



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

RICARDO DE ANDRADE SHINKAI

**UM SIMULADOR PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS
LOCAIS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NUVEM-SOLO EM SISTEMAS DE
DETECÇÃO INDIRETA**

DM: 01/2017

UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2017

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

RICARDO DE ANDRADE SHINKAI

**UM SIMULADOR PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS
LOCAIS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NUVEM-SOLO EM SISTEMAS DE
DETECÇÃO INDIRETA**

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

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Brigida Ramati Pereira da Rocha

UFPA/ITEC/PPGEE
Belém-PA
2017

**Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA**

Shinkai, Ricardo de Andrade, 1967

Um simulador para avaliação da influência das características locais das descargas atmosféricas nuvem-solo em sistemas de detecção indireta / Ricardo de Andrade Shinkai - 2017.

Orientadora: Brígida Ramati Pereira da Rocha

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2017.

1. Descargas elétricas. 2. Eletricidade atmosférica. 3. Método de simulação.
I. Título.

CDD 23. ed. 551.5632

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

“Um simulador para avaliação da influência das características locais das descargas atmosféricas nuvem-solo em sistemas de detecção indireta”

Autor: Ricardo de Andrade Shinkai

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora aprovada pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, sendo julgada adequada para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

Aprovada em: Belém-PA, 10 de janeiro de 2017

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Brigida Ramati Pereira da Rocha
Orientadora – PPGEE/UFPA

Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Junior
Avaliador Interno – PPGEE/UFPA

Prof.^a Dr.^a Valquiria Gusmão Macedo
Avaliadora Externa ao Programa – FEE/UFPA

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

Prof. Dr. José Alberto Silva de Sá
Avaliador Externo - UEPA

Dedico este trabalho

A Deus e aos amigos do mundo invisível que me acompanham e protegem

A minha mãe Nazaré Shinkai e ao meu pai Riuji Shinkai (in memoriam)

A minha família, luz da minha vida: Jéssica e Ricardinho

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Paula Jéssica e ao meu filho Ricardo por todo apoio e compreensão pelos momentos de ausência durante a realização do trabalho.

A minha orientadora Prof.^a Dr.^a Brigida Ramati Pereira da Rocha por ter acreditado na minha capacidade e dado esta oportunidade de mudar a minha vida.

Ao corpo gestor do CENSIPAM por oportunizar a realização do mestrado através da compensação de horas.

Aos colegas de trabalho do CR-BE que me ajudaram, incentivaram e aconselharam: Marcio Nirlando Lopes, Nilzele Gomes Jesus, Daniele Santos Nogueira, e em especial aos colegas da minha coordenação: Arilson Galdino da Silva, Alen Costa Vieira, Juliana Monteiro Costa, Anderson Barbosa de Moraes e Edson Marques da Silva, meu profundo agradecimento a todos vocês.

Aos pesquisadores Carlos Simões Pereira, Diego Guimarães dos Santos, Adônis Ferreira Raiol Leal e Fabio Romero, pelo incentivo e contribuições técnicas.

Aos demais professores da banca examinadora: Prof. Dr. José Alberto Silva de Sá, Prof. Dr. José Ricardo Santos de Souza, Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Júnior e Prof.^a Dr.^a Valquíria Gusmão Macedo, por ter tido a honra desta avaliação com os comentários preciosos.

Ao corpo docente da Universidade Federal do Pará, através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do seu Instituto de Tecnologia, em especial à secretaria do PPGEE e sua Coordenação, por fomentar a pesquisa na Amazônia.

“Quem conheceu a alegria da compreensão conquistou um amigo infalível para a vida. O pensar é para o homem, o que é voar para os pássaros. Não toma como exemplo a galinha quando podes ser uma cotovia.”

Albert Einstein, 1951.

(tradução do texto da carta enviada aos alunos do Colégio Anchieta em Porto Alegre-RS)

RESUMO

O monitoramento do fenômeno das descargas atmosféricas tem sido fundamental para prevenção de incidentes na infraestrutura das empresas que atuam em grandes áreas, como as de energia, telecomunicações e informática. Além disso, fornece dados para o planejamento de sistemas de proteção contra descargas elétricas, evitando assim maiores danos à vida na Terra, e mais recentemente fornecendo informações para sistemas de alertas meteorológicos como os de previsão de tempestades em curto prazo. Portanto, não se trata mais de questão de opção, mas sim de necessidade a instalação e manutenção de sistemas que façam a supervisão destes eventos em escala local, regional e até nacional. Dentre os tipos possíveis, os Sistemas de Detecção Indireta de Descargas Atmosféricas são os que proveem informações mais precisas nas escalas citadas, devido trabalharem com a percepção do impulso eletromagnético gerado pela descarga. Este sinal tem a propriedade de se propagar a médias e longas distâncias em determinadas faixas de frequência, mantendo boa a qualidade da informação do fenômeno que o originou. Porém, a característica fenomenológica dos raios é intrínseca à área monitorada, tornando fundamental o entendimento dessas especificidades para melhor proveito dos sistemas citados. Este trabalho apresenta uma ferramenta computacional para simular a influência das características locais na propagação de ondas eletromagnéticas originadas por descargas atmosféricas nuvem-solo. A metodologia foi utilizada para simular a propagação dessas ondas através do programa MATLAB®, usando como modelo de corrente de retorno no canal de descarga o modelo do tipo de engenharia Linha de Transmissão (TL) para representar o fenômeno elétrico gerado pelo raio.

Palavras-chave: descarga atmosférica. modelo TL. propagação de ondas eletromagnéticas. sistemas LLS. simulação computacional.

ABSTRACT

The monitoring of the phenomenon of atmospheric discharges has been fundamental to prevent incidents in the infrastructure of companies that operate in large areas, such as energy, telecommunications and information technology. In addition, it provides data for the planning of lightning protection systems, thus avoiding further damage to life on Earth, and more recently providing information for weather warning systems such as short-term storm forecasting. Therefore, it is no longer a matter of choice, but rather the need to install and maintain systems that supervise these events on a local, regional and even national scale. Among the possible types, the Lightning Location Systems are the ones that provide more accurate information in the mentioned scales, because they work with the perception of the electromagnetic impulse generated by the lightning. This signal has the property of propagating at medium and long distances in certain frequency bands, maintaining good the information quality of the phenomenon that originated it. However, the phenomenological characteristic of the lightning is intrinsic to the monitored area, making fundamental the understanding of these specificities to better benefit the mentioned systems. This work presents a computational tool to simulate the influence of local characteristics on the propagation of electromagnetic waves caused by cloud-to-ground lightning. The methodology was used to simulate the propagation of these waves through the MATLAB® program, using as model of return current in the discharge channel the model of engineering type the Transmission Line (TL) to represent the electric phenomenon generated by the lightning.

Keywords: computer simulation. lightning. LLS systems. propagation of electromagnetic waves. TL model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Infográfico de mortes por raios no Brasil.....	30
Figura 1.2 – Raio mata 36 animais durante temporal	31
Figura 1.3 – Raio mais mortal da história mata 323 renas na Noruega	31
Figura 1.4 – Rede NALDN em 04/2010	33
Figura 1.5 – Rede EUCLID em 12/2014	34
Figura 1.6 – Rede RINDAT em 2009	35
Figura 1.7 – Rede RINDAT em 2016	36
Figura 1.8 – Rede BrasilDAT em 2016	37
Figura 1.9 – Localização dos sensores da RDR-SIPAM.....	38
Figura 1.10 – Mapa de cobertura espacial dos sensores da RDR-SIPAM.....	43
Figura 1.11 – Eficiência de detecção da RDR-SIPAM	44
Figura 1.12 – Antenas e sensor LPATS IV no CRBE.....	47
Figura 2.1 – Descarga atmosférica de nuvem de tempestade.....	49
Figura 2.2 – Descarga atmosférica de erupção vulcânica	50
Figura 2.3 – CEAG.....	51
Figura 2.4 – Nuvem cumulonimbus.....	52
Figura 2.5 – Nuvem eletrificada dipolar.....	54
Figura 2.6 – Tipos de descargas nuvem-solo	55
Figura 2.7 – Formação canal de descarga dos raios nuvem-solo negativos	56
Figura 2.8 – Evolução temporal de um raio nuvem-solo negativo.....	57
Figura 2.9 – Constituição básica de um LLS.....	59
Figura 2.10 – Onda eletromagnética.....	61
Figura 2.11 – Espectro eletromagnético	61
Figura 2.12 – Padronização por faixas de frequências de comunicações	62
Figura 2.13 – Radiações eletromagnéticas dos raios	62
Figura 2.14 – Concentração de energia por faixa de frequência nos raios	63
Figura 2.15 – Componentes de uma onda radiada.....	64
Figura 2.16 – Evolução dos sensores Vaisala	68
Figura 2.17 – Antenas tipo “loop”	69
Figura 2.18 – Técnica MDF.....	69
Figura 2.19 – Técnica TOA.....	70
Figura 2.20 – TOA com solução ambígua.....	70

