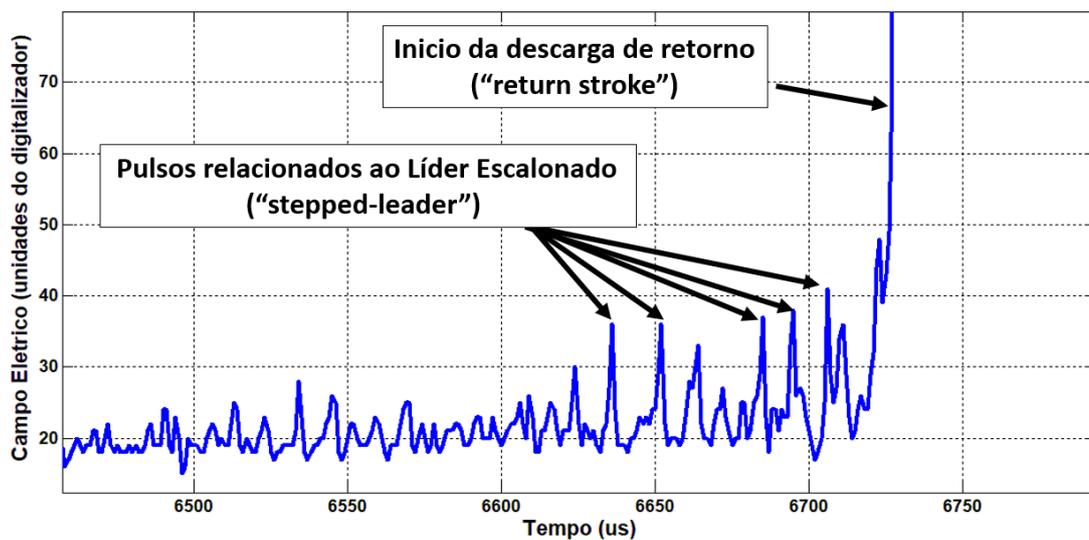
Fonte: Do autor.

Figura A- 3 – Forma de onda do campo elétrico dos pulsos dos colapsos preliminares de uma descarga de retorno, a uma distância de 20 km e corrente de pico de 140 kA reportado pela rede NLDN.



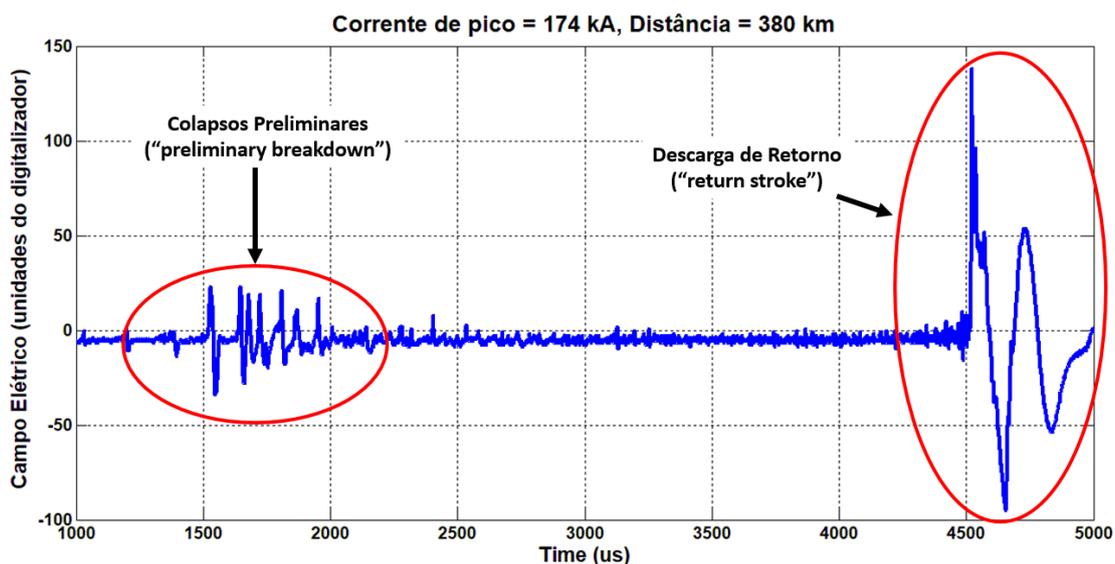
Fonte: Do autor.

Figura A- 4 – Forma de onda do campo elétrico dos pulsos referentes ao líder escalonado de uma descarga de retorno, a uma distância de 20 km e corrente de pico de 140 kA reportado pela rede NLDN.



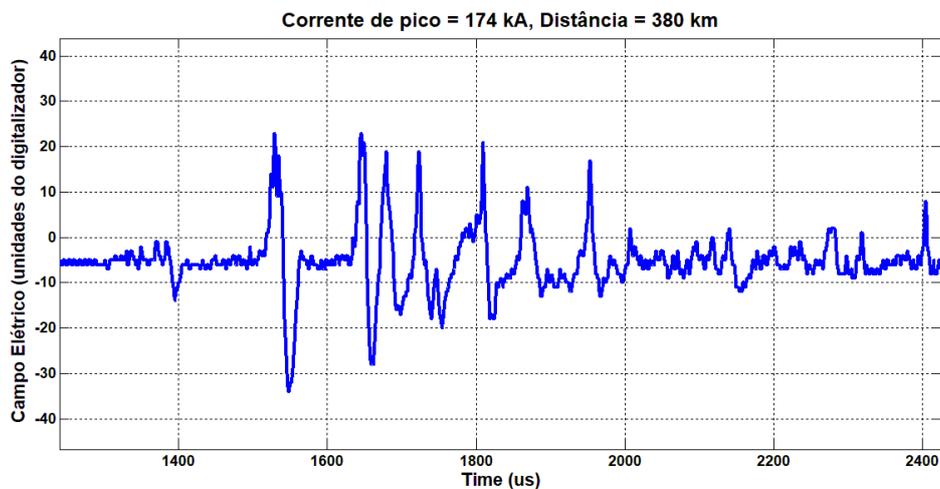
Fonte: Do autor.

Figura A- 5– Forma de onda do campo elétrico radiado por uma descarga de retorno, a uma distância de 380 km e corrente de pico de 174 kA reportado pela rede NLDN. Com a indicação dos pulsos dos colapsos preliminares e do líder escalonado.



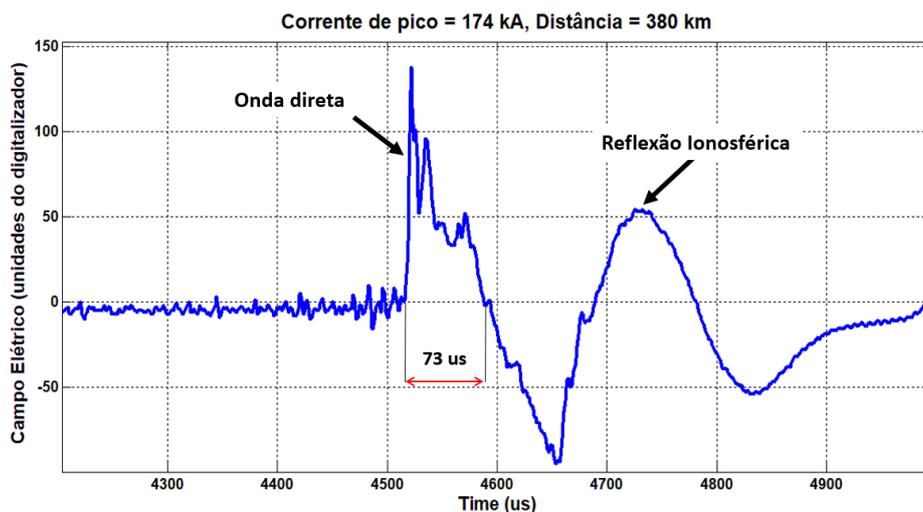
Fonte: Do autor.

Figura A- 6 – Forma de onda dos pulsos dos colapsos preliminares de uma descarga de retorno, a uma distância de 380 km e corrente de pico de 174 kA reportado pela rede NLDN.



Fonte: Do autor.

Figura A- 7– Indicações da onda direta e primeira reflexão ionosférica de uma descarga de retorno, a uma distância de 380 km e corrente de pico de 174 kA reportado pela rede NLDN.

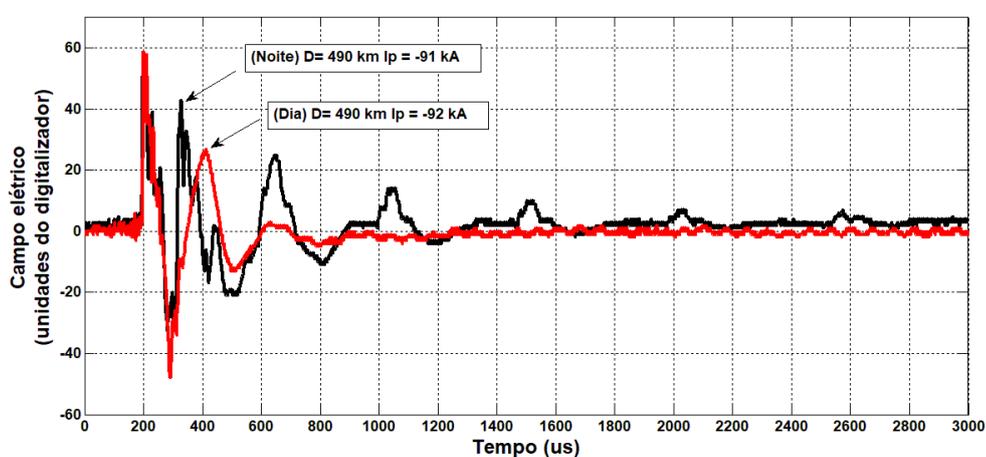


Fonte: Do autor.

Utilizando o LDWSS em funcionamento no LOG, o autor dessa tese, organizou formas de onda da componente vertical do campo elétrico, associado a raios que ocorreram em um intervalo de distância que varia de 100 a 1200 km. Todas as formas de onda foram registradas no período da noite. As formas de onda com distância superior a 500 km ocorreram sobre o Golfo do México. Dessa forma, foi possível observar as características das reflexões ionosféricas devido descargas atmosféricas, observadas a diferentes distâncias.

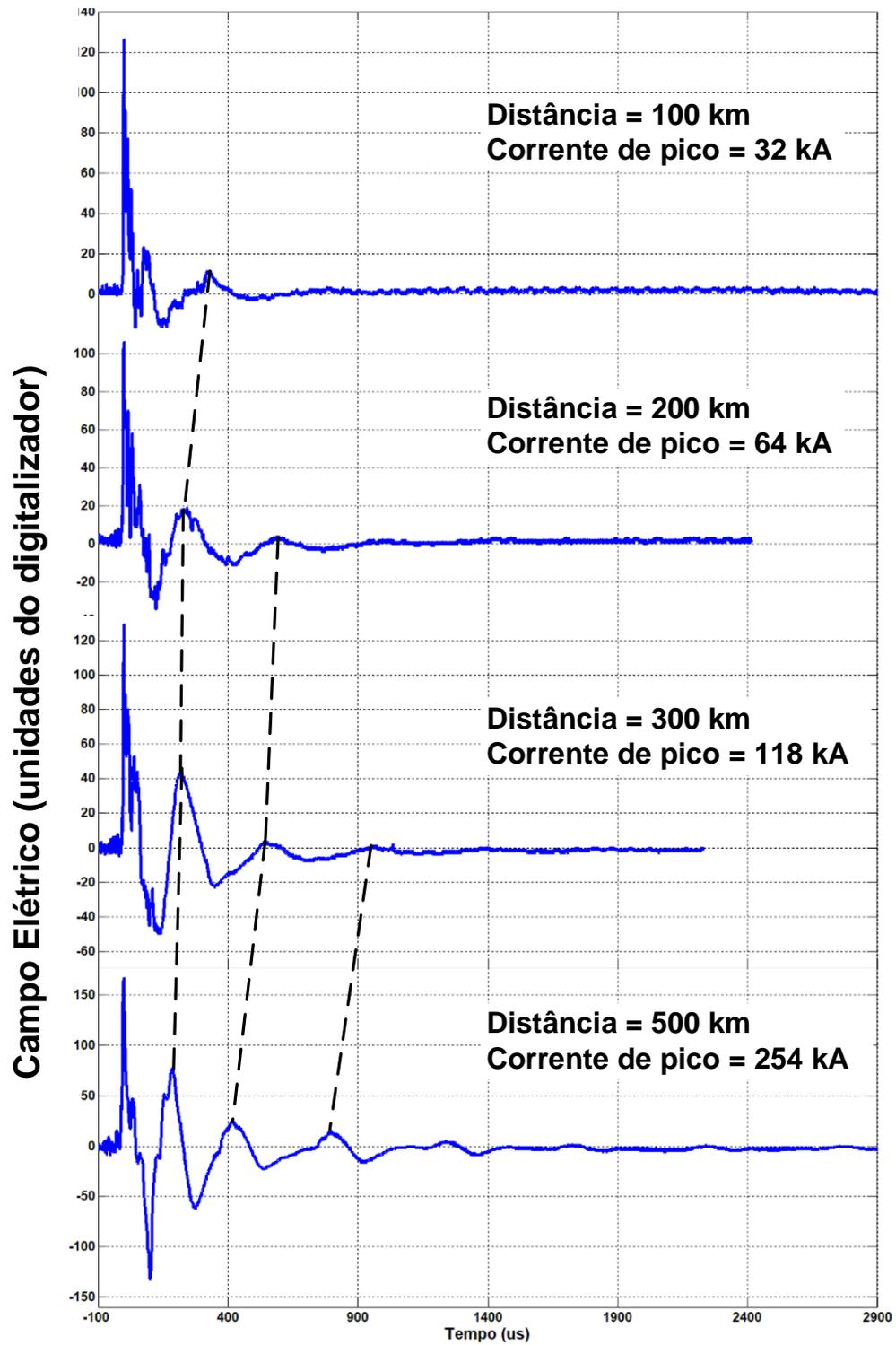
Assim como observado por Schonland et al. (1940), durante a análise das formas de onda, notou-se que as reflexões ionosféricas eram mais evidentes em medições realizadas a noite. Isso ocorre, pois, a noite a ionosfera apresenta característica mais condutoras, facilitando a reflexão das ondas céu. Durante o dia, a maior parte da energia das ondas céu são absorvidas pela ionosfera, e apenas uma pequena porção é refletida.

Figura A- 8– Comparação entre formas de onda do campo elétrico de descargas atmosféricas de intensidades semelhantes que ocorreram no período da noite (Linha preta) e no período da manhã (linha vermelha) a uma distância de 490 km do sensor.



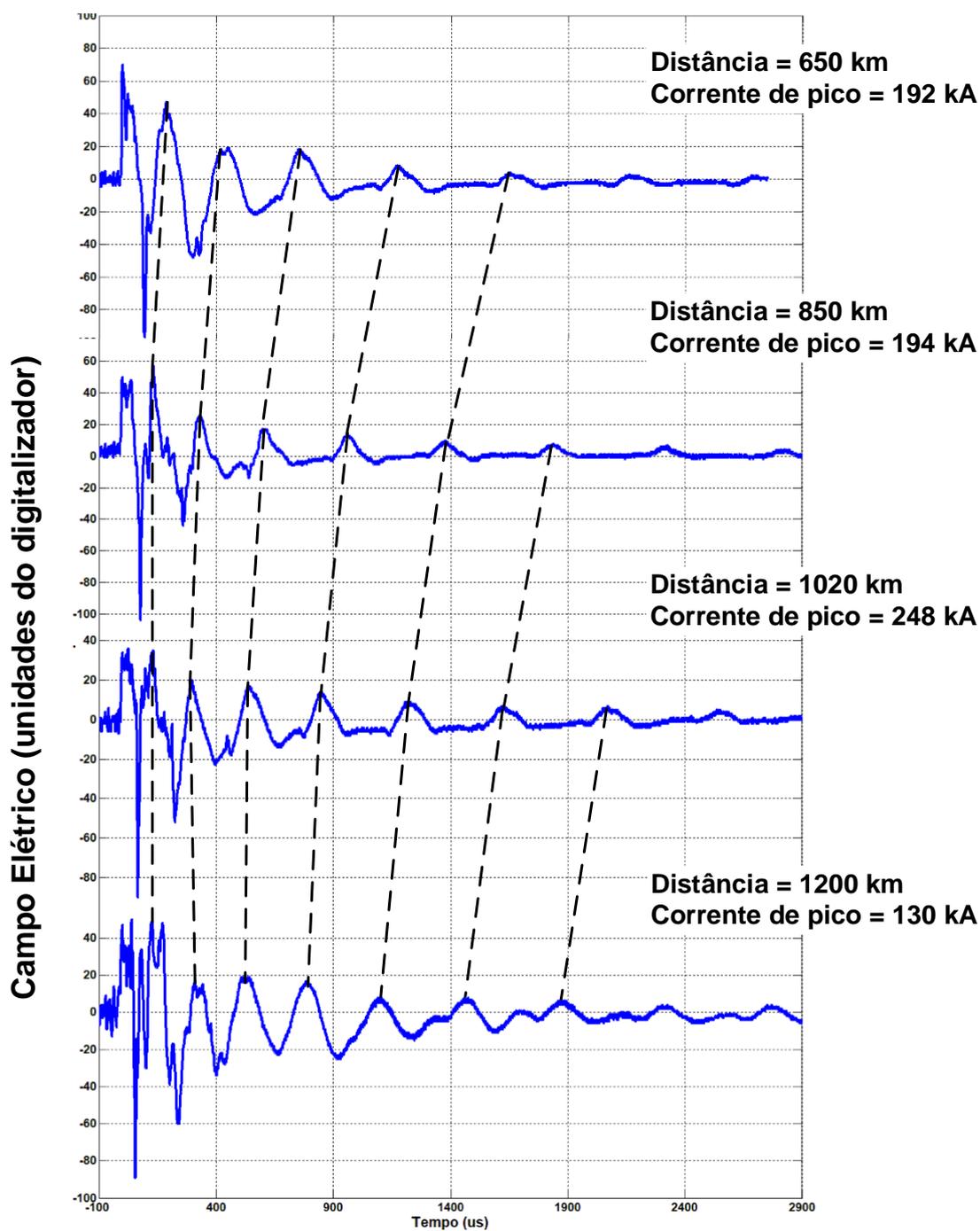
Fonte: Do autor.