Figura 2.21 – Técnica das interseções circulares.....	70
Figura 2.22 – Técnica IMPACT	71
Figura 2.23 – Técnica interferométrica	72
Figura 2.24 – Triangulação por interferometria.....	72
Figura 2.25 – Distribuição gaussiana de erro de localização.....	73
Figura 2.26 – Elipse de segurança para geometria desfavorável.....	74
Figura 2.27 – Elipse de segurança para geometria favorável.....	74
Figura 2.28 – Parâmetros geométricos para determinação das resultantes dos campos.....	81
Figura 2.29 – Parâmetros geométricos para cálculo dos campos eletromagnéticos	92
Figura 2.30 – Formas de onda de campo elétrico vertical e densidade de fluxo magnético horizontal	94
Figura 2.31 – Forma de onda típica de campo elétrico originado a partir de descarga nuvem-solo negativa.....	95
Figura 2.32 – Exemplos de forma de onda de campos elétricos devido à descarga nuvem-solo negativa.....	97
Figura 2.33 – Exemplo de forma de onda de campo elétrico devido à descarga nuvem-solo positiva.....	98
Figura 2.34 – Forma de onda típica de campo elétrico originado a partir de descarga intranuvem	98
Figura 3.1 – Parâmetro janela de coincidência.....	102
Figura 3.2 – Corrente na base do canal e sua derivada do experimento de Nucci et al.....	104
Figura 3.3 – Corrente ao longo do canal para o modelo MTL do experimento de Nucci et al.....	104
Figura 3.4 – AOI e descargas atmosféricas.....	105
Figura 3.5 – Parâmetros geométricos usados na técnica de simulação do campo E_z	107
Figura 3.6 – Corrente na base do canal usada para cálculo do E_z	111
Figura 3.7 – Distribuição espaço-temporal da corrente ao longo do canal.....	111
Figura 3.8 – Comparação entre os resultados obtidos neste trabalho (esquerda) e aqueles obtidos em (NUCCI et al., 1990) (direita) para o campo elétrico vertical E_z	112

Figura 4.1 – Gráficos do MATLAB® para o evento Flash5	117
Figura 4.2 – Validação do gráfico (a) na Figura 4.1	118
Figura 4.3 – Gráficos do MATLAB® para o evento Flash5 após variação de c para c'	120
Figura 4.4 – Validação do gráfico (b) na Figura 4.3	120
Figura 4.5 – Corrente na base do canal usada para cálculo do E_z para $i_p' = 12$ kA.....	121
Figura 4.6 – Gráficos do MATLAB® para o evento Flash5 após variação de i_p para i_p'	123
Figura 4.7 – Validação do gráfico (c) na Figura 4.6	123
Figura 4.8 – Corrente ao longo do canal usada para cálculo do E_z para $v' = 1,2 \times 10^8$ m/s	124
Figura 4.9 – Gráficos do MATLAB® para o evento Flash5 após variação de v para v'	126
Figura 4.10 – Validação do gráfico (d) na Figura 4.9	126
Figura 5.1 – Janela de tempo para o evento Flash5 com velocidade c comparada à situação com velocidade c'	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros físicos das correntes de descargas nuvem-solo negativas.....	58
Tabela 3.1 – Distância entre as localizações dos sensores (m).....	106
Tabela 3.2 – Distância entre os sensores e os eventos (m)	106
Tabela 4.1 – Valor de pico de E_z (V/m)	116
Tabela 4.2 – Tempo de captação do sinal (μs)	116
Tabela 4.3 – Tempo total (μs)	116
Tabela 4.4 – Valor de pico de E_z (V/m) para c'	119
Tabela 4.5 – Tempo de captação do sinal (μs) para c'	119
Tabela 4.6 – Tempo total (μs) para c'	119
Tabela 4.7 – Valor de pico de E_z (V/m) para ip'	122
Tabela 4.8 – Tempo de captação do sinal (μs) para ip'	122
Tabela 4.9 – Tempo total (μs) para ip'	122
Tabela 4.10 – Valor de pico de E_z (V/m) para v'	125
Tabela 4.11 – Tempo de captação do sinal (μs) para v'	125
Tabela 4.12 – Tempo total (μs) para v'	125
Tabela 5.1 – Comparação entre as janelas de tempo do evento Flash5	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
ELAT	Grupo de Eletricidade Atmosférica
LLS	Lightning Location System
LMA	Lightning Mapping Arrays
VLF	Very Low Frequency
VHF	Very High Frequency
LF	Low Frequency
NALDN	North American Lightning Detection Network
EUCLID	European Cooperation for Lightning Detection
NLDN	National Lightning Detection Network
CLDN	Canadian Lightning Detection Network
MDF	Magnetic Direction Finder
TOA	Time Of Arrival
ALDIS	Austrian Lightning Detection and Information System
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
COPEL	Companhia Paranaense de Eletricidade
SISDAT	Sistema de Detecção de Descargas Atmosféricas
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
RIDAT	Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas
RINDAT	Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas
SIDDEM	Sistema Integrado de Detecção de Descargas Atmosféricas e Eventos Meteorológicos Críticos
SIVAM	Sistema de Vigilância da Amazônia
CCST	Centro de Ciência do Sistema Terrestre
LLP	Lightning Location and Protection Inc.
UFPA	Universidade Federal do Pará
RDR-SIPAM	Rede de Detecção de Raios do Sistema de Proteção da Amazônia
CR-BE	Centro Regional de Belém
CENSIPAM	Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia
STARNET	Sferics Timing and Ranging Network
NOA	Observatório Nacional de Atenas

COELCE	Companhia Energética do Ceará
UECE	Universidade Estadual do Ceará
USP	Universidade de São Paulo
MATLAB	Matrix Laboratory
Eletronorte	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A
CELPA	Centrais Elétricas do Pará S.A
SPDA	Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
PDTIC	Plano Diretor de Tecnologia da Informação e Comunicação
CEAG	Circuito Elétrico Atmosférico Global
SLT	Sistemas de Localização de Tempestades
MF	Medium Frequency
HF	High Frequency
AM	Amplitude Modulation
CRDF	Cathode-Ray Direction Finder
ARSI	Atmospheric Research Systems Inc.
LPATS	Lightning Positioning and Tracking System
GAI	Global Atmospherics Inc.
EPRI	Electric Power Research Institute
IMPACT	Improved Accuracy from Combined Technology
ONERA	Agência Nacional de Investigação Aeroespacial Francesa
SAFIR	Système d'Alerte Foudre par Interérométrie Radioélectrique
LDAR	Lightning Detection and Ranging
LA	Location Accuracy
DE	Detection Efficiency
GPS	Global Positioning System
RNSS	Range Normalized Signal Strength
MDG	Modelos de Dinâmica de Gás
MEM	Modelos Eletromagnéticos
RLC	Modelos de Circuito Distribuído
MEN	Modelos de Engenharia
TL	Modelos Tipo Linha de Transmissão
CP	Modelos Tipo Corrente de Propagação
CG	Modelos Tipo Corrente Gerada

MTL	Modelo da Linha de Transmissão
MTLL	Modelo da Linha de Transmissão modificado com Decaimento Linear da Corrente
MTLE	Modelo da Linha de Transmissão modificado com Decaimento Exponencial da Corrente
MBG	Modelo de Bruce e Golde
TCS	Modelo de Fonte de Corrente Viajante
MDU	Modelo de Diendorfer e Uman