Figura A- 9 – Representação de formas de onda do campo elétrico associado a descargas atmosféricas que ocorreram a 100, 200, 300 e 500 km do sensor.



Fonte: Do autor.

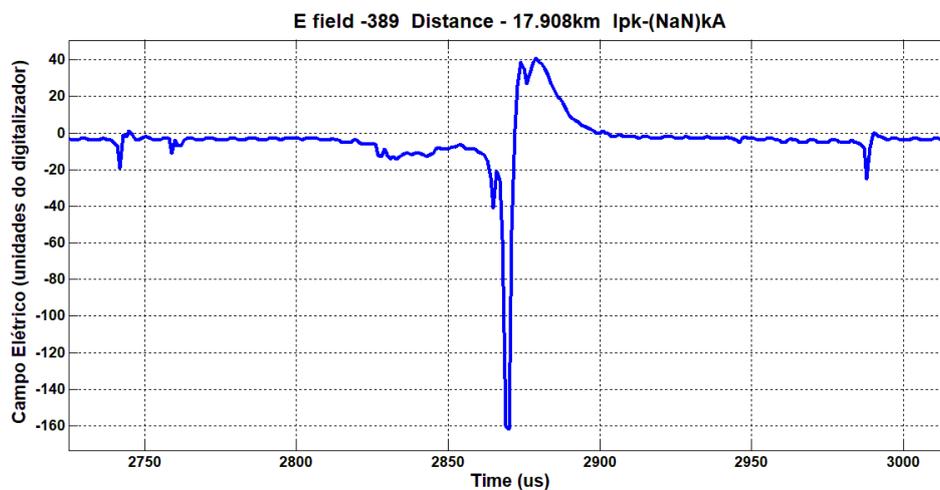
Figura A- 10– Representação de formas de onda do campo elétrico associado a descargas atmosféricas que ocorreram a 650, 850, 1020 e 1200 km do sensor.



Fonte: Do autor.

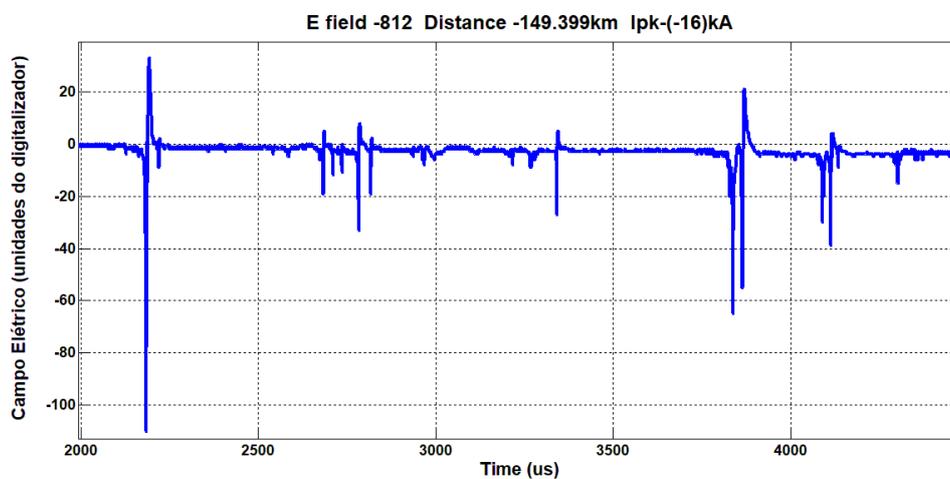
Exemplos de “possíveis” raios nuvem que ocorreram à 17 e 150 km, respectivamente, são apresentados nas Figuras A-11 e A-12. As formas de onda foram registradas pelo autor com o LDWSS operando no LOG.

Figura A- 11 Forma de onda do campo elétrico radiado por uma “possível” descarga nuvem, à uma distância de 17 km reportado pela rede NLDN.



Fonte: Do autor.

Figura A- 12 Forma de onda do campo elétrico radiado por uma “possível” descarga nuvem, à uma distância de 150 km reportado pela rede NLDN.

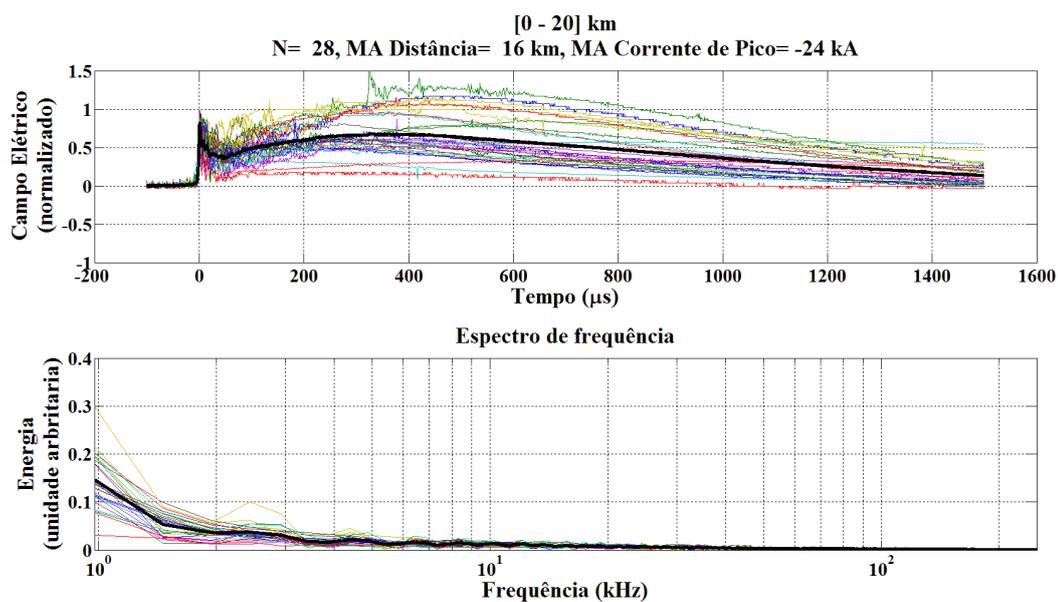


Fonte: Do autor.

APÊNDICE B – FORMAS DE ONDA DO CAMPO ELÉTRICO RADIADO POR RAIOS A DIFERENTES DISTÂNCIAS NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA.

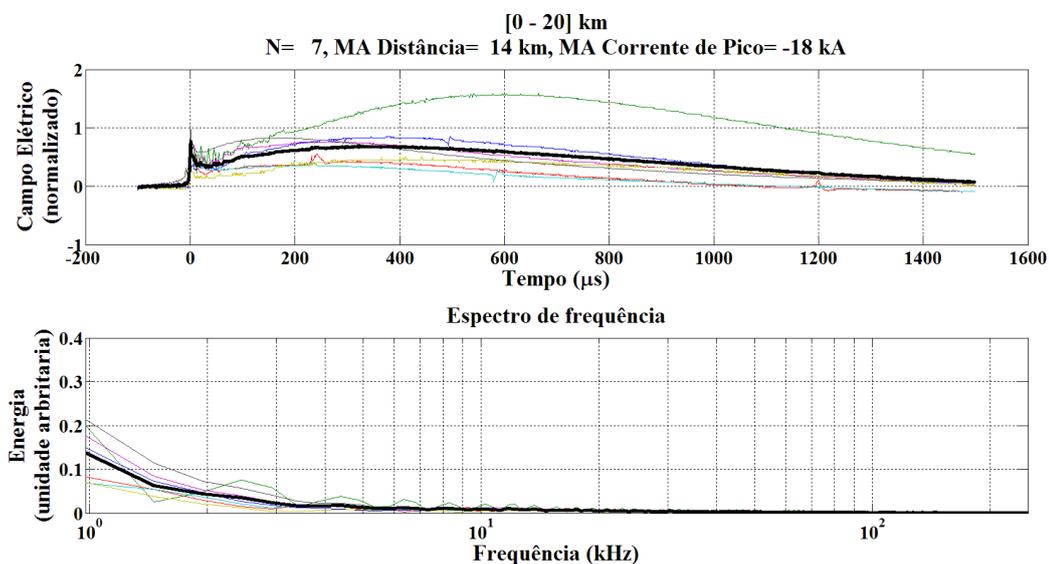
Raios –CG

Figura B- 1 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 0 e 20 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



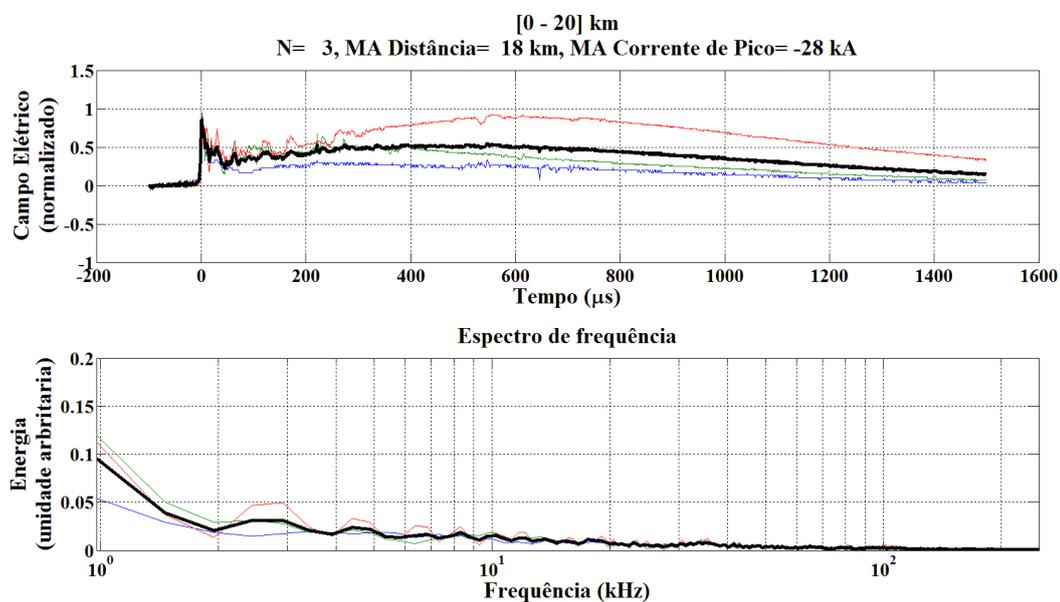
Fonte: Do autor.

Figura B- 2 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 0 e 20 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



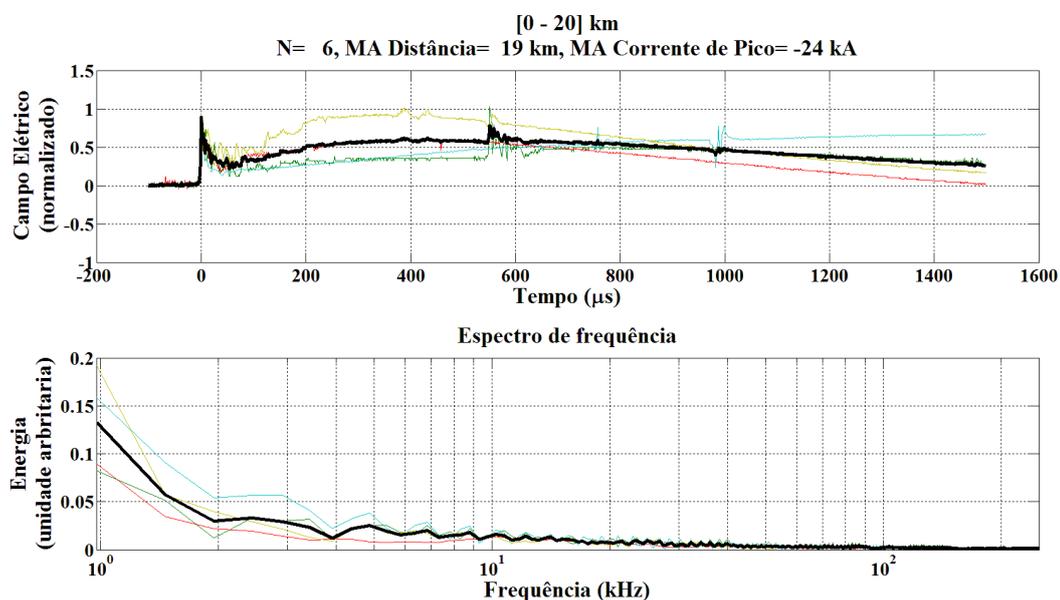
Fonte: Do autor.

Figura B- 3 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 0 e 20 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



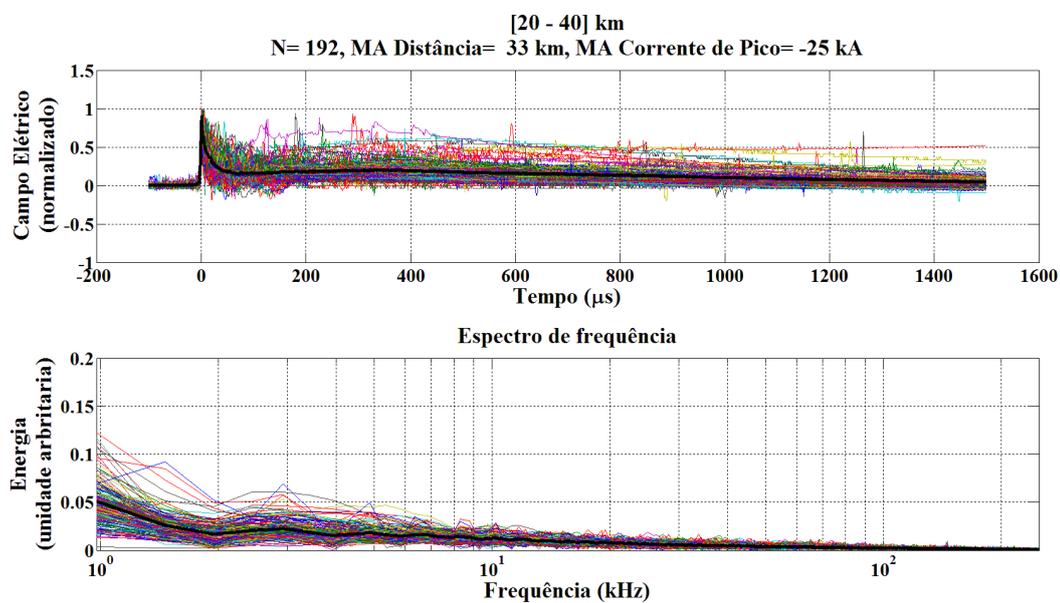
Fonte: Do autor.

Figura B- 4 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 0 e 20 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



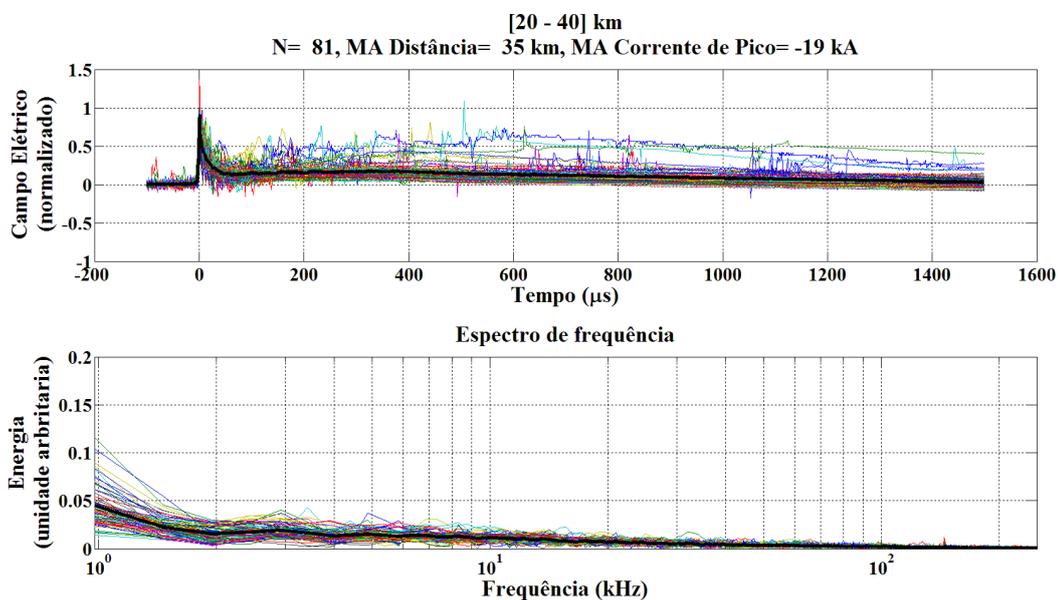
Fonte: Do autor.

Figura B- 5 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 20 e 40 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



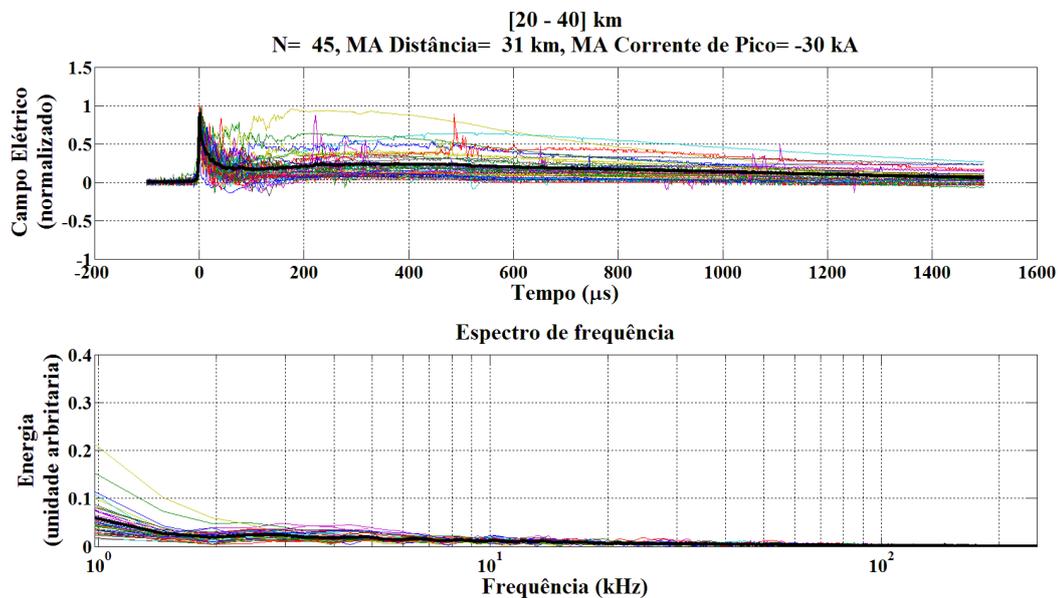
Fonte: Do autor.

Figura B- 6 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 20 e 40 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



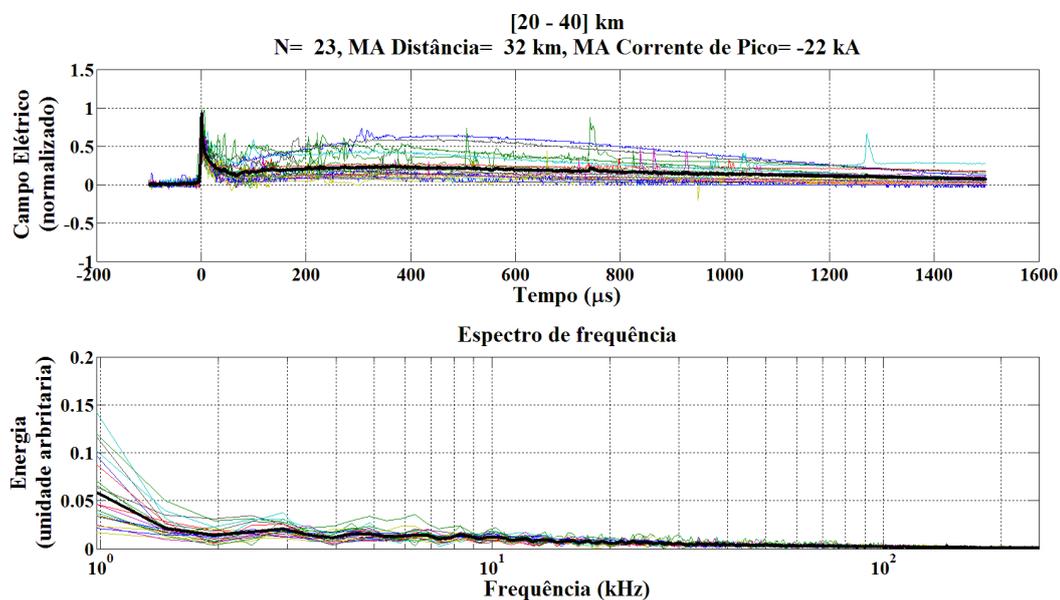
Fonte: Do autor.

Figura B- 7 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 20 e 40 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



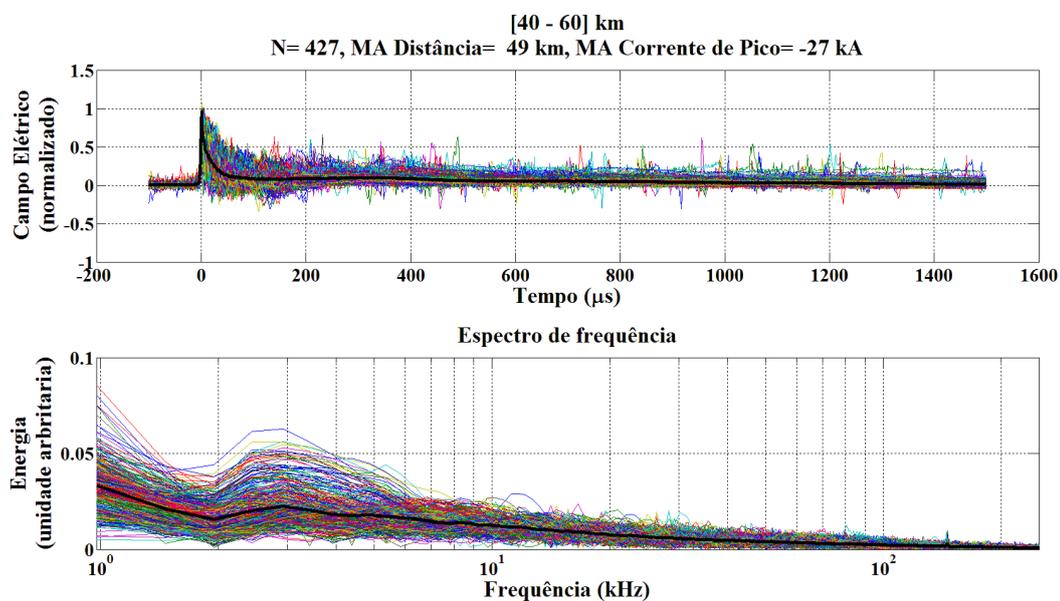
Fonte: Do autor.

Figura B- 8 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 20 e 40 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



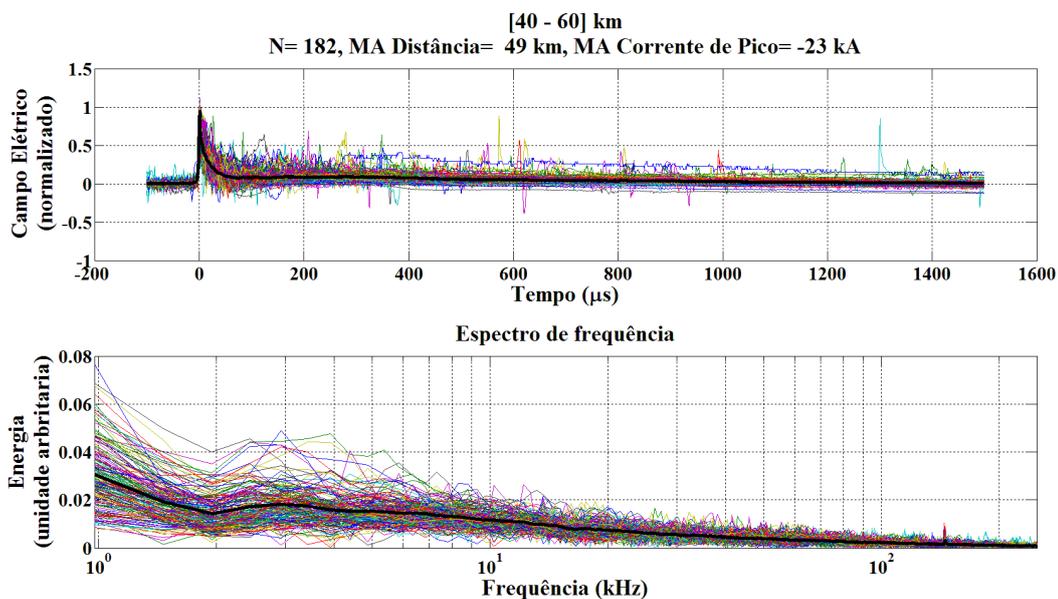
Fonte: Do autor.

Figura B- 9 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 40 e 60 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



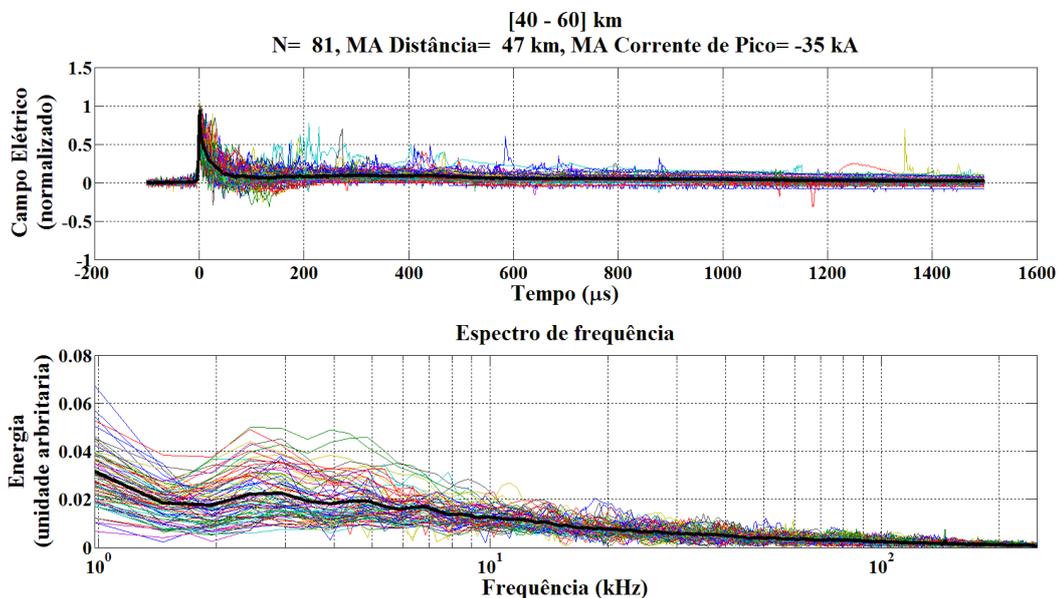
Fonte: Do autor.

Figura B- 10 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 40 e 60 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



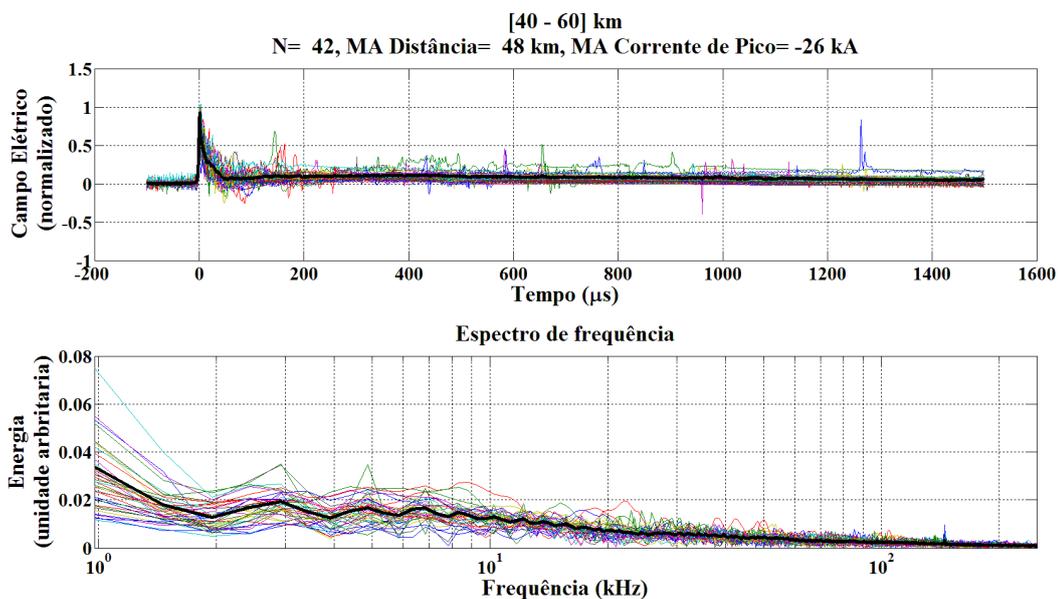
Fonte: Do autor.

Figura B- 11 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 40 e 60 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



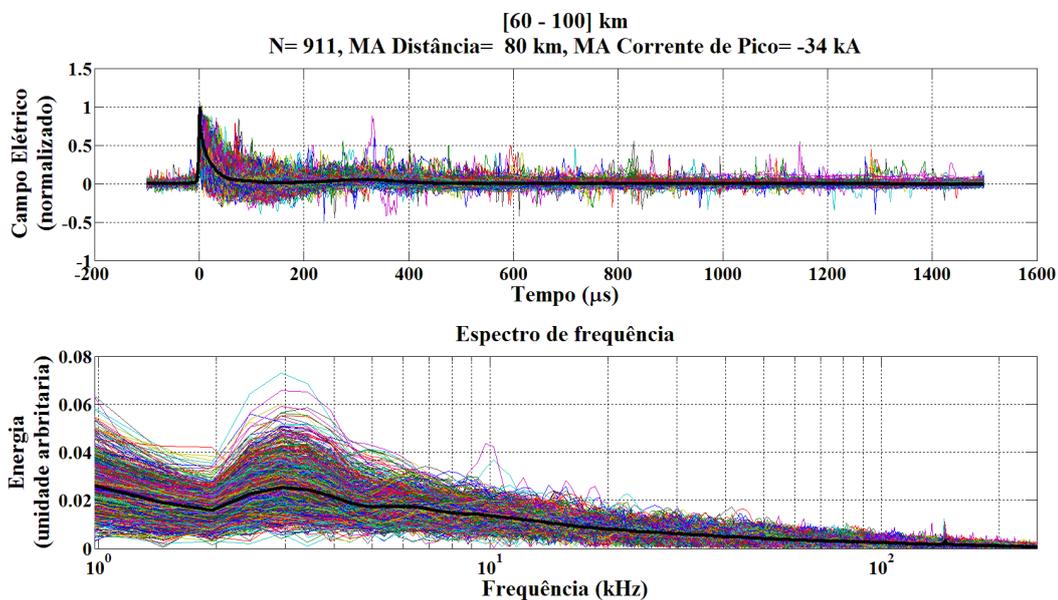
Fonte: Do autor.

Figura B- 12 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 40 e 60 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



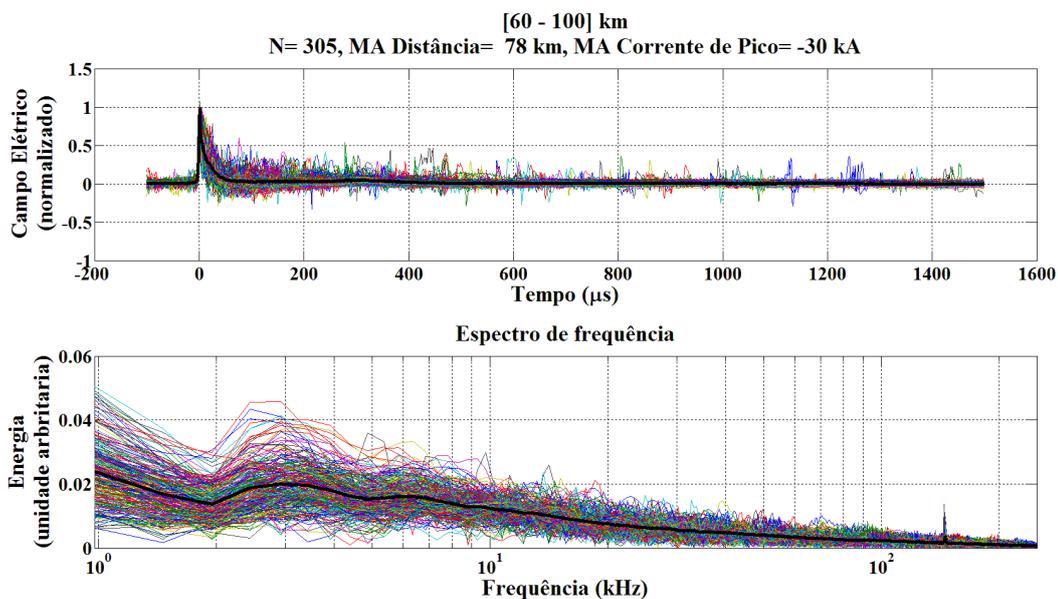
Fonte: Do autor.