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	29
1.1 Considerações iniciais	29
1.2 Motivação e justificativa	45
1.3 Objetivo	47
1.4 Organização do texto	48
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	49
2.1 Fenômeno da descarga atmosférica	49
2.1.1 Conceitos e características	50
2.1.2 Descarga nuvem-solo negativa descendente	55
2.2 Sistemas de detecção e localização de descargas atmosféricas	58
2.2.1 Propagação das ondas eletromagnéticas	60
2.2.2 Sensores e técnicas de localização de descargas atmosféricas	64
2.2.3 Características dos LLS	73
2.3 Análise do campo eletromagnético radiado	80
2.3.1 Representação da corrente no canal de descarga	80
2.3.2 Campos eletromagnéticos originados pelas descargas	91
2.3.3 Padrões de comportamento dos campos distantes	94
3. METODOLOGIA	101
3.1 Contextualização	101
3.2 Parâmetro janela de coincidência	101
3.3 Validação dos modelos de engenharia	102
3.4 Simulação	104
3.4.1 Implementação computacional	107
3.4.2 Validação do procedimento de cálculo do campo	110
3.4.3 Parâmetros: intervalos e variáveis analisadas	113
3.5 Comparação entre os resultados	114
4. RESULTADOS	115
4.1 Simulações com os parâmetros da referência	115
4.2 Simulações considerando a variável $c' = 2,9 \times 10^8$ m/s	119

4.3 Simulações considerando a variável $ip' = 12$ kA	121
4.4 Simulações considerando a variável $v' = 1,2 \times 10^8$ m/s	124
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	127
REFERÊNCIAS	133
APÊNDICE A - Trabalhos utilizando os dados da rede STARNET.....	145

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Brasil é líder mundial em incidências de descargas atmosféricas ou raios¹ (entre os países que estudam o tema) (PORTAL BRASIL, 2016). Foram aproximadamente 58 milhões de raios por ano (57,8 milhões/ano), pela média 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.

Os efeitos deste tipo de evento natural, quando incide diretamente ao solo, têm provocado graves danos materiais às instalações das redes de distribuição elétrica e de telecomunicações pelo mundo, gerando prejuízos financeiros às companhias desses dois setores empresariais, justamente por serem aqueles que têm ativos espalhados em grandes extensões territoriais e constantemente expostos ao meio ambiente. No Brasil, o maior prejudicado é o setor elétrico com a queima de equipamentos, perda de faturamento, aumento das despesas de manutenção e penalizações normativas. Segundo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2007) o prejuízo anual estava avaliado em cerca de R\$ 600 milhões, seguido pelas empresas de telecomunicações com cerca de R\$ 100 milhões e as empresas seguradoras e de eletroeletrônicos, com cerca de R\$ 50 milhões cada. Considerando então a incidência de cerca de 60 milhões de raios por ano, na média cada raio representou um prejuízo de R\$ 10 ao setor elétrico nacional.

As consequências são a interrupção no fornecimento de energia elétrica e nos meios de comunicação à sociedade em geral, serviços fundamentais e essenciais no mundo atual, principalmente nos grandes centros urbanos. Mas o pior de tudo não são os danos materiais e de serviços, mas sim aqueles relacionados à vida na Terra. Desde prejuízos nas colheitas agrícolas oriundas das queimadas provocadas por raios, dos vários animais em rebanhos fulminados por uma única descarga (Figura 1.2 e Figura 1.3) até os incêndios florestais em grande escala, culminando nas perdas de vidas humanas. Na Figura 1.1 está ilustrado o infográfico obtido no

¹ A nomenclatura adotada neste trabalho obedece às traduções dos termos em inglês definidas em Visacro (2005).

endereço eletrônico do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do INPE que ilustra as mortes por raios no Brasil no período de 2000 a 2014 (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS/ELAT, 2015). Sob a estimativa que a cada 50 mortes no mundo por raios 1 morte ocorre em terras brasileiras, o estudo indica que a maioria ocorreu no estado de São Paulo. Porém, em escala nacional, houve maior concentração na faixa etária de 15 a 24 anos, entre os homens, durante o verão e exercendo as atividades rurais. Estudos como em Cardoso et al. (2014) já apontam a incidência de descargas atmosféricas em seres humanos como a segunda maior causa de morte por fenômenos meteorológicos no planeta.

Figura 1.1 – Infográfico de mortes por raios no Brasil



Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/ELAT (2015).

Devido esses efeitos catastróficos as descargas atmosféricas são monitoradas no mundo inteiro, e uma das formas de fazê-lo é através dos Sistemas de Detecção

e Localização de Descargas Atmosféricas, também conhecidos pela sigla LLS do inglês “Lightning Location System”, que se utilizam da percepção dos campos eletromagnéticos remotos gerados por descargas atmosféricas. Atualmente existem numerosos LLS que usam diferentes tipos de sensores e técnicas de detecção, permitindo detectar a atividade elétrica entre nuvem e terra e/ou intra e internuvem. Tais sistemas possibilitam recuperar não só a distribuição geográfica e de frequência das incidências dos raios em uma escala global, mas detalhar informações a nível individual de “strokes” e “flashes”, assim como, por meio de reconstrução tridimensional do desenvolvimento do canal de descarga, conforme observado pelos atuais LMA (“Lightning Mapping Arrays”) (RISON et al., 1999; THOMAS et al., 2004; JACOBSON et al., 2006; KEOGH et al., 2006; SAID et al., 2010, 2013; VAN DER VELDE et al., 2013; DEFER et al., 2015).

Figura 1.2 – Raio mata 36 animais durante temporal



Fonte: G1 (2016).

Notas: Os animais morreram após um raio atingir parte do rebanho em uma fazenda na cidade de Currais Novos – RN, cidade assolada pela seca, causando um prejuízo de R\$6 mil segundo o criador.

Figura 1.3 – Raio mais mortal da história mata 323 renas na Noruega



Fonte: Mega Curioso (2016).

Notas: Segundo o “Guinness Book” foi o pior evento desta natureza contra animais já registrado até o momento.

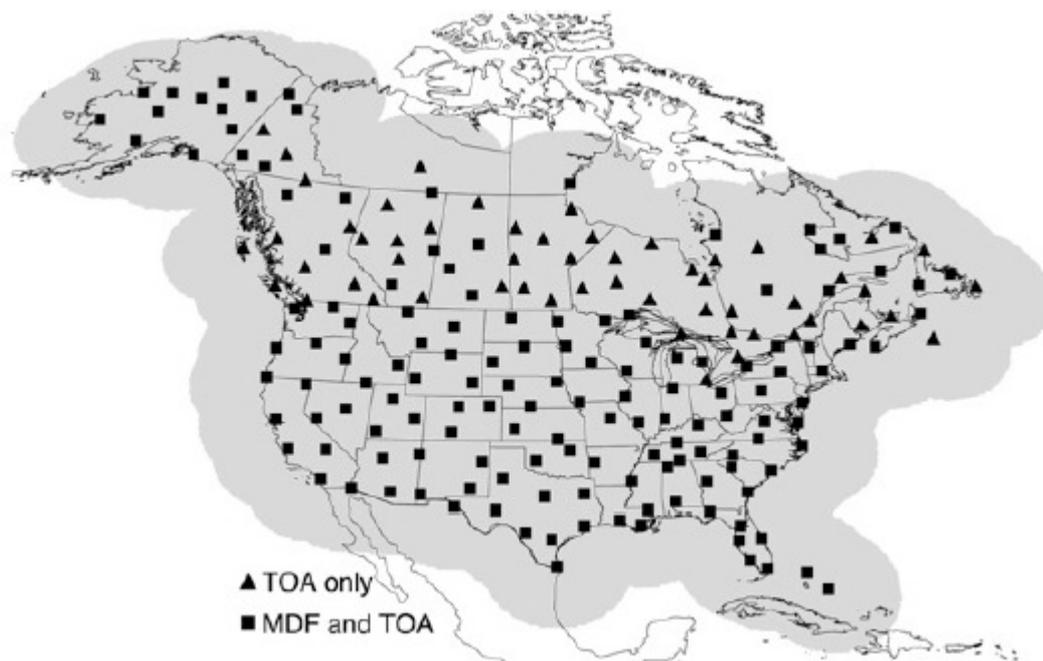
No entanto, cada tipo de LLS tem seus prós e contras, dependendo em que faixa de frequência seus sensores são capazes de trabalhar. Considerando que as redes que operam em frequências muito baixas, “very low frequency” (VLF), são capazes de detectar raios em grandes distâncias com uma quantidade relativamente baixa de sensores, estes sistemas são limitados em precisão de localização e eficiência de detecção quando comparados com o desempenho dos LMA. Por outro lado, esses últimos funcionam em frequências muito altas, “very high frequency” (VHF), restringindo assim o alcance da observação a escalas locais e não detectam muito bem as descargas em solo. LLS que operam em baixas frequências, “low frequency” (LF), combinam o melhor de ambos os mundos, ou seja, com distâncias de algumas centenas de quilômetros é possível cobrir países como continentes, mantendo ainda um nível satisfatório de desempenho em termos de precisão e eficiência de detecção (SCHULZ et al., 2005; BIAGI et al., 2007; ANTONESCU e BURCEA, 2010; NAG et al., 2011; ENNO, 2011; MALLICK et al., 2014; MÄKELÄ et al., 2014).

Atualmente, as duas principais redes de detecção operando com sensores na faixa de LF são a norte americana “North American Lightning Detection Network” (NALDN) e a europeia “European Cooperation for Lightning Detection” (EUCLID).

A primeira, criada em 1998, 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 neste mesmo ano. A NALDN foi desenvolvida para fornecer informações de 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”. A CLDN e NLDN estão completamente interconectadas, com todo o processamento de dados sendo 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 1.4), 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 1.4 – Rede NALDN em 04/2010



Fonte: Orville et al. (2011).

Notas: A área cinzenta é definida por qualquer localização de “flash” dentro de 600 km de um sensor.

Já a segunda iniciou suas atividades em 2001, quando vários países (Áustria, França, Alemanha, Itália, Noruega e Eslovênia) iniciaram uma cooperação através da conexão de suas redes nacionais de detecção com o objetivo de fornecer aos usuários finais informações de raios 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 1.5): 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), e um reserva localizado em Karlsruhe na Alemanha operado pela empresa Siemens (EUCLID, 2016).

Figura 1.5 – Rede EUCLID em 12/2014

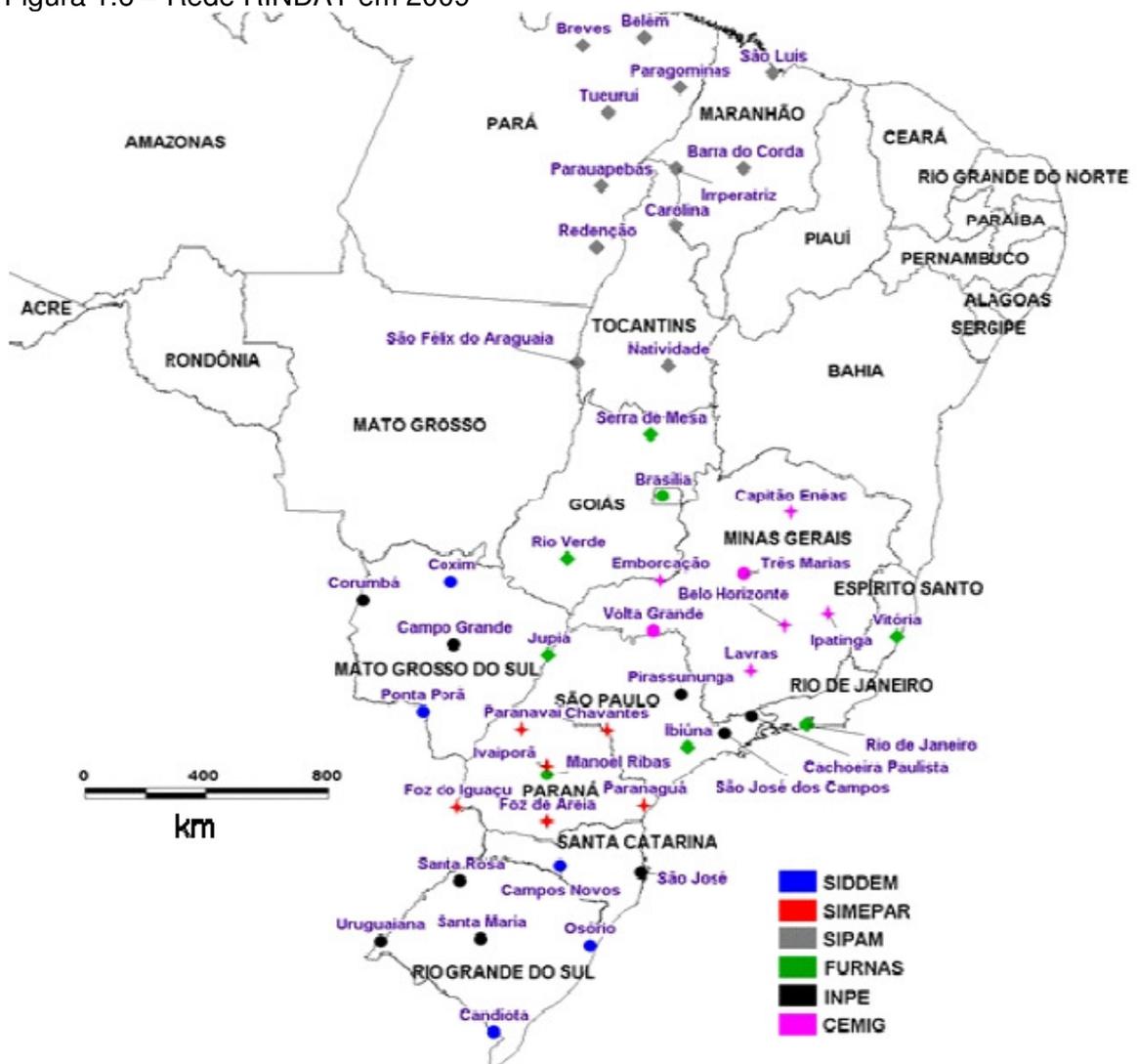


Fonte: Poelman et al. (2016).

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, sendo também o primeiro sistema de localização de raios da América do Sul (PINTO JUNIOR; GARCIA, 2004). Em 1996 foi a vez da Companhia Paranaense de Eletricidade (COPEL) ter o seu sistema, e 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 (PINTO JUNIOR; GARCIA, 2005). Neste mesmo ano, um convênio de cooperação técnico-científico firmado entre a CEMIG, 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, que passou 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 haveria a integração da mesma 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