Figura B- 13 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 60 e 100 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



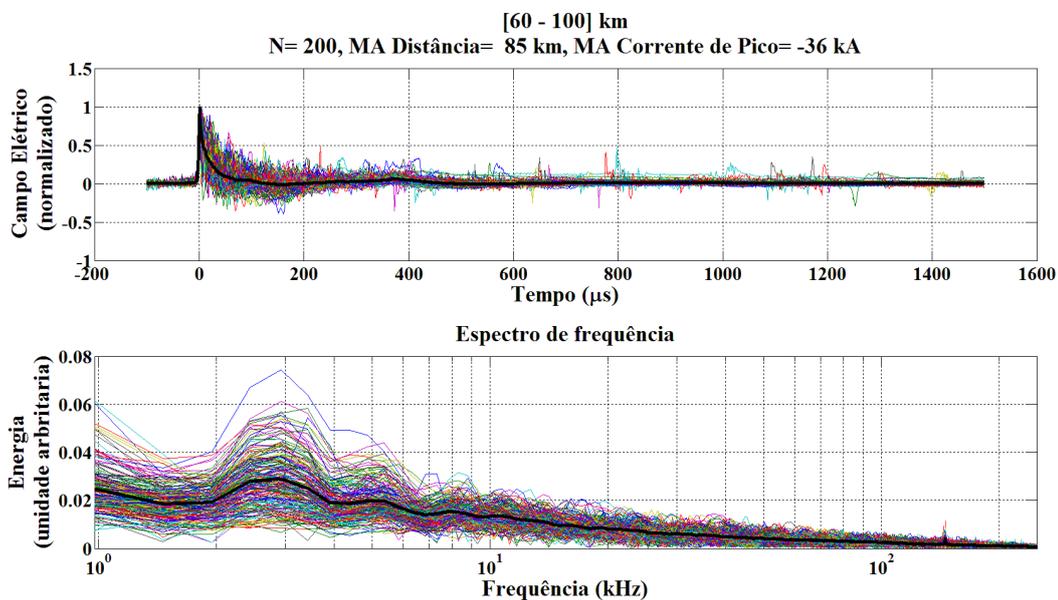
Fonte: Do autor.

Figura B- 14 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 60 e 100 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



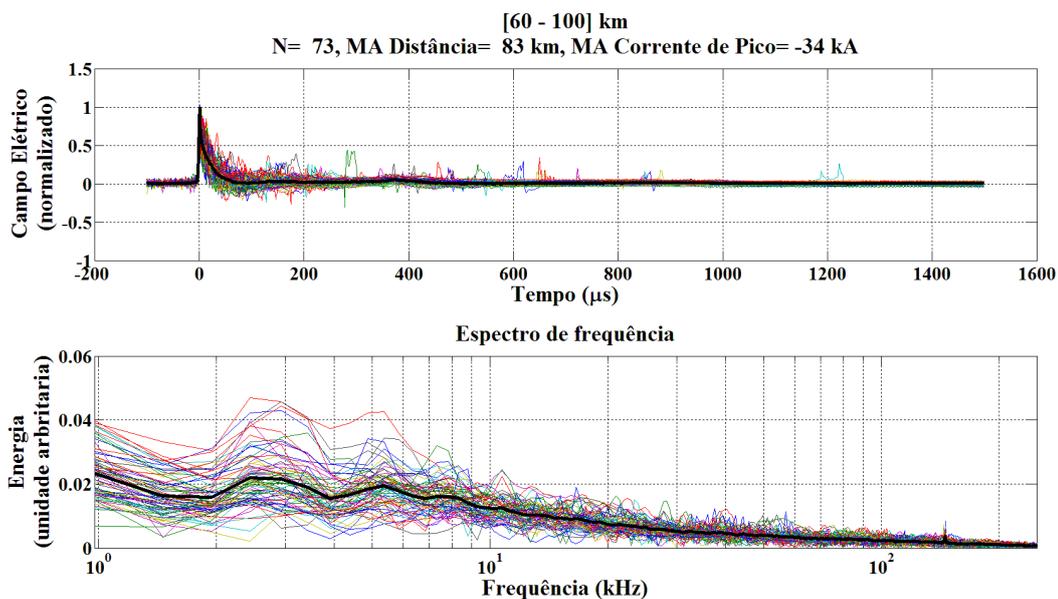
Fonte: Do autor.

Figura B- 15 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 60 e 100 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



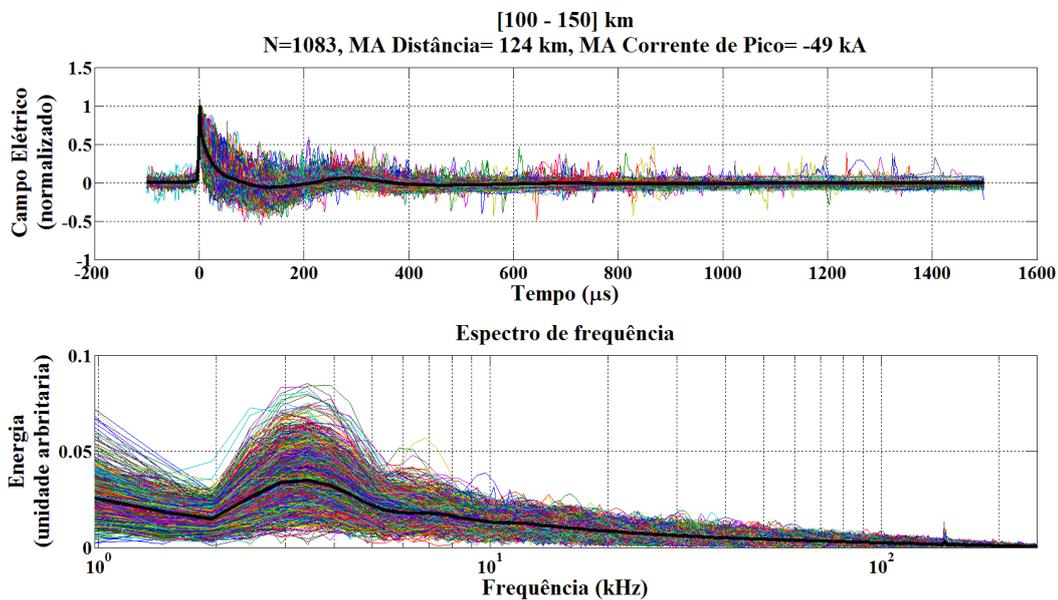
Fonte: Do autor.

Figura B- 16 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 60 e 100 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



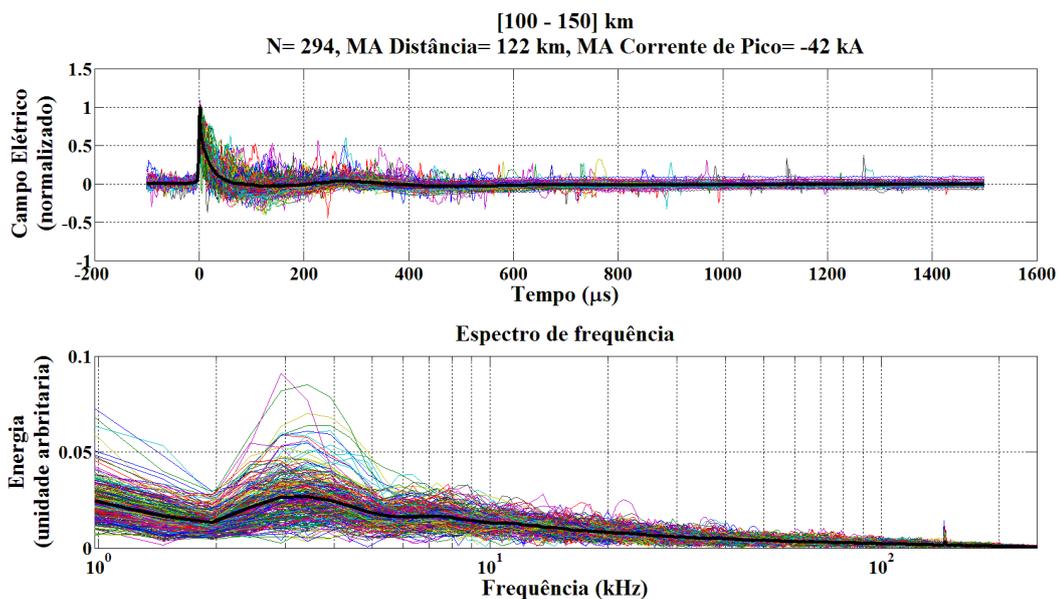
Fonte: Do autor.

Figura B- 17 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 100 e 150 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



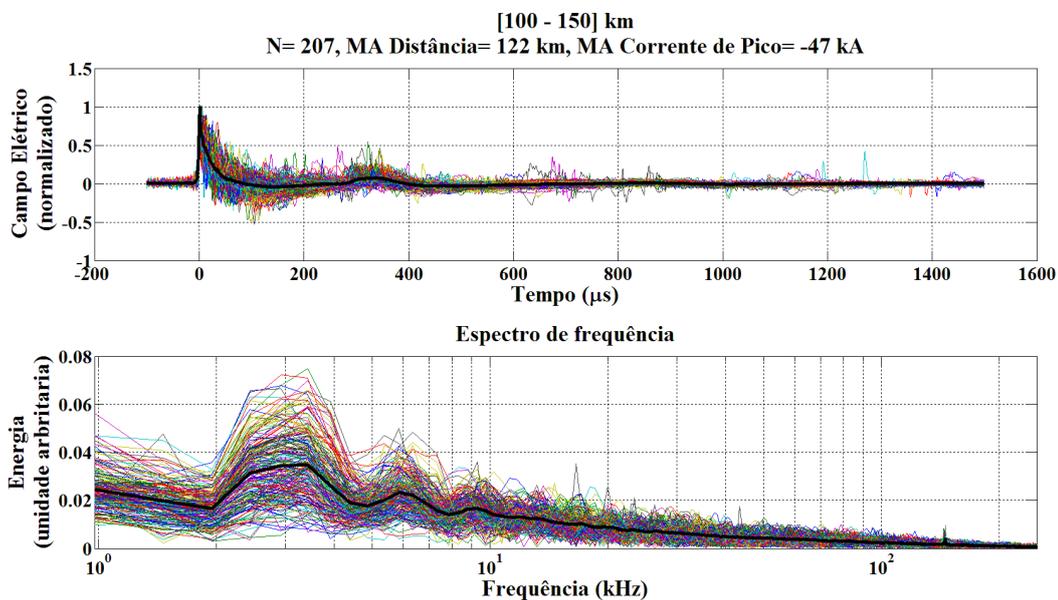
Fonte: Do autor.

Figura B- 18 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 100 e 150 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



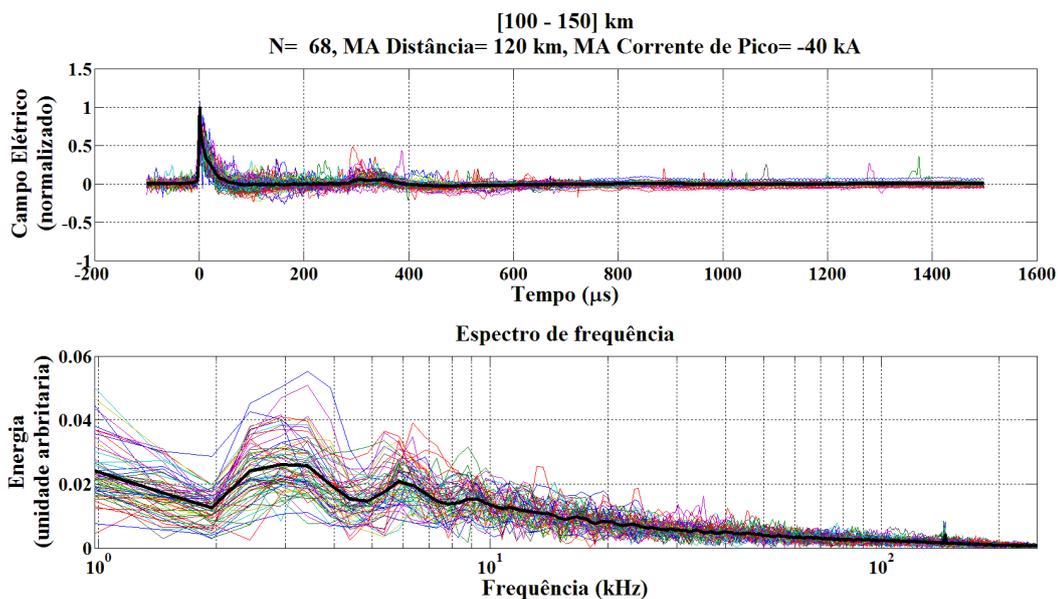
Fonte: Do autor.

Figura B- 19 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 100 e 150 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



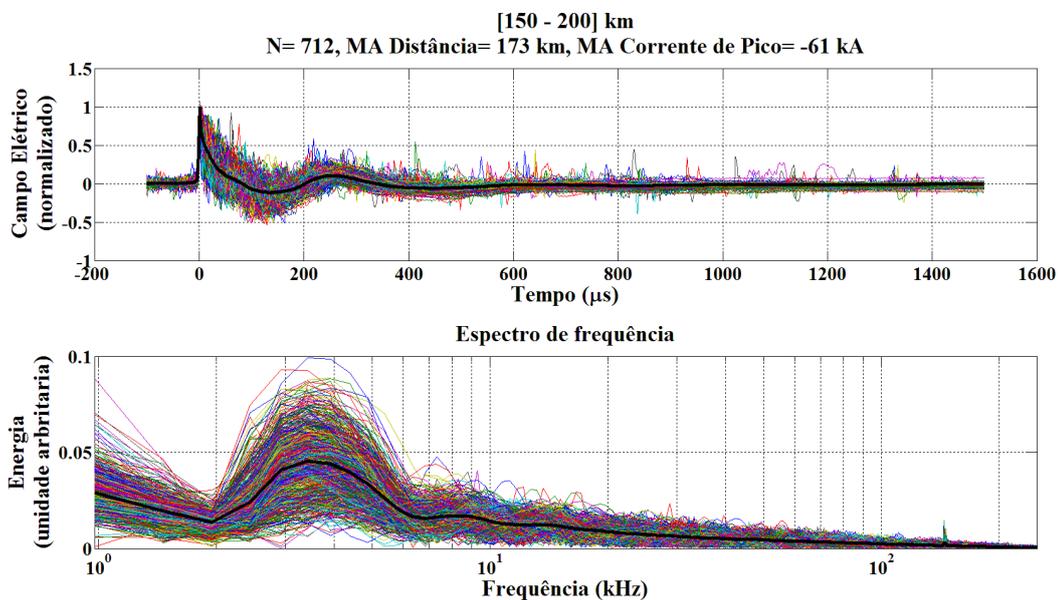
Fonte: Do autor.

Figura B- 20 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 100 e 150 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



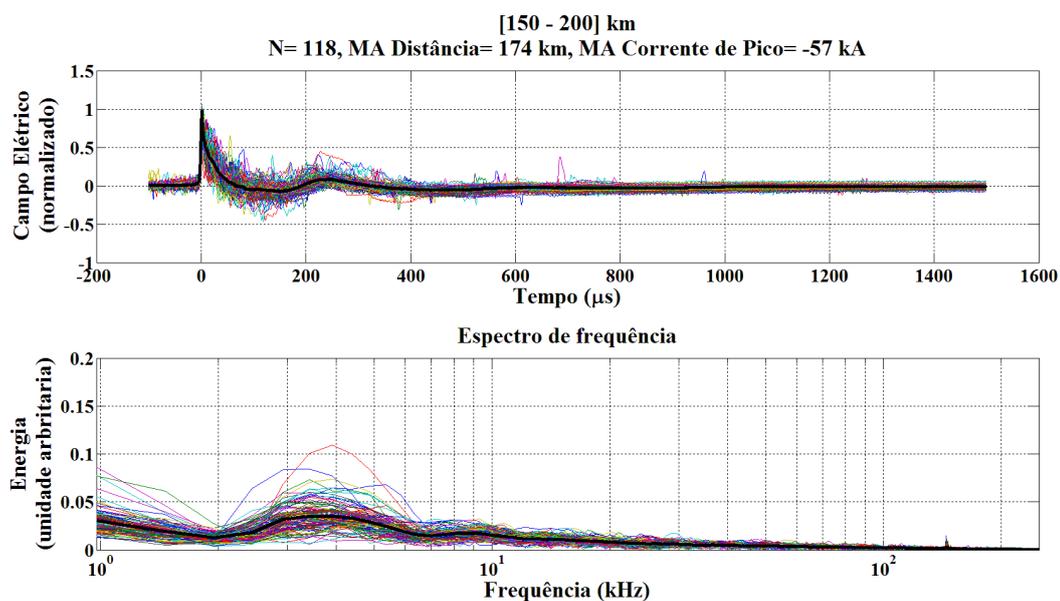
Fonte: Do autor.

Figura B- 21 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 150 e 200 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



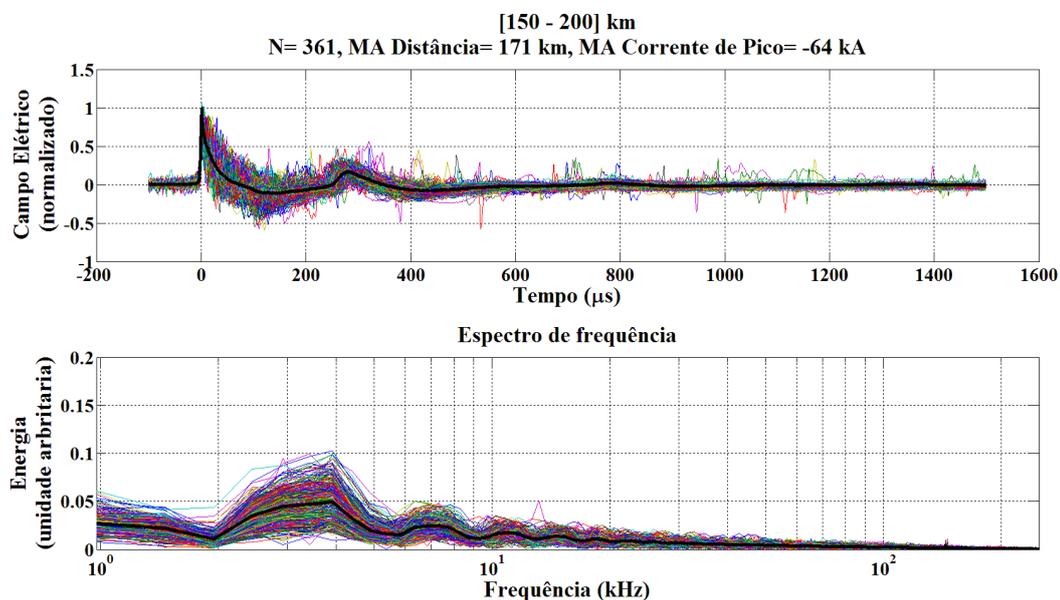
Fonte: Do autor.

Figura B- 22 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 150 e 200 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



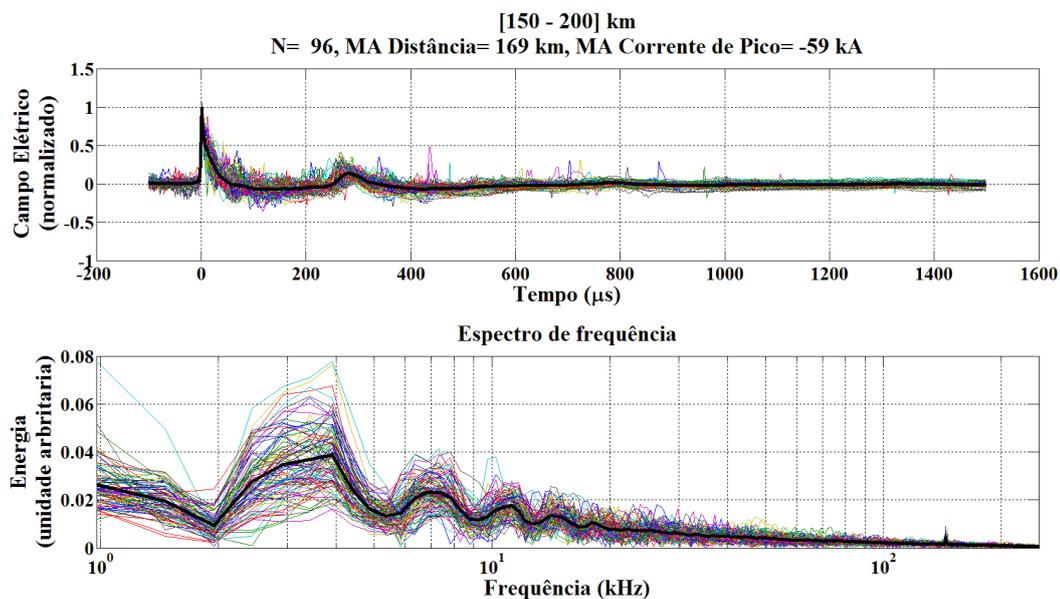
Fonte: Do autor.

Figura B- 23 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 150 e 200 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



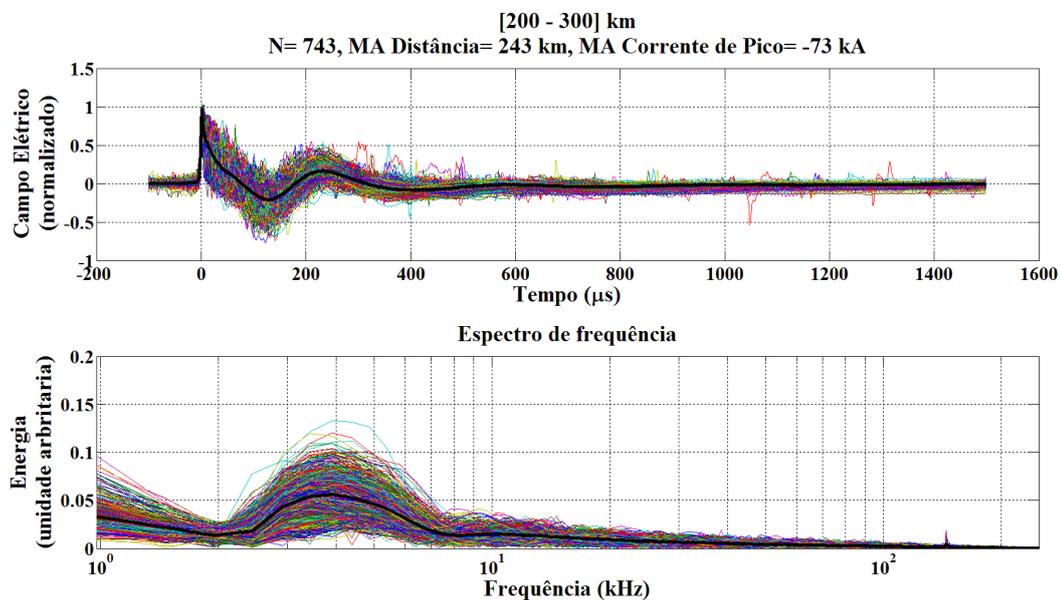
Fonte: Do autor.

Figura B- 24 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 150 e 200 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



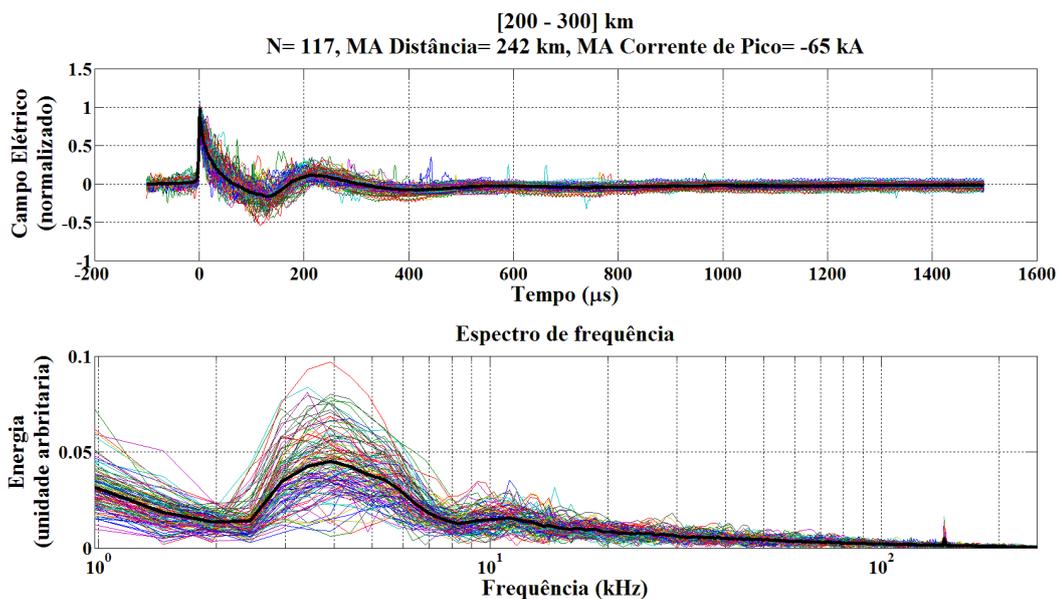
Fonte: Do autor.

Figura B- 25 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 200 e 300 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



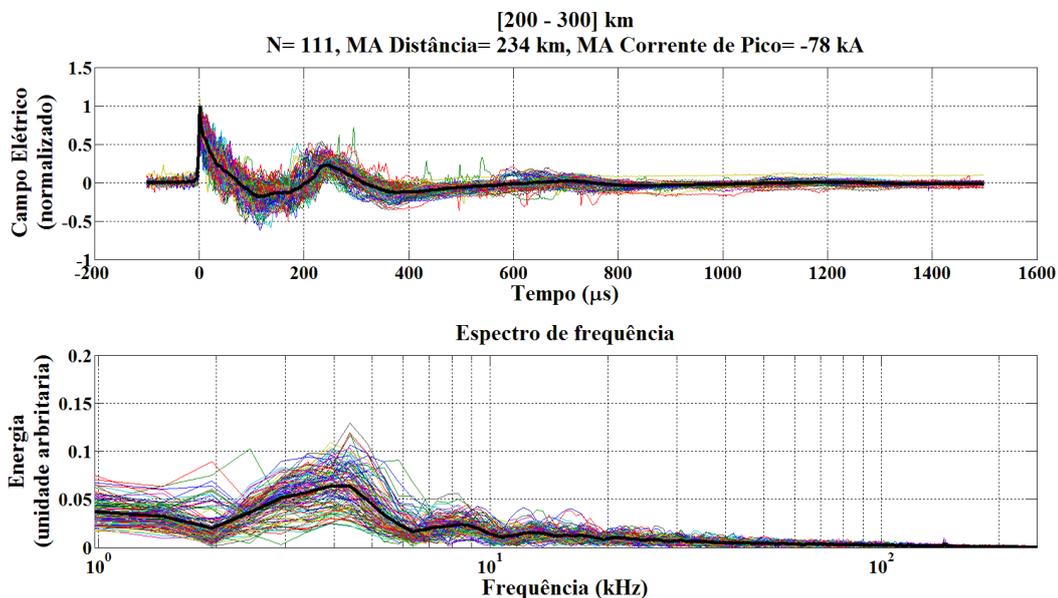
Fonte: Do autor.

Figura B- 26 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 200 e 300 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



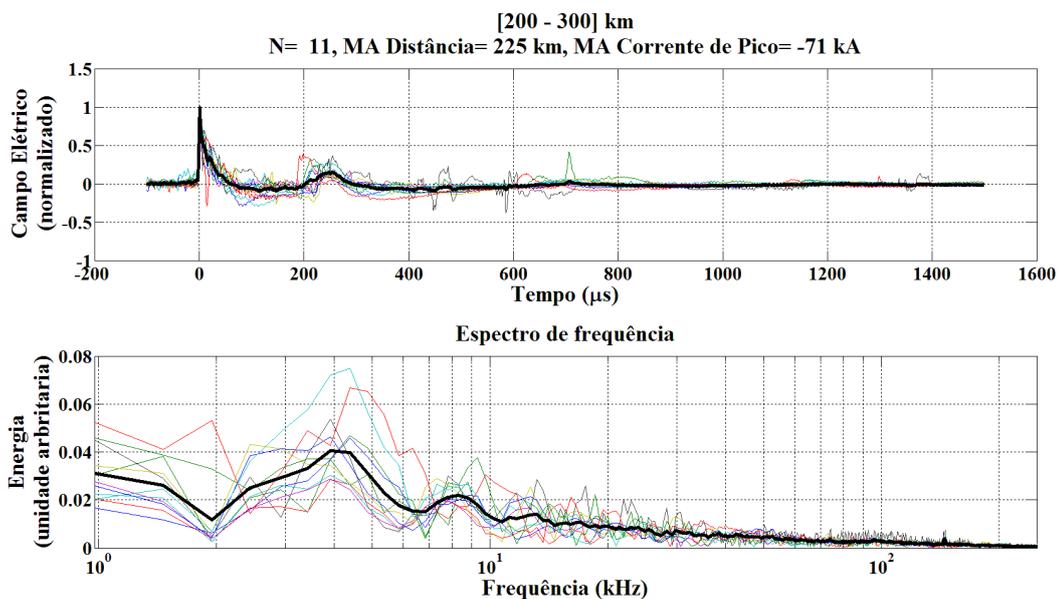
Fonte: Do autor.

Figura B- 27 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 200 e 300 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



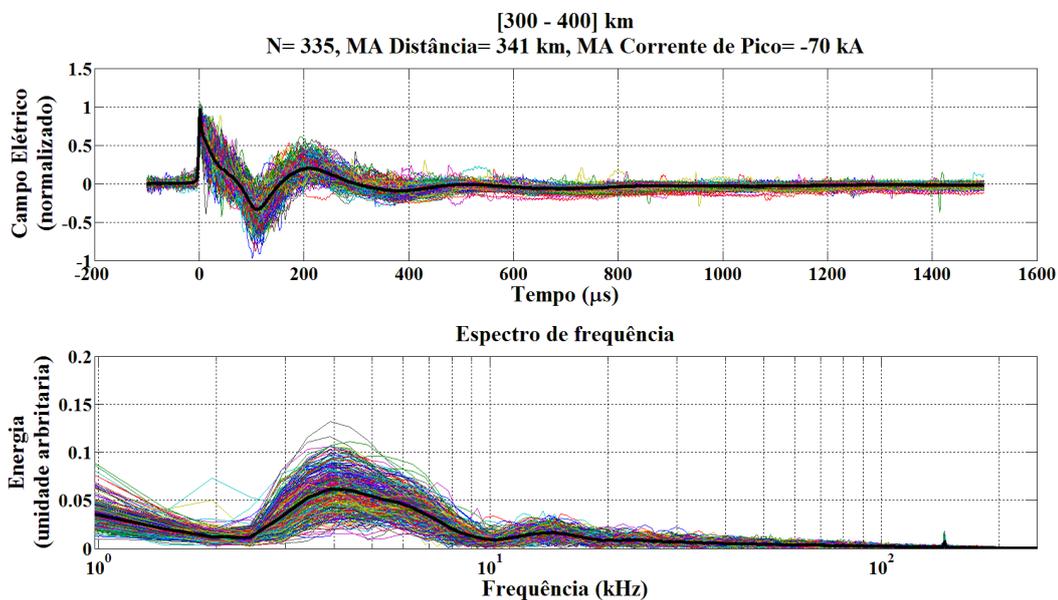
Fonte: Do autor.

Figura B- 28 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 200 e 300 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



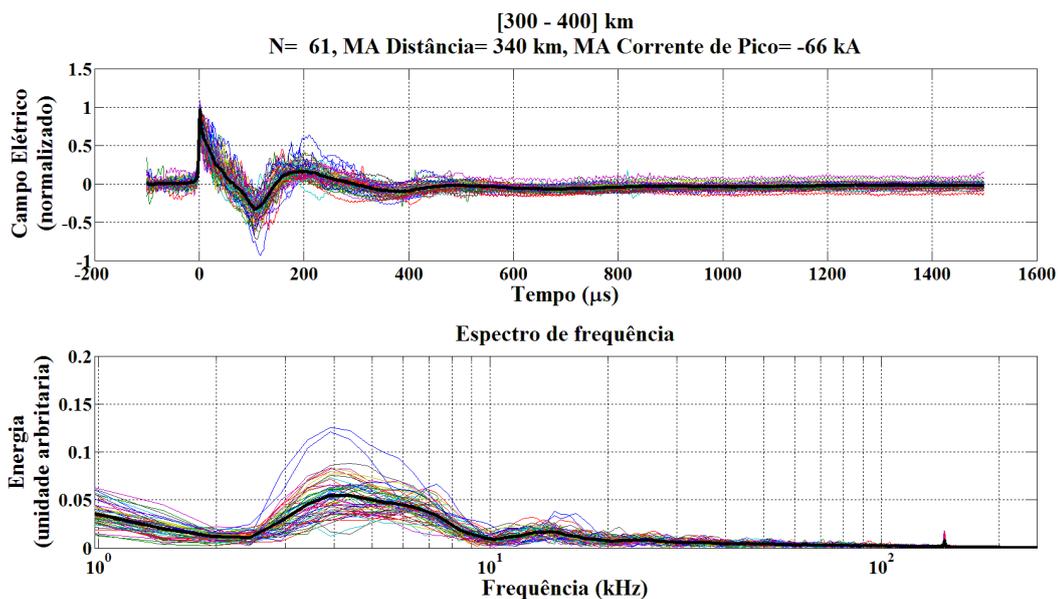
Fonte: Do autor.

Figura B- 29 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 300 e 400 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



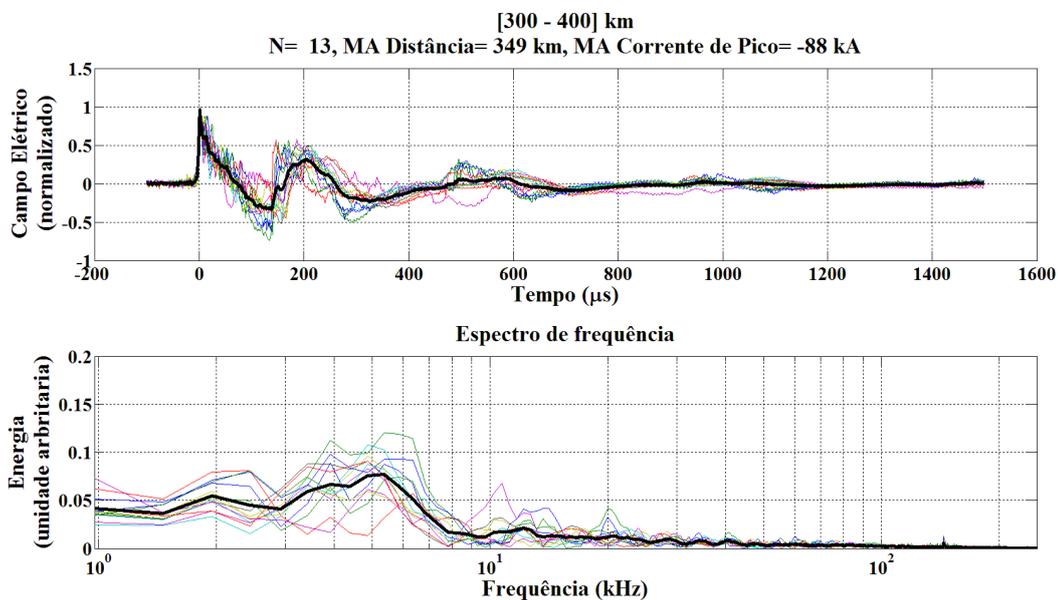
Fonte: Do autor.