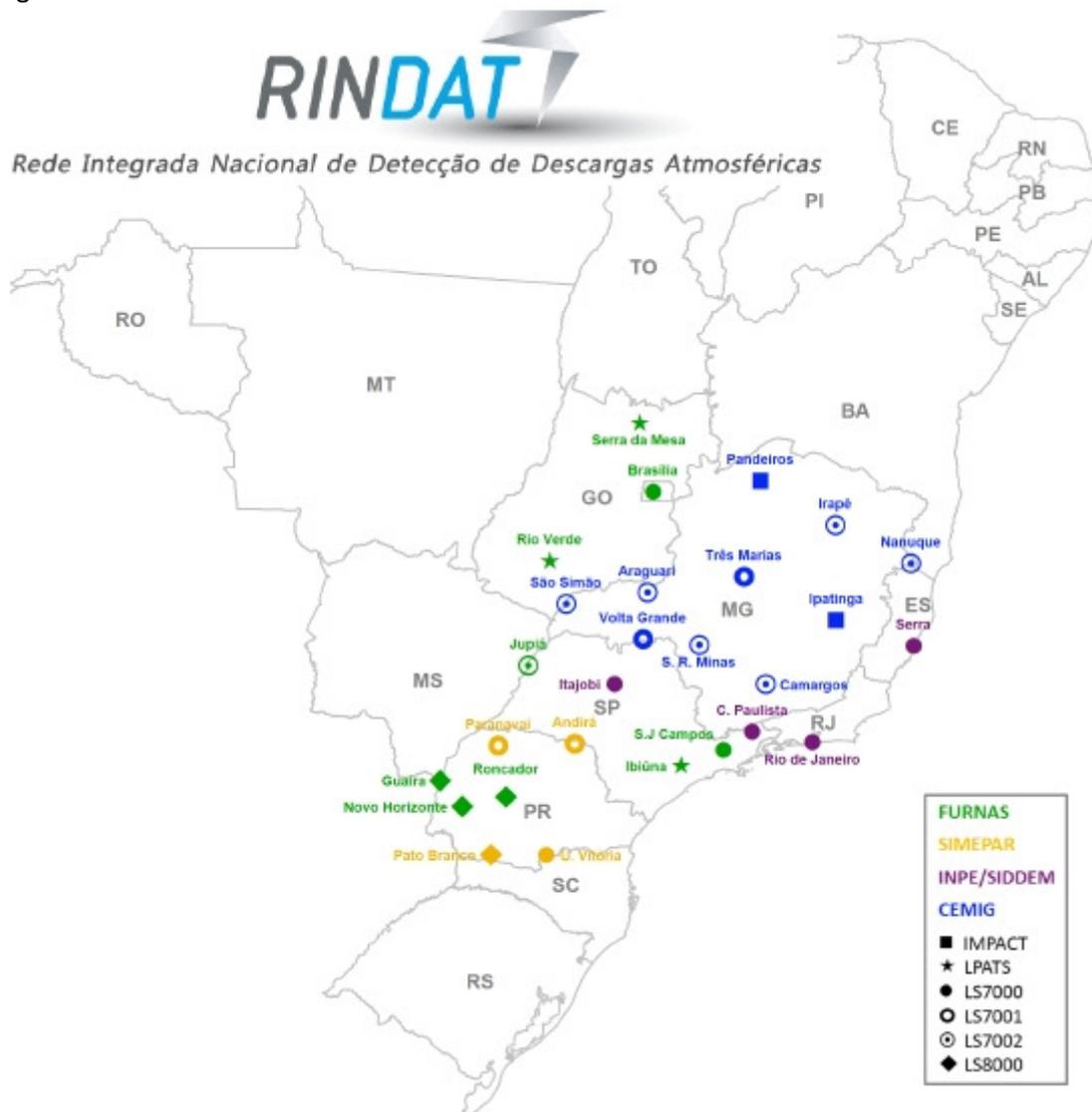
Amazônia (SIVAM), com foco na Amazônia Oriental e parte do nordeste (NACCARATO, 2005). Em 2009 a mesma contava com 47 sensores localizados em 12 estados brasileiros, conforme ilustra a Figura 1.6 (SALES, 2014). Porém, atualmente, a mesma possui 27 sensores distribuídos em 7 estados (Figura 1.7) (NACCARATO et al., 2016). Em agosto de 2011, foi inaugurada a BrasilDAT pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do INPE em parceria com a empresa EarthNetworks, cujo principal objetivo é o monitoramento em tempo real das descargas atmosféricas nuvem-solo e intranuvem (NACCARATO et al., 2012). Pode ser considerada a terceira maior rede nacional de detecção de descargas atmosféricas do mundo e a maior da região tropical do planeta (CCST/INPE, 2016) com os seus atuais 56 sensores espalhados pelas regiões sul, sudeste, centro-oeste e nordeste do Brasil (Figura 1.8) (NACCARATO et al., 2016).

Figura 1.6 – Rede RINDAT em 2009



Fonte: Adaptado de Pinto Jr. et al. (2009).

Figura 1.7 – Rede RINDAT em 2016

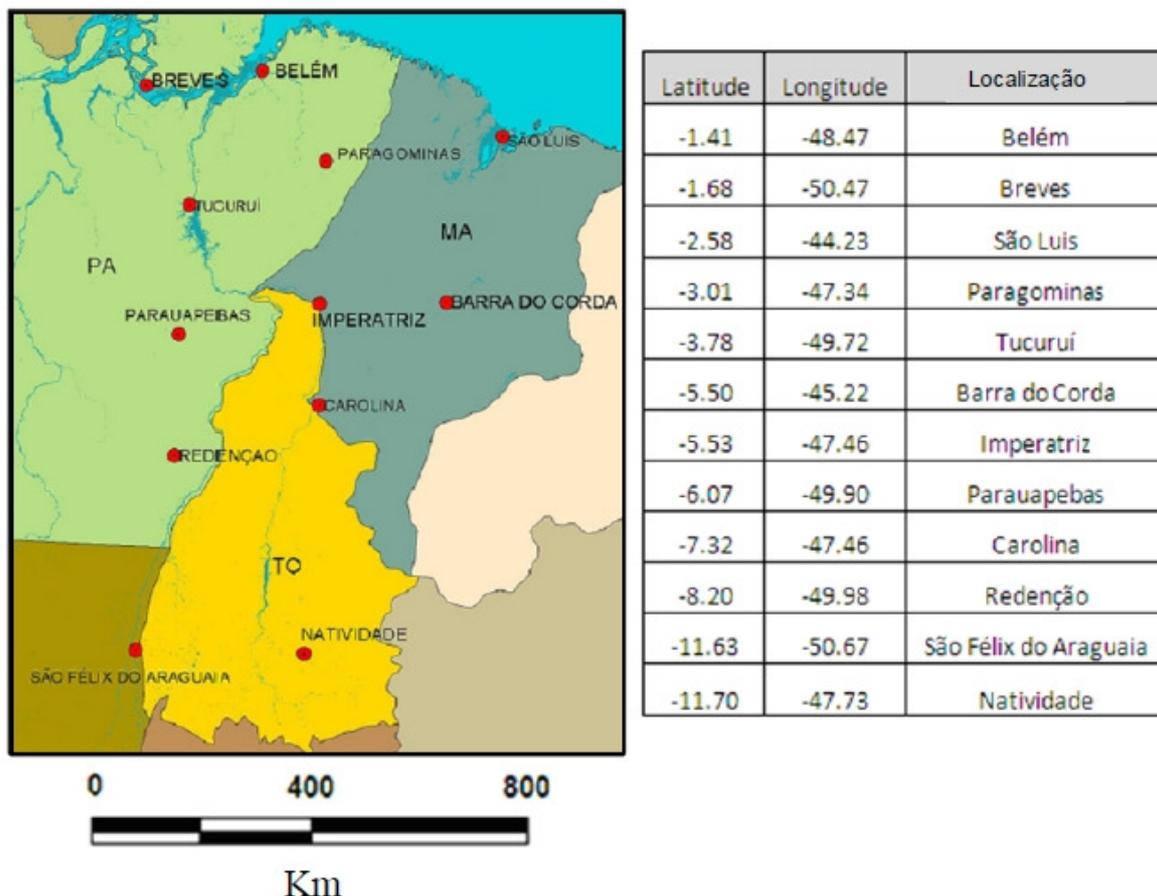


Fonte: Naccarato et al. (2016).

Na Amazônia, o primeiro sistema de detecção de raios foi um sensor do tipo LLP-TSS 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), que possibilitou o início dos primeiros estudos sobre a atividade elétrica na região através da análise dos campos elétricos e magnéticos produzidos pelas descargas no período de 1995 a 1998 (ROCHA et al., 1996), assim como, das distribuições espaciais e temporais das ocorrências, intensidades e polaridades do sinal de onda gerado (SOUZA et al., 1997, 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 ser de baixa resolução e limitadas para a região de Belém. Posteriormente, como já citado,

inaugurado em 2004, funcionando 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, que inviabilizou as comunicações pela interface analógica destes sensores. Somado ao fato da descontinuidade da série LPATS IV pelo fabricante, dificultando bastante a manutenção dos sensores inoperantes.

Figura 1.9 – Localização dos sensores da RDR-SIPAM



Fonte: Sá et al. (2011).