Figura B- 30 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 300 e 400 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



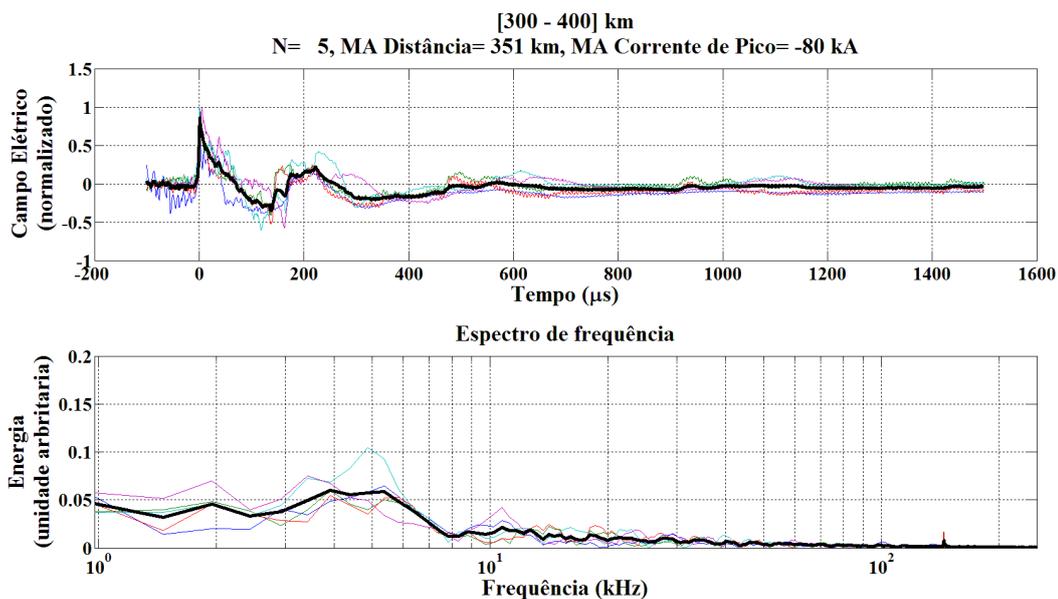
Fonte: Do autor.

Figura B- 31 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 300 e 400 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



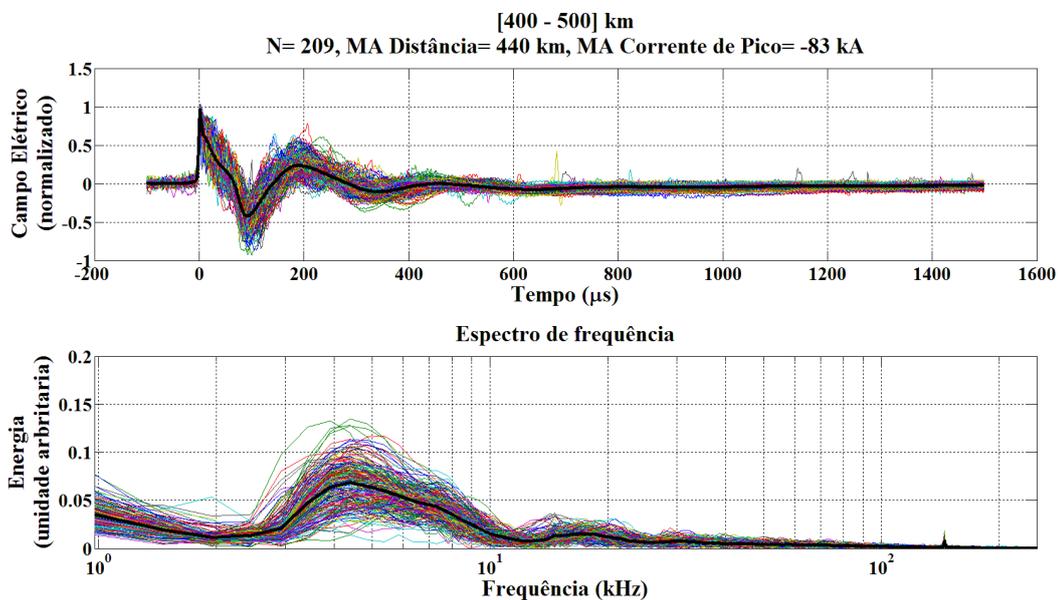
Fonte: Do autor.

Figura B- 32 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 300 e 400 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



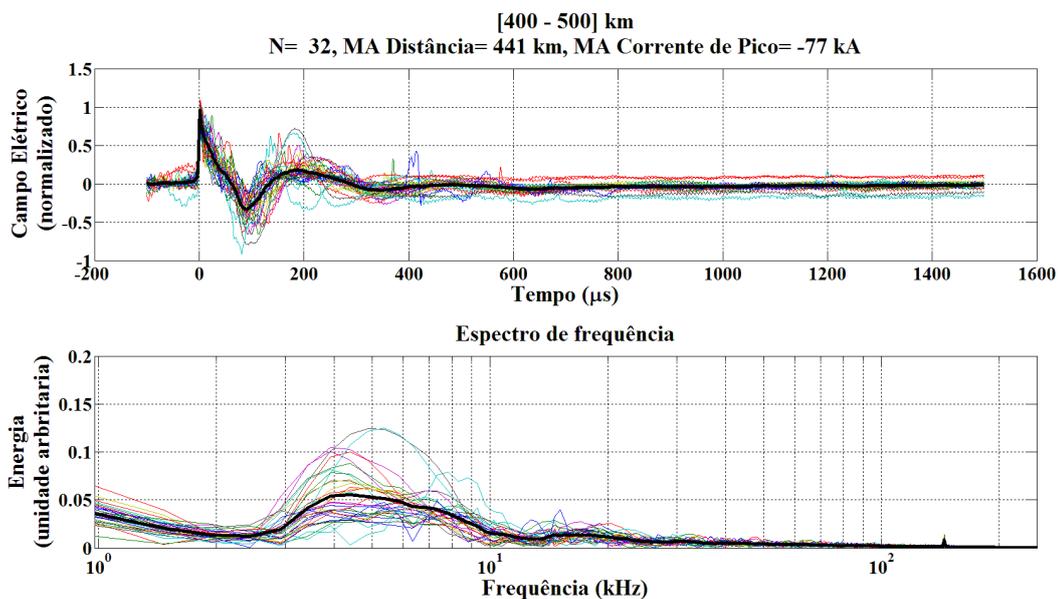
Fonte: Do autor.

Figura B- 33 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 400 e 500 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



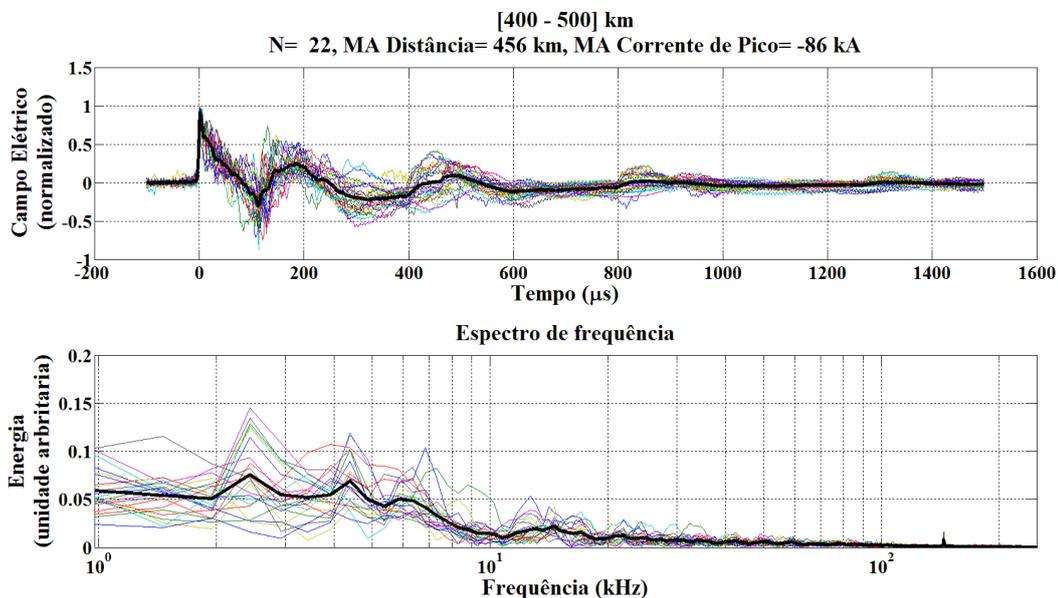
Fonte: Do autor.

Figura B- 34 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 400 e 500 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



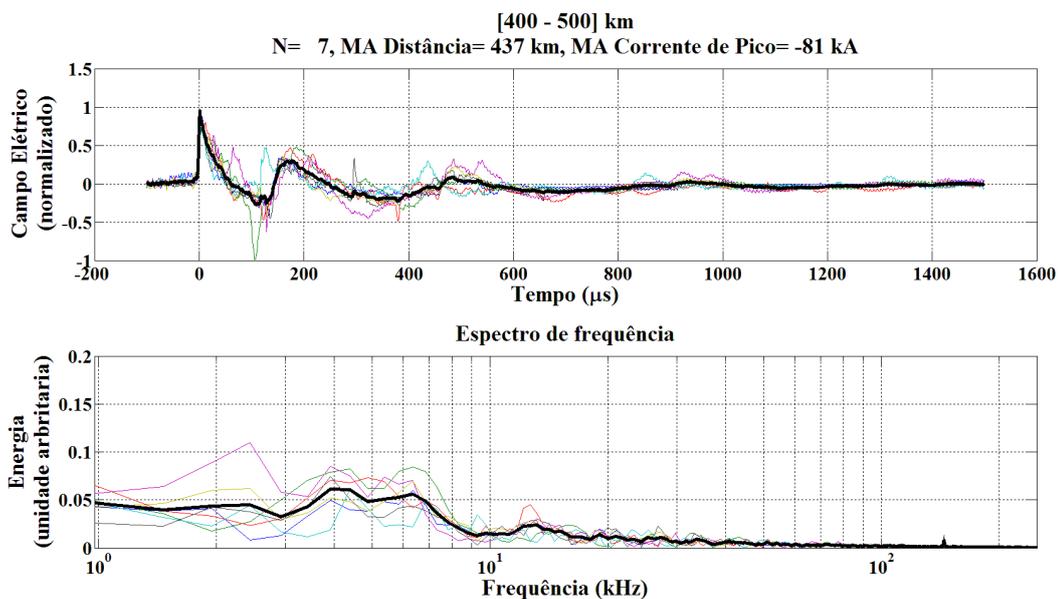
Fonte: Do autor.

Figura B- 35 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 400 e 500 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



Fonte: Do autor.

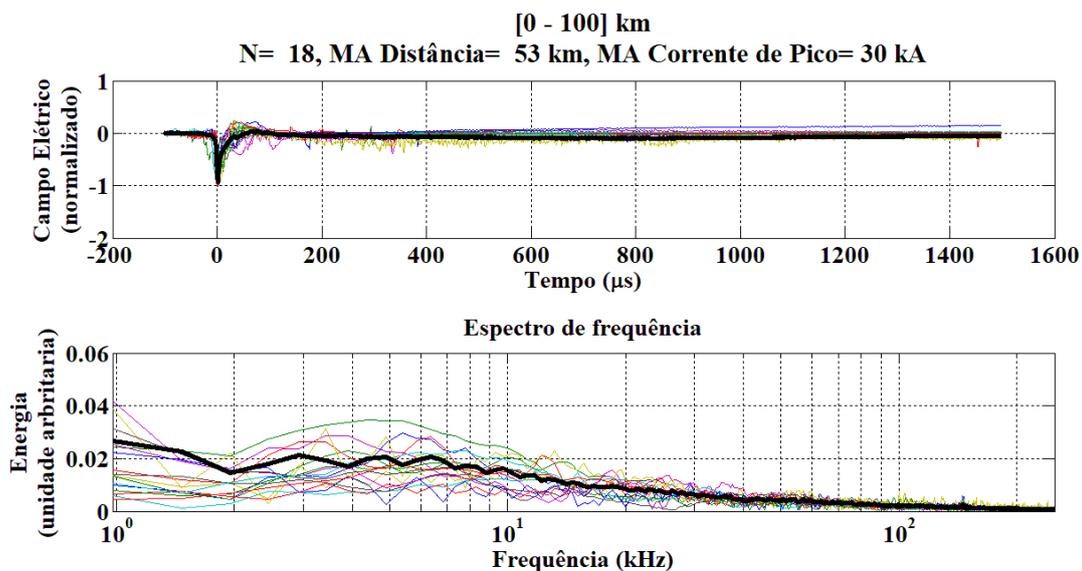
Figura B- 36 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 400 e 500 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



Fonte: Do autor.

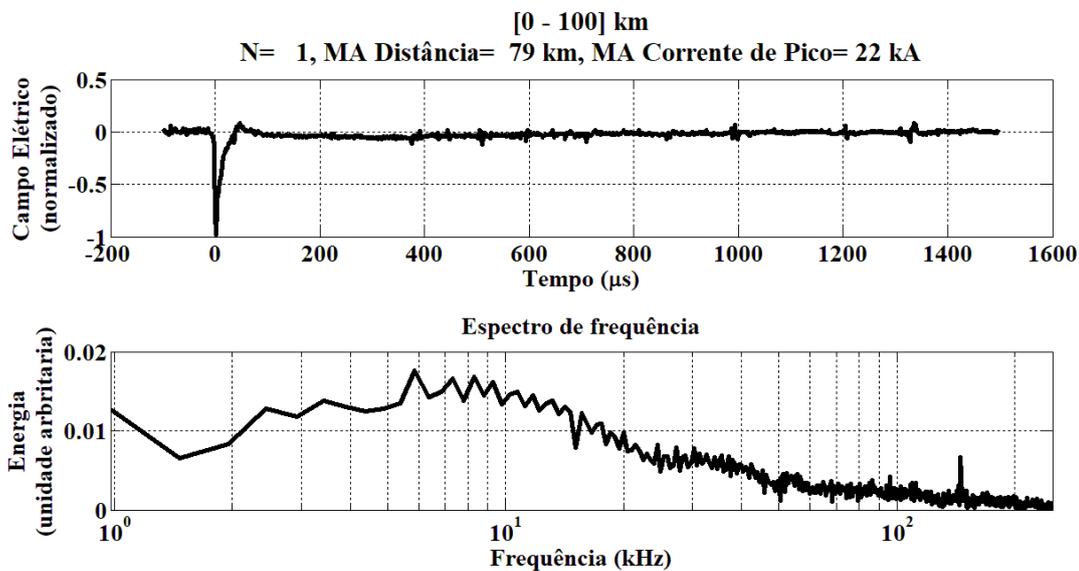
Raios +CG

Figura B- 37 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (+CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 0 e 100 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



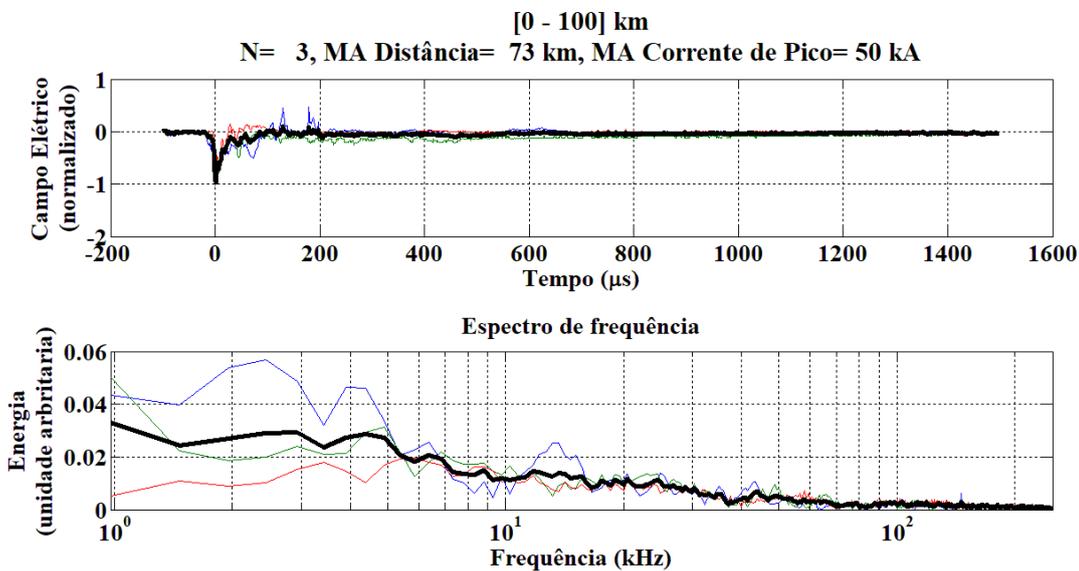
Fonte: Do autor.

Figura B- 38 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (+CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 0 e 100 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



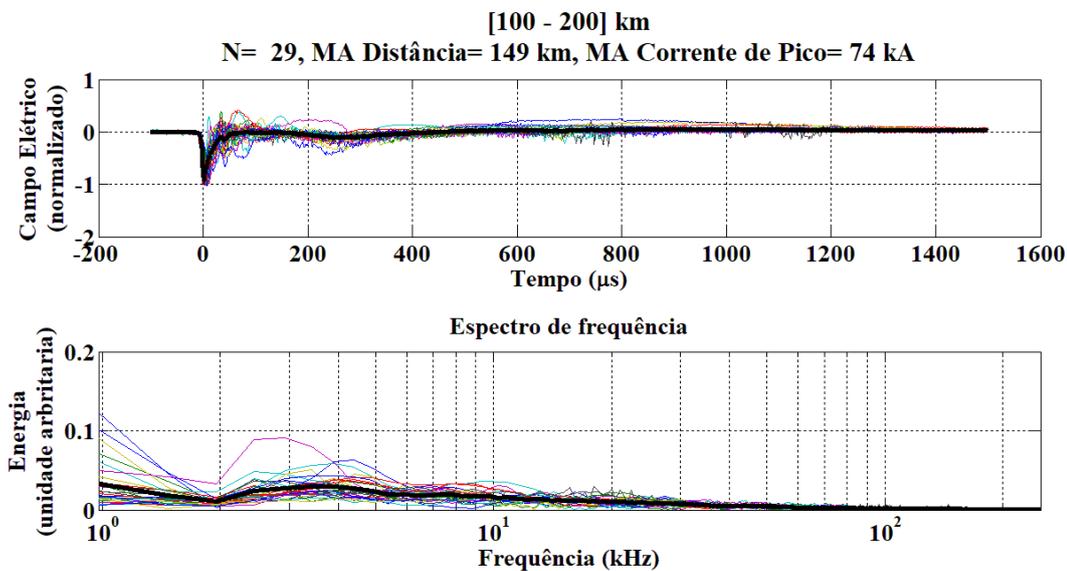
Fonte: Do autor.

Figura B- 39 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 0 e 100 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



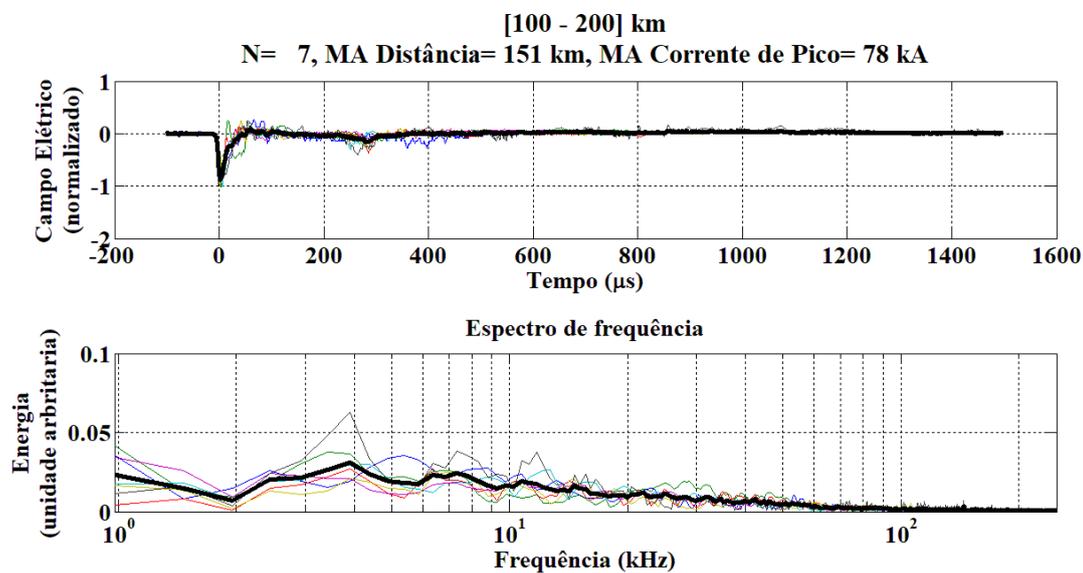
Fonte: Do autor.

Figura B- 40 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (+CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 100 e 200 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



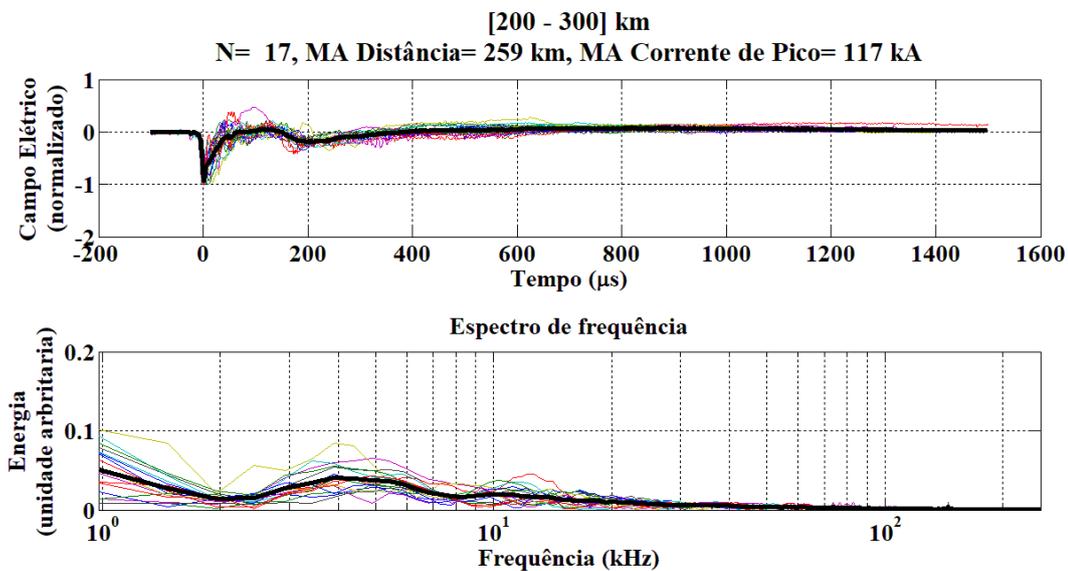
Fonte: Do autor.

Figura B- 41 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 100 e 200 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



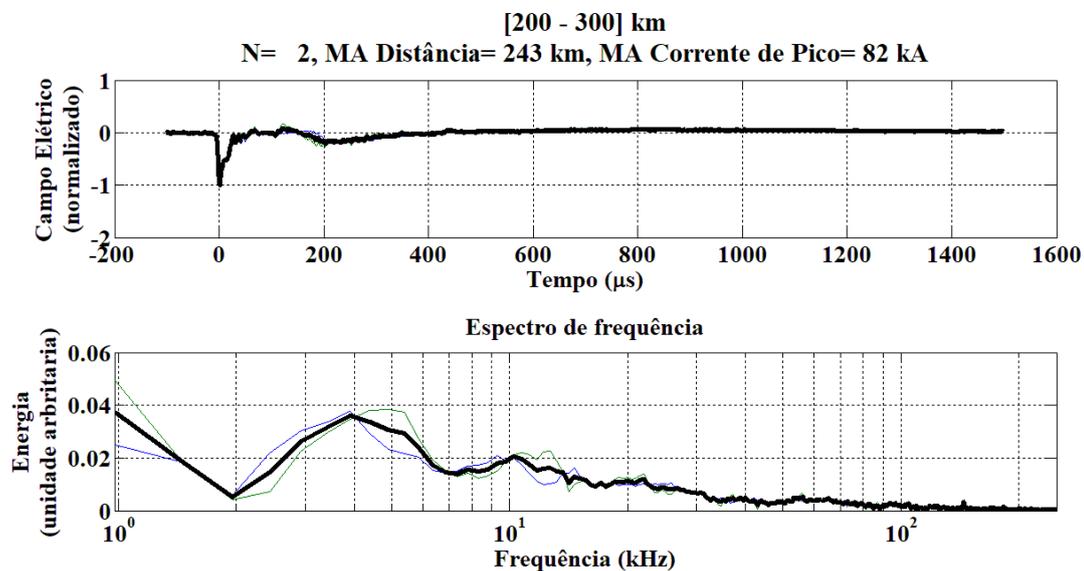
Fonte: Do autor.

Figura B- 42 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (+CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 200 e 300 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



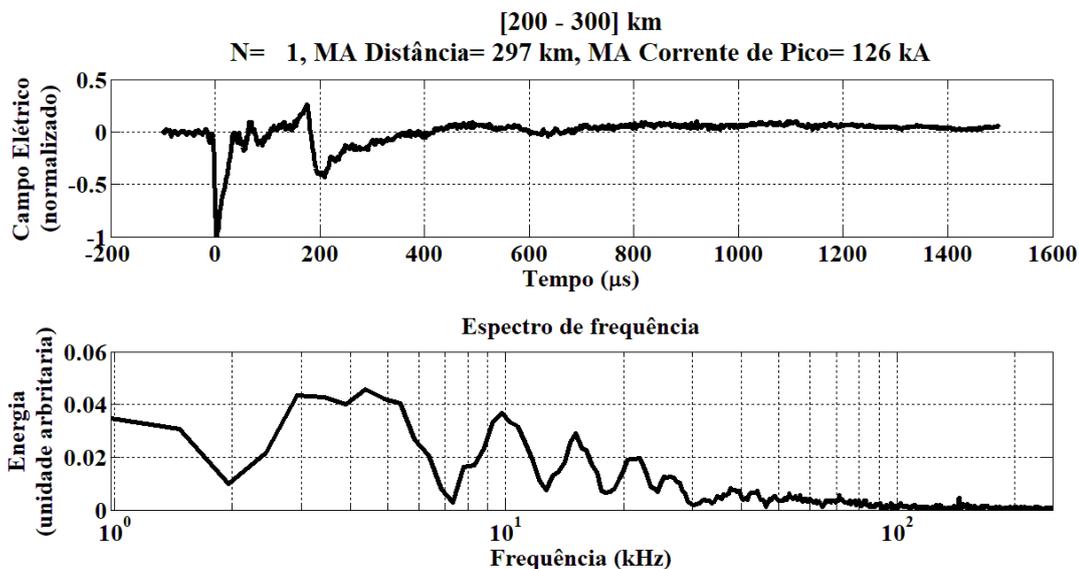
Fonte: Do autor.

Figura B- 43 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (+CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 200 e 300 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



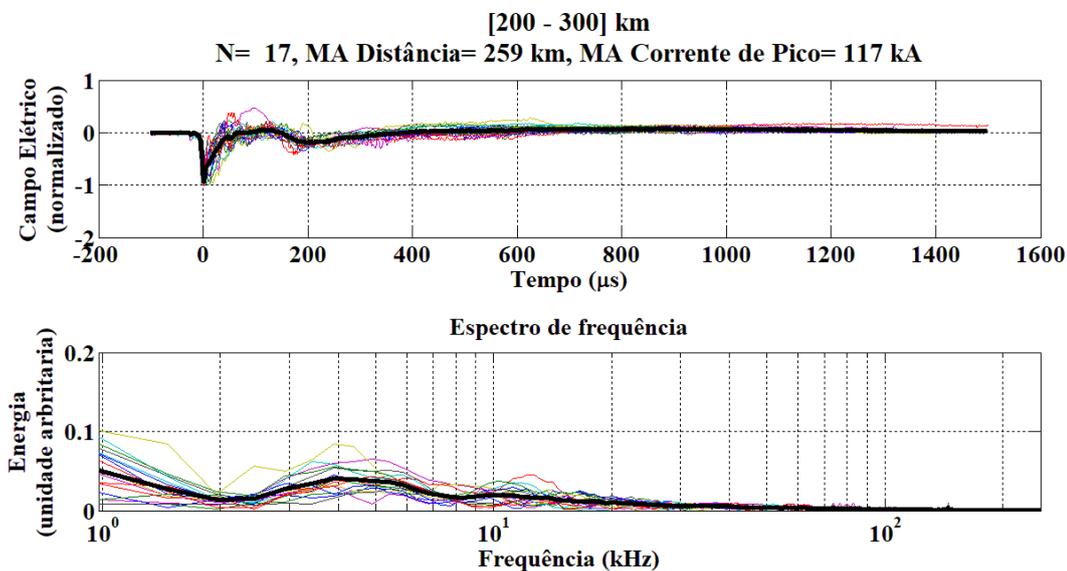
Fonte: Do autor.

Figura B- 44 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 200 e 300 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



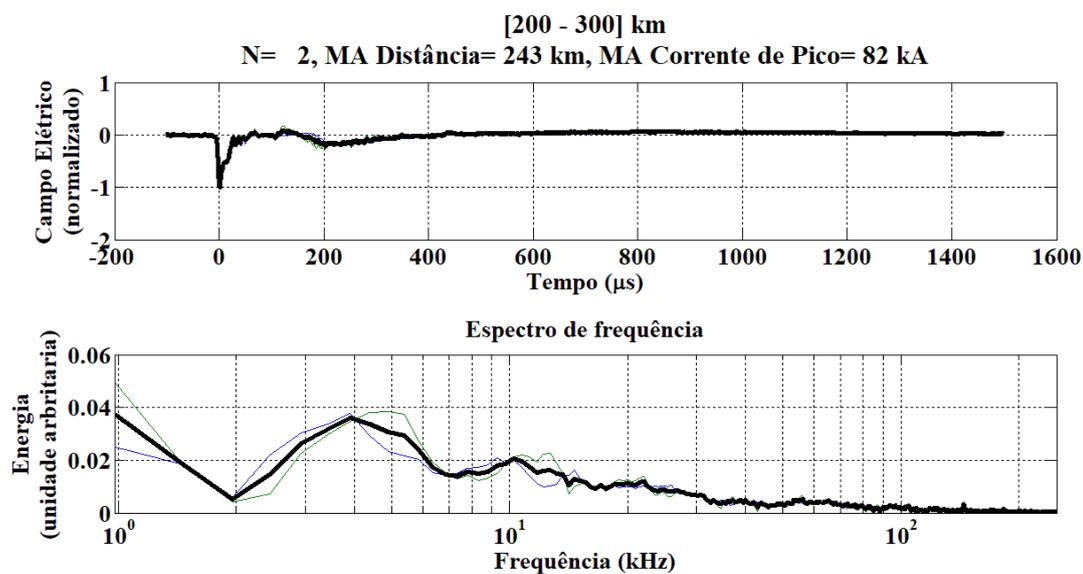
Fonte: Do autor.

Figura B- 45 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (+CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 200 e 300 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



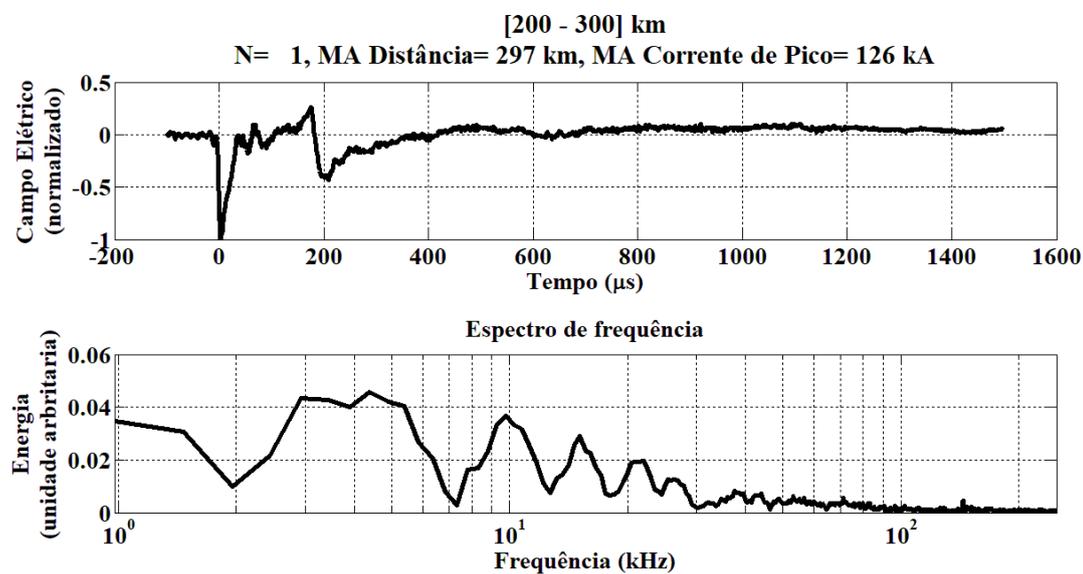
Fonte: Do autor.

Figura B- 46 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (+CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 200 e 300 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



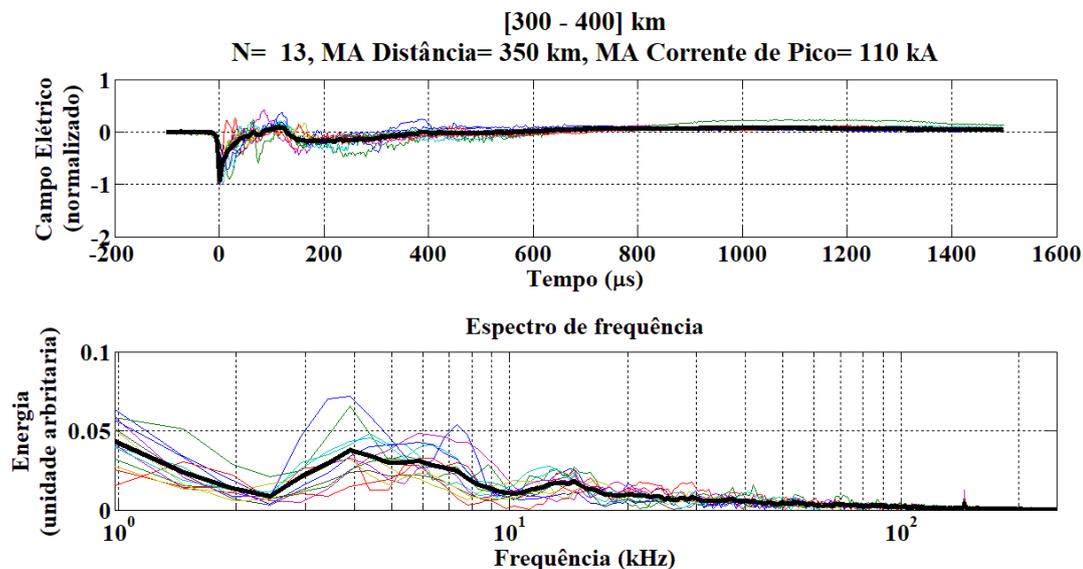
Fonte: Do autor.