Durante o período de seu funcionamento, a primeira rede de detecção de raios cobrindo uma grande área na Amazônia, possibilitou o estudo aprofundado deste fenômeno na região de maior incidência do país que é líder mundial em ocorrências de descargas atmosféricas no mundo (PORTAL BRASIL, 2016). Entre eles destacam-se:

- 1) *Lightning characteristics associated to severe rainfall events, around Belem-PA-Brazil. Almeida A. C. et al., IX International Symposium on Lightning Protection, Foz do Iguaçu, Brazil, 26-30 Nov. 2007;*

- 2) *Lightning characteristics time distribution over four locations in eastern Amazonia. Rocha B. R. P. et al., IX International Symposium on Lightning Protection, Foz do Iguaçu, Brazil, 26-30 Nov. 2007;*
- 3) *Lightning variables seasonal changes over eastern Amazonia. Rocha B. R. P. et al., 29th International Conference on Lightning Protection, Uppsala, Sweden, 23-26 Jun. 2008;*
- 4) *A performance analysis of SIPAM's Amazonian lightning detection and location network. Souza W. A. P. et al., International Conference on Grounding and Earthing & 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects, Florianopolis, Brazil, Nov. 2008;*
- 5) *Statistical analysis of high intensity lightning strokes detected by SIPAM's LDN over the Amazon region. Almeida A. C. et al., International Conference on Grounding and Earthing & 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects, Florianopolis, Brazil, Nov. 2008;*
- 6) *Lightning strikes along an electric energy transmission line in Belem-PA-Brazil. Lessa L. A. S. et al., International Conference on Grounding and Earthing & 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects, Florianopolis, Brazil, Nov. 2008;*
- 7) *Lightning frequency of occurrence distribution over eastern Amazonia. Pereira C. S. et al., International Conference on Grounding and Earthing & 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects, Florianopolis, Brazil, Nov. 2008;*
- 8) *Lightning observations during severe rainfall events in eastern Amazonia. Souza J. R. S. et al., X International Symposium on Lightning Protection, Curitiba, Brazil, 9-13 Nov. 2009;*
- 9) *Local relationships between lightning frequency of occurrences and precipitation in the Amazon region. Ribeiro, W. M. N. et al., X International Symposium on Lightning Protection, Curitiba, Brazil, 9-13 Nov. 2009;*
- 10) *Distribution and characteristics of lightning produced by mesoscale convective systems within SIPAM's LDN coverage area. Teixeira, V. A. et al., X International Symposium on Lightning Protection, Curitiba, Brazil, 9-13 Nov. 2009;*
- 11) *Análise de Desempenho da Rede de Detecção de Raios do SIPAM. Souza, Willians Alan Pinheiro. Dissertação de Mestrado, Programa de*

- Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Dezembro, 2009;*
- 12) *Elementos de Sensores de Eletricidade Atmosférica. Pereira, Carlos Simões. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Maio, 2010;*
 - 13) *Incidência de Raios Próxima a uma Linha de Transmissão da CELPA. Ribeiro, W. M. N.; Souza, J. R. S.; Teixeira, V. A. III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Belém-Pará, 2010;*
 - 14) *Lightning and Precipitation Produced by Severe Weather Systems, over Belem, Brazil. Ribeiro, W. M. N. et al. XIV International Conference on Atmospheric Electricity, August 08-12, 2011, Rio de Janeiro, Brazil;*
 - 15) *The Climatic Context of Lightning Storms, Associated to Electric Systems Power Outages in Eastern Amazonia. Santos, A. P. P. et al. XIV International Conference on Atmospheric Electricity, August 08-12, 2011, Rio de Janeiro, Brazil;*
 - 16) *Lightning and Precipitation Distributions over Different Surface Types, in Eastern Amazonia. Ribeiro, W. M. N. et al. XIV International Conference on Atmospheric Electricity, August 08-12, 2011, Rio de Janeiro, Brazil;*
 - 17) *On close spaced lightning strikes observed in Amazonia. Almeida A. C. et al., XI International Symposium on Lightning Protection, Fortaleza, Brazil, 03-07 October, 2011;*
 - 18) *Lightning density of occurrences versus electric systems power outages, in Amazonia. Ribeiro, W. M. N.; Souza, J. R. S., XI International Symposium on Lightning Protection, Fortaleza, Brazil, 03-07 October, 2011;*
 - 19) *On Cloud-to-Ground Lightning Peak Currents for the Amazon Region Energy Planning. Sá, J. A. S. et al., International Lightning Protection Association Symposium, 24th-25th November, Valencia, Spain, 2011.*
 - 20) *Descargas Atmosféricas na Amazônia: Reconhecimento e análise dos parâmetros de interesse para o planejamento estratégico dos sistemas de proteção de linhas de transmissão. Sá, José Alberto Silva. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Dezembro, 2011;*

- 21) *Cloud-to-Ground Lightning Observations over the Eastern Amazon Region*. Almeida A. C.; Rocha, B. P.; Souza, J. R. S.; Sá, J. A. S.; Pissolato Filho, J. A. *Atmospheric Research*, v. 117, 1, p. 86-90, November 2012;
- 22) *Modelagem de Sistemas de Detecção de Descargas Atmosféricas na Amazônia*, Dentel, Laure Madeleine, *Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Dezembro, 2013*;
- 23) *Electric Systems Failures Produced by CG lightning in eastern Amazonia*. Santos, A. P. P. et al., *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 29, n. esp., p. 31-40, April 2014;
- 24) *Lightning and Precipitation Produced by Severe Weather Systems over Belém, Brazil*. Ribeiro, W. M. N. et al., *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 29, n. esp., p. 41-59, November 2014.

Apesar de não poder mais contar com a RDR-SIPAM a pesquisa sobre raios na Amazônia não parou no CENSIPAM devido ao ingresso na rede STARNET (“Sferics Timing and Ranging Network”), através das regionais de Belém e Manaus.

Esta 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. Esta rede experimental operou até 1998 e foi estudada em detalhe por Morales (2001).

Em 2003, 4 antenas rádio receptoras foram instaladas no continente Africano formando uma rede chamada ZEUS, do Observatório Nacional de Atenas (NOA). Esta rede possibilitou o monitoramento das tempestades sobre os continentes Europeu e Africano até 2005 (CHRONIS et al., 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

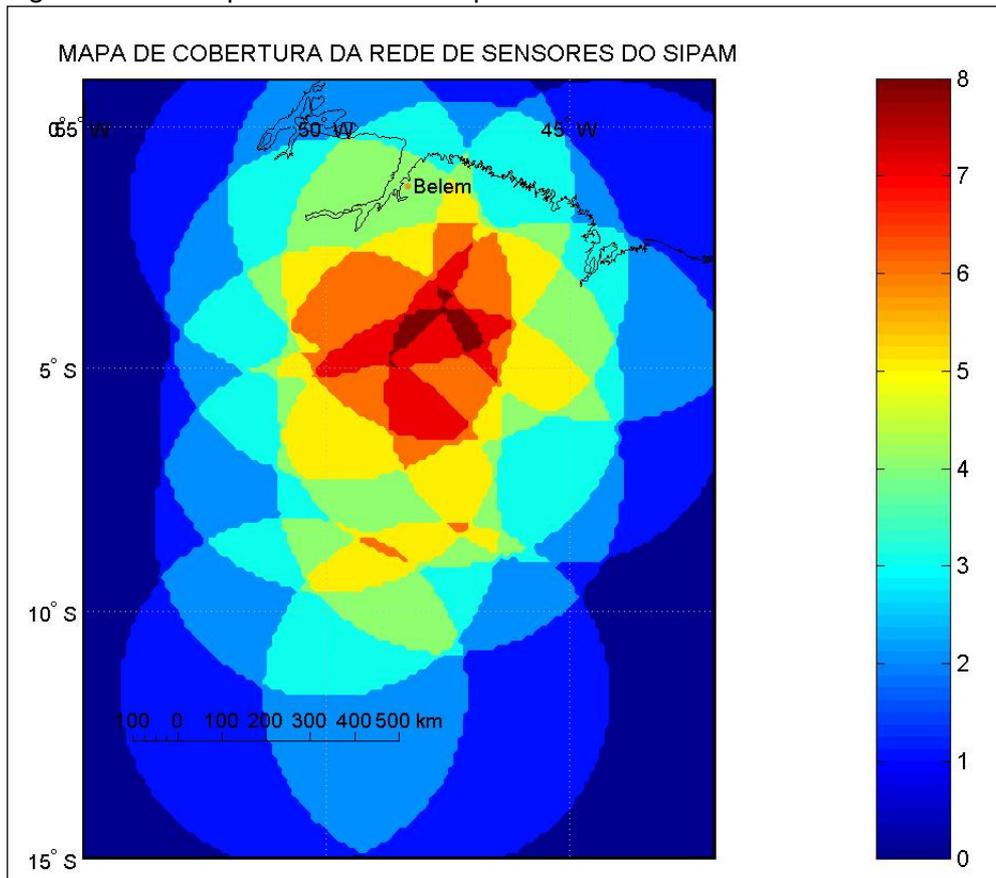
Manaus em 2009 (este último em parceria com o CENSIPAM); São Paulo em 2010 e Belém em 2012 (também em parceria com o CENSIPAM). O sensor de Curitiba foi deslocado para Brasília durante o ano 2009. De modo que a rede STARNET está operando desde o fim de 2012 com um total de 9 sensores desenvolvidos pela 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).