Figura B- 47 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 200 e 300 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



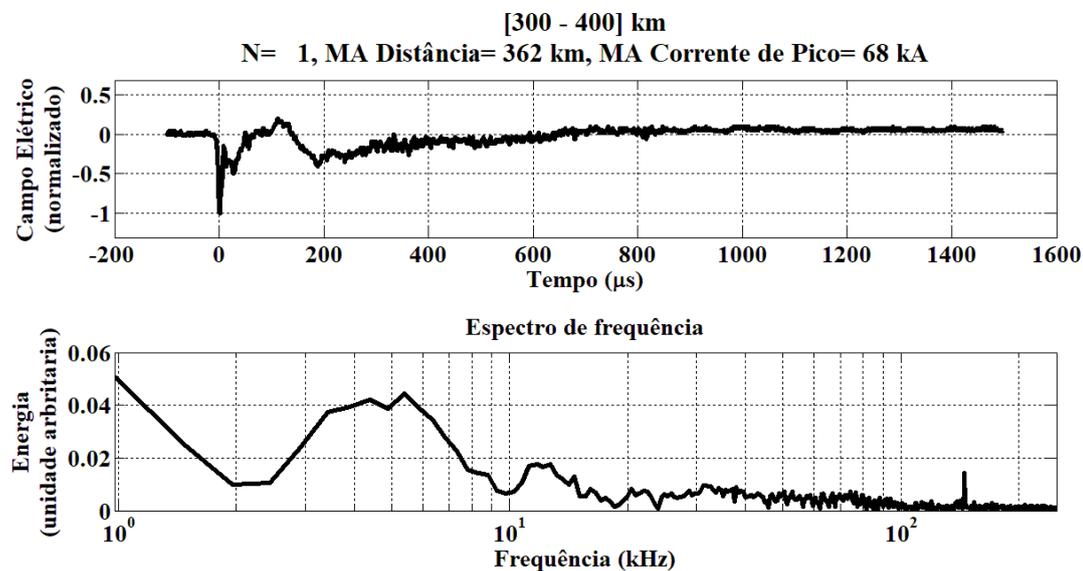
Fonte: Do autor.

Figura B- 48 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (+CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 300 e 400 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



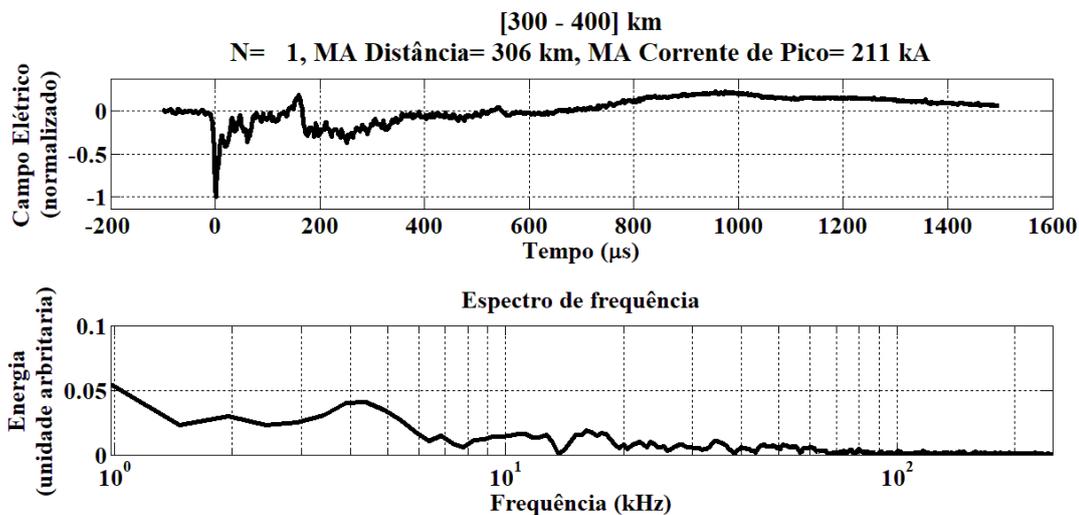
Fonte: Do autor.

Figura B- 49 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para descargas de retorno subsequentes de raios (+CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 300 e 400 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



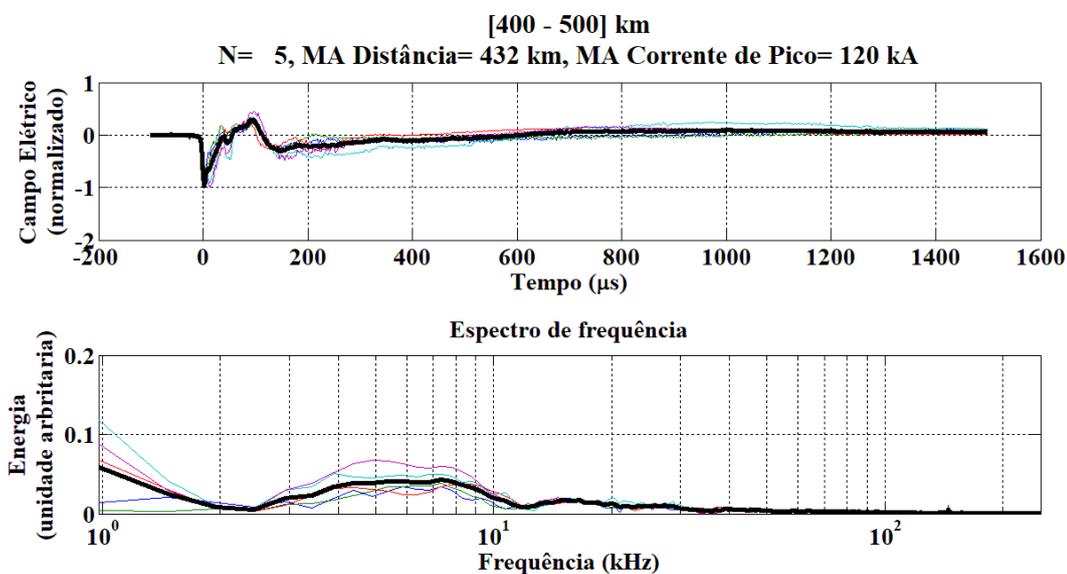
Fonte: Do autor.

Figura B- 50 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (-CG) que ocorreram no período da noite entre as distâncias de 300 e 400 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



Fonte: Do autor.

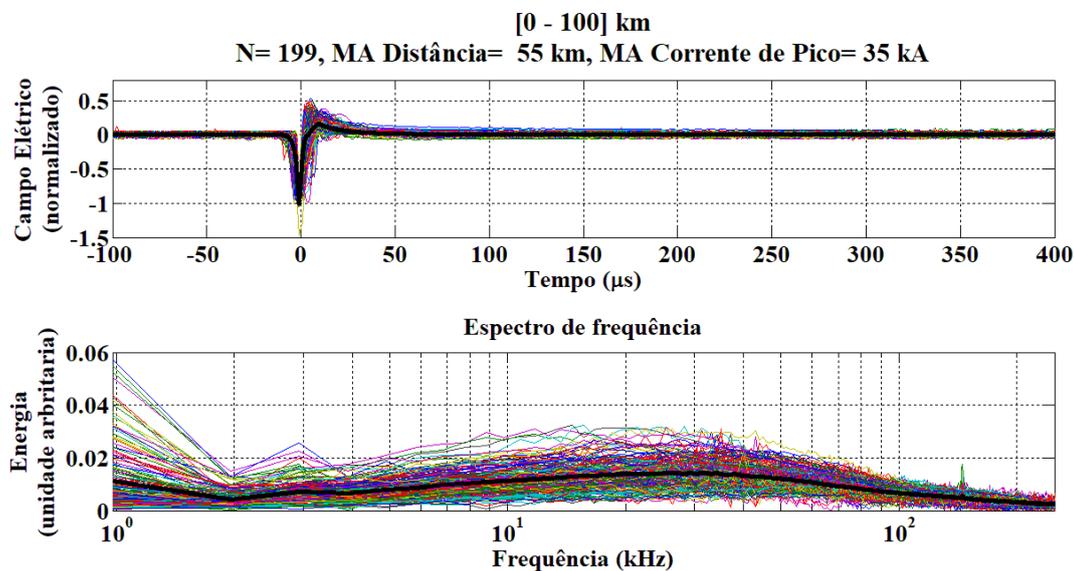
Figura B- 51 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para primeiras descargas de retorno de raios (+CG) que ocorreram no período do dia entre as distâncias de 300 e 400 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



Fonte: Do autor.

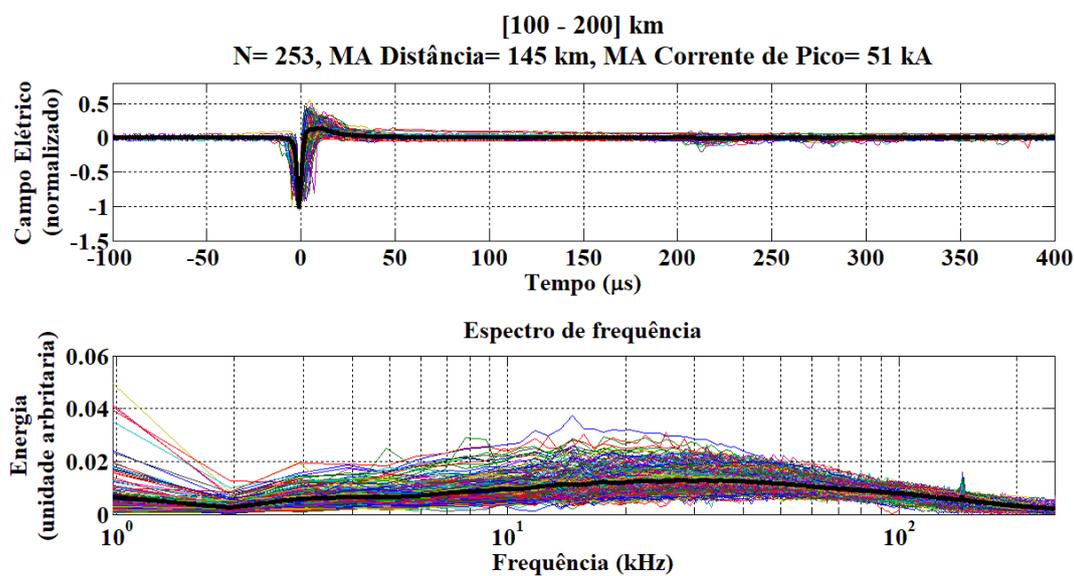
CIDs

Figura B- 52 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para um (CID) que ocorreu no intervalo ente 0 e 100 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



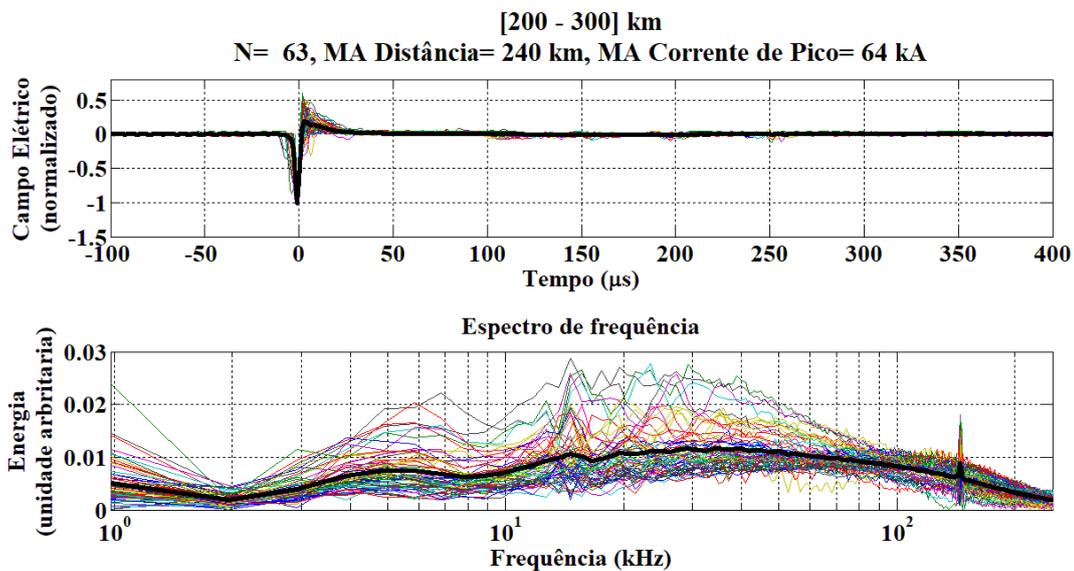
Fonte: Do autor.

Figura B- 53 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para um (CID) que ocorreu no intervalo ente 100 e 200 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



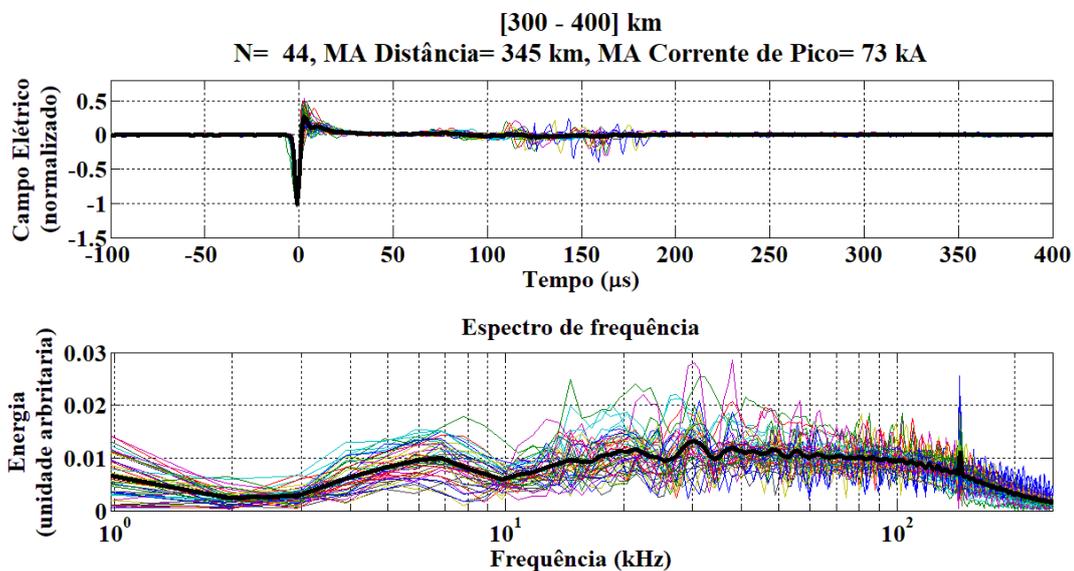
Fonte: Do autor.

Figura B- 54 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para um (CID) que ocorreu no intervalo ente 200 e 300 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



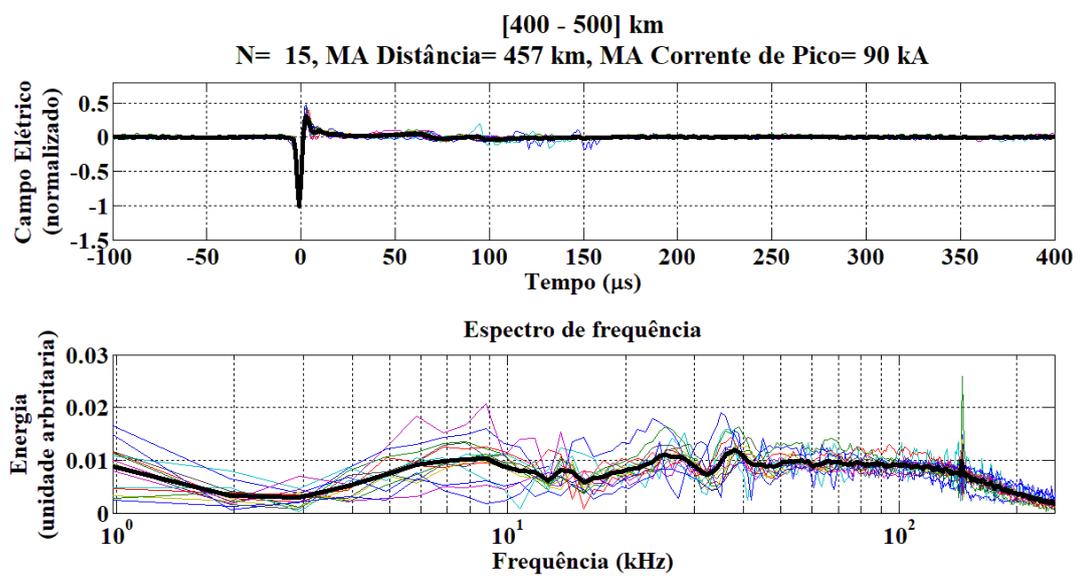
Fonte: Do autor.

Figura B- 55 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para um (CID) que ocorreu no intervalo ente 300 e 400 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



Fonte: Do autor.

Figura B- 56 – Assinatura da forma de onda do campo elétrico no domínio do tempo e da frequência para um (CID) que ocorreu no intervalo ente 400 e 500 km. Assim como as formas de onda utilizadas para geração das assinaturas.



Fonte: Do autor.