No apêndice A encontra-se uma lista de alguns trabalhos sobre raios na Amazônia produzidos com base nos dados da rede STARNET.

Da relação acima os trabalhos dos itens 4, 11 e 12 estão diretamente relacionados com o objetivo desta dissertação.

Nos dois primeiros, 4 e 11, que são do mesmo autor, Williams Alan Pinheiro Souza, é feito uma análise do desempenho da RDR-SIPAM pelo aspecto de distribuição espacial geográfica dos sensores sob a influência do ambiente e operacionalidade dos mesmos, nos períodos de dezembro/2006, janeiro a novembro/2007 e janeiro a abril/2009. Na Figura 1.10 a seguir, retirada deste trabalho, se ilustra o mapa de cobertura da rede em função do raio de 400 km de abrangência de cada sensor, considerando-se os 12 sensores operacionais. Observa-se que o código de cor mostra que há áreas cobertas simultaneamente por até oito sensores, todavia há áreas sob a influência de apenas um sensor, indicando falta de uniformidade na cobertura da rede.

Figura 1.10 – Mapa de cobertura espacial dos sensores da RDR-SIPAM

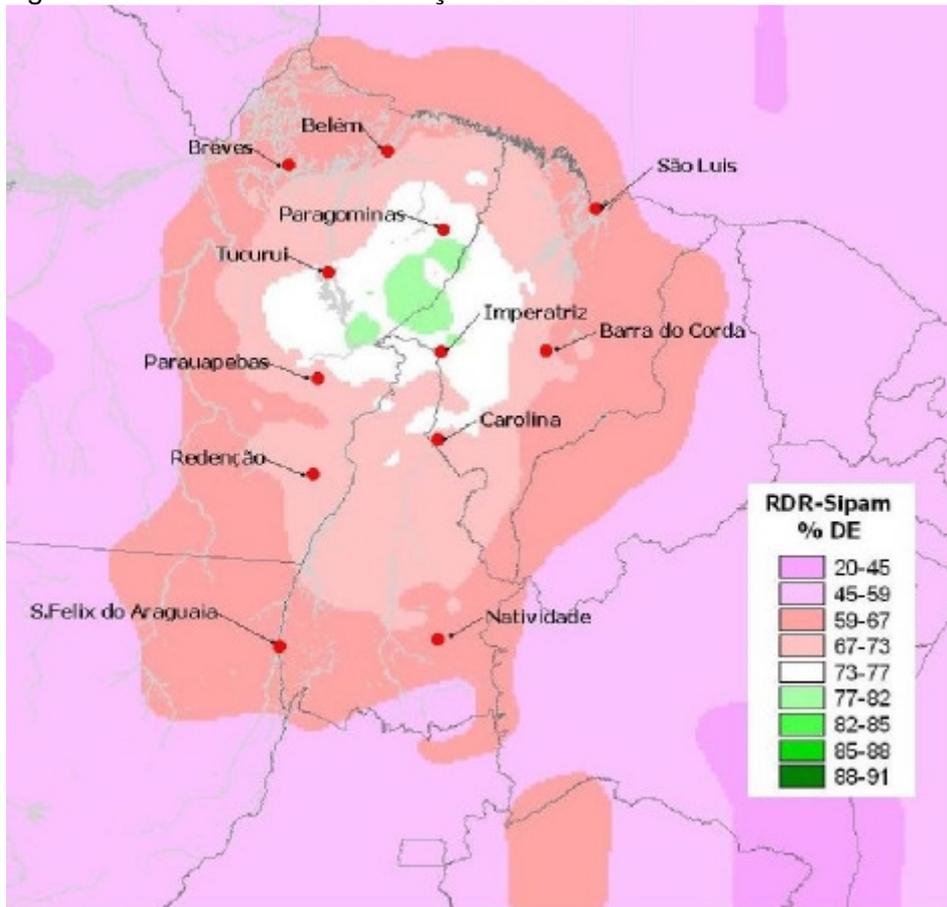


Fonte: Souza (2009).

Este aspecto foi confirmado através do parâmetro desempenho de detecção da rede pelo cruzamento desta área com um mapa das ocorrências de detecção de raios (mapa ceraúnic), obtido por uma ferramenta desenvolvida no programa MATLAB® que utilizou as informações oriundas do banco de dados da RDR-SIPAM nos períodos citados. Ao final do trabalho o autor recomenda a realocação de dois sensores pra melhorar justamente a uniformidade na cobertura espacial da rede.

No trabalho do item 12, de autoria do Carlos Simões Pereira, também foi feito um estudo do desempenho da rede, porém agora sob o aspecto da eficiência de detecção absoluta da rede, através da análise do histograma dos dados coletados no período de 27/02 a 13/03/2009. De posse dessas informações foi realizado um tratamento estatístico e aplicado técnica de regressão em função do número de sensores participantes na solução, obtendo um valor médio de 73% para este parâmetro, conforme ilustra a Figura 1.11.

Figura 1.11 – Eficiência de detecção da RDR-SIPAM



Fonte: Pereira (2010).

Neste trabalho o autor reconhece que este valor corresponde a um patamar médio de detecção, atribuindo-lhe em função ao baixo índice dos sensores usados e a grande ineficiência do algoritmo da central de processamento (cerca de 65% dos eventos com 3 ou mais registros não participaram nas soluções em função do algoritmo não ter determinado um valor inicial). Ao final sugere ajustes nos parâmetros fornecidos pelo fabricante sob pena de perdas de dados.

Em Naccarato (2001), verifica-se que o desempenho de um LLS está intrinsecamente relacionado com a topologia da rede, através da distribuição espacial dos sensores, e sua parametrização. Assim, pelo exposto nos dois trabalhos citados, observa-se que o desempenho da RDR-SIPAM foi fortemente impactado nesses dois aspectos. Não foram localizados na documentação estudada quais os critérios seguidos para a escolha do local de instalação dos sensores, nem quais foram as análises prévias das características locais dos 12 sítios de instalação escolhidos (“site survey”) para a implantação da rede. Assim como, nenhuma

pesquisa sobre o fenômeno (em escala regional) que embasasse a escolha dos parâmetros de configuração é citada na documentação técnica.

Aparentemente, o único requisito atendido foi o de monitorar os eventos de raios ao longo das linhas de transmissão de energia elétrica norte-sul das empresas Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A (Eletronorte) e Centrais Elétricas do Pará S.A (CELPA), concessionárias de geração e distribuição de energia, respectivamente (SOUZA, 2009). E, talvez, a partir daí fazer as devidas correções e calibrações dos sensores em manutenções de rotina para adaptação aos fatores locais.

A contribuição deste trabalho de dissertação de mestrado, portanto, vem ao encontro da necessidade de considerar as características locais para o planejamento e implantação de uma rede de localização e detecção de descargas atmosféricas no cenário amazônico. Para isto, propõe o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que possa simular a operação de captação do sinal eletromagnético do raio pelos sensores da rede, a fim de verificar a influência dos principais parâmetros de configuração, otimizando assim, o tempo e recursos disponíveis.

1.2 Motivação e justificativa

Pelo exposto, verifica-se que a instalação da RDR-SIPAM foi um marco para a região, especificamente para a Amazônia Oriental, mas com clara extensão às demais. A análise do seu banco de dados com informações dos eventos de descargas atmosféricas, alimentado a partir do monitoramento de raios pelo CENSIPAM/CR-BE, possibilitou a geração de conhecimento técnico-científico que trouxe inúmeros benefícios para a comunidade local, tais como:

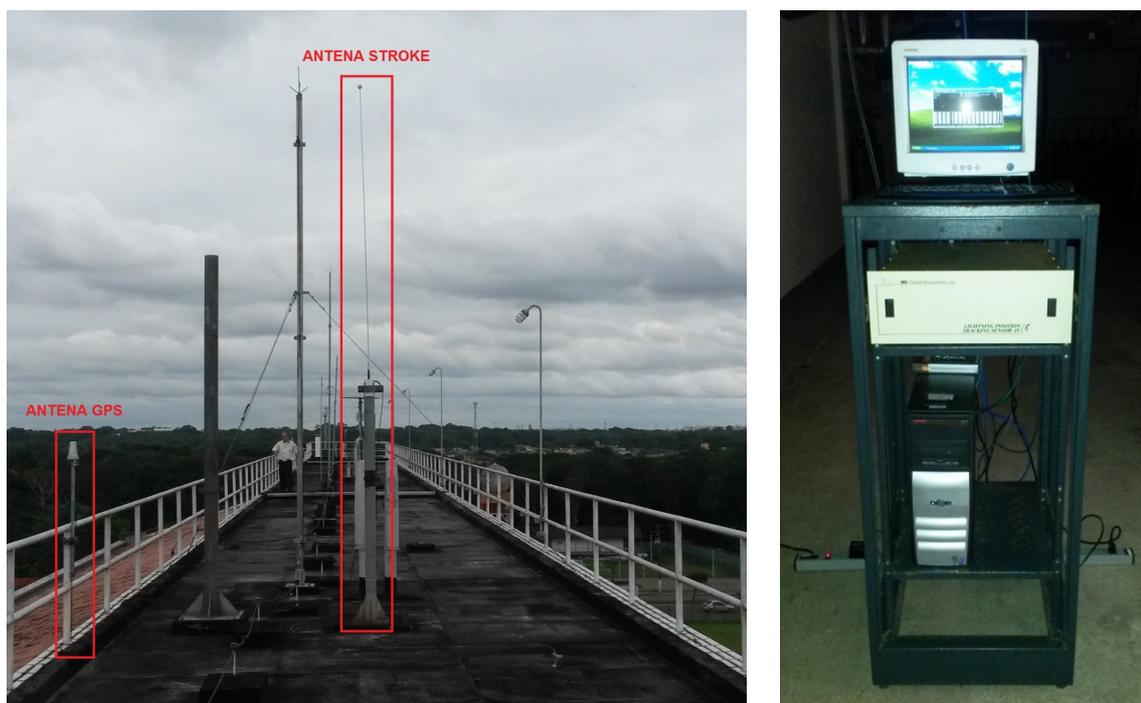
- a) No apoio ao planejamento estratégico dos sistemas de proteção de linhas de transmissão contra descargas atmosféricas na Amazônia, a partir das análises dos perfis dos eventos e estatísticas das ocorrências;
- b) Em retificar os parâmetros elétricos normativos para as atividades de projeto, instalação e manutenção, vistoria, laudo, perícia e parecer referentes aos Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) na Amazônia, a partir das análises técnicas das magnitudes dos eventos observados nas ocorrências;

- c) Na detecção de ocorrência de sistemas meteorológicos convectivos, visando apoiar as atividades de monitoramento de tempestades para emissão de alertas;
- d) Contribuiu para formação e capacitação de especialistas sobre descargas atmosféricas na Região Amazônica, a partir da disponibilização das informações dos seus dados de localização dos raios, polaridade e intensidades de corrente de pico, tipo de raio, densidade de raios e índice ceraúnico, dentre outras.

Portanto, a interrupção no funcionamento desta rede encerrou um ciclo virtuoso marcado por uma produção intensa de produtos e conhecimentos inovadores que colocou a região amazônica na linha de frente na pesquisa sobre descargas atmosféricas no mundo. Felizmente, no mesmo ano que marcou este fim da operação, todos os sensores foram recolhidos ao CENSIPAM/CR-BE e, em 2011, um projeto de pesquisa (Projeto nº 554609/2010-0) coordenado pela Prof^a. Dr^a. Brígida Ramati Pereira da Rocha financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), proporcionou o início da manutenção corretiva dos sensores, sendo possível restabelecer a capacidade de operação de 9 deles. Oportunamente, também foram realizados testes de conectividade através de adaptadores analógicos/digitais (adquiridos neste projeto) instalados em alguns sensores com sucesso.

Apesar de constar no Planejamento Estratégico do CENSIPAM o restabelecimento da rede RDR-SIPAM, através da ação nº 38 (Infraestrutura de TIC/Manter o Parque Tecnológico Externo) do seu Plano Diretor de Tecnologia da Informação e Comunicação (PDTIC) (DUARTE; COSTA; TIVERON, 2014), desde a manutenção até o momento, por uma opção de política de gestão do órgão, somado aos constantes contingenciamentos financeiros pelo Governo Federal nos últimos anos, as metas atingidas foram somente a instalação de um conjunto formado por antenas e sensor no prédio sede do CR-BE (Figura 1.12). O aparato tem servido para testar os demais sensores, assim como, servir de base de estudo para os atuais pesquisadores envolvidos no restabelecimento da rede.

Figura 1.12 – Antenas e sensor LPATS IV no CR-BE



Fonte: do autor.

Esse trabalho tem, portanto, como motivação principal, ajudar no restabelecimento da RDR-SIPAM relativo ao estágio de planejamento, com foco no desenvolvimento de uma ferramenta computacional que sirva de instrumento de apoio à decisão.

1.3 Objetivo

Este estudo tem por objetivo desenvolver uma ferramenta computacional para avaliar a influência em uma LLS (através do seu desempenho) do comportamento do campo elétrico vertical gerado por descargas atmosféricas nuvem-solo negativas, em um meio perfeitamente condutor, considerando variações nos parâmetros: velocidade de propagação da onda eletromagnética, velocidade da frente de onda da corrente no canal de retorno e amplitude da corrente na base do canal de retorno, utilizando o modelo de engenharia do tipo linha de transmissão para representação da distribuição espaço-temporal da corrente no canal da descarga.

1.4 Organização do texto

A realização do objetivo citado está expressa no presente texto, organizado em cinco capítulos.

Após este primeiro capítulo introdutório, no Capítulo 2 é feita uma breve descrição do fenômeno das descargas atmosféricas e dos seus principais parâmetros físicos utilizados em sistemas LLS, com ênfase na radiação das ondas eletromagnéticas. Na sequência são apresentados os modelos clássicos utilizados para representar a distribuição espaço-temporal da corrente ao longo do canal da descarga de retorno, finalizando com um resumo dos conceitos básicos de uma rede de detecção.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia adotada para o desenvolvimento de uma ferramenta computacional a fim de verificar a influência das características locais na detecção por LLS, operando na faixa LF, de ondas eletromagnéticas originadas por descargas atmosféricas nuvem-solo negativas.

No Capítulo 4 são demonstrados os resultados obtidos nas simulações dos eventos definidos no ambiente de simulação. Primeiramente, considerando a parametrização estabelecida no experimento da referência, para posteriormente variar os parâmetros velocidade de propagação da onda eletromagnética gerada pelo raio, amplitude do pico da corrente na base do canal de descarga e velocidade da frente de onda da corrente no canal de descarga, conforme estabelecido na metodologia.

No Capítulo 5 são discutidos os principais resultados, apresentando conclusões obtidas no estudo, além de algumas propostas para trabalhos que poderão ser desenvolvidos no futuro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo contém uma breve descrição do fenômeno das descargas atmosféricas e dos seus principais parâmetros físicos utilizados em sistemas LLS, com ênfase na radiação das ondas eletromagnéticas. Na sequência são apresentados os modelos clássicos utilizados para representar a distribuição espaço-temporal da corrente ao longo do canal da descarga de retorno, finalizando com um resumo dos conceitos básicos de uma rede de detecção.

2.1 Fenômeno da descarga atmosférica

De forma simplificada, o raio pode ser descrito como uma descarga elétrica que ocorre na atmosfera, e na maioria das vezes relacionadas às tempestades com chuva. Segundo Visacro (2005, p. 18) “Trata-se de um fenômeno complexo, que se expressa através do fluxo de uma corrente impulsiva de alta intensidade e curta duração, cujo percurso de alguns quilômetros parte da nuvem e, em alguns casos, atinge a superfície da Terra.” (Figura 2.1). Importante frisar que também podem ocorrer em tempestades de neve e de areia, durante erupções vulcânicas (Figura 2.2) ou de forma artificial, como em explosões nucleares ou em eventos induzidos com uso de aviões e foguetes.

Figura 2.1 – Descarga atmosférica de nuvem de tempestade



Fonte: Grupo de Eletricidade Atmosférica (2016).
Notas: Foto de Rui Leal Bark de Curitiba-PR.

Figura 2.2 – Descarga atmosférica de erupção vulcânica



Fonte: Pereira (2010).

Notas: Erupção do vulcão Eyjafjallajokull, fotografada por Marco Fulle.

2.1.1 Conceitos e características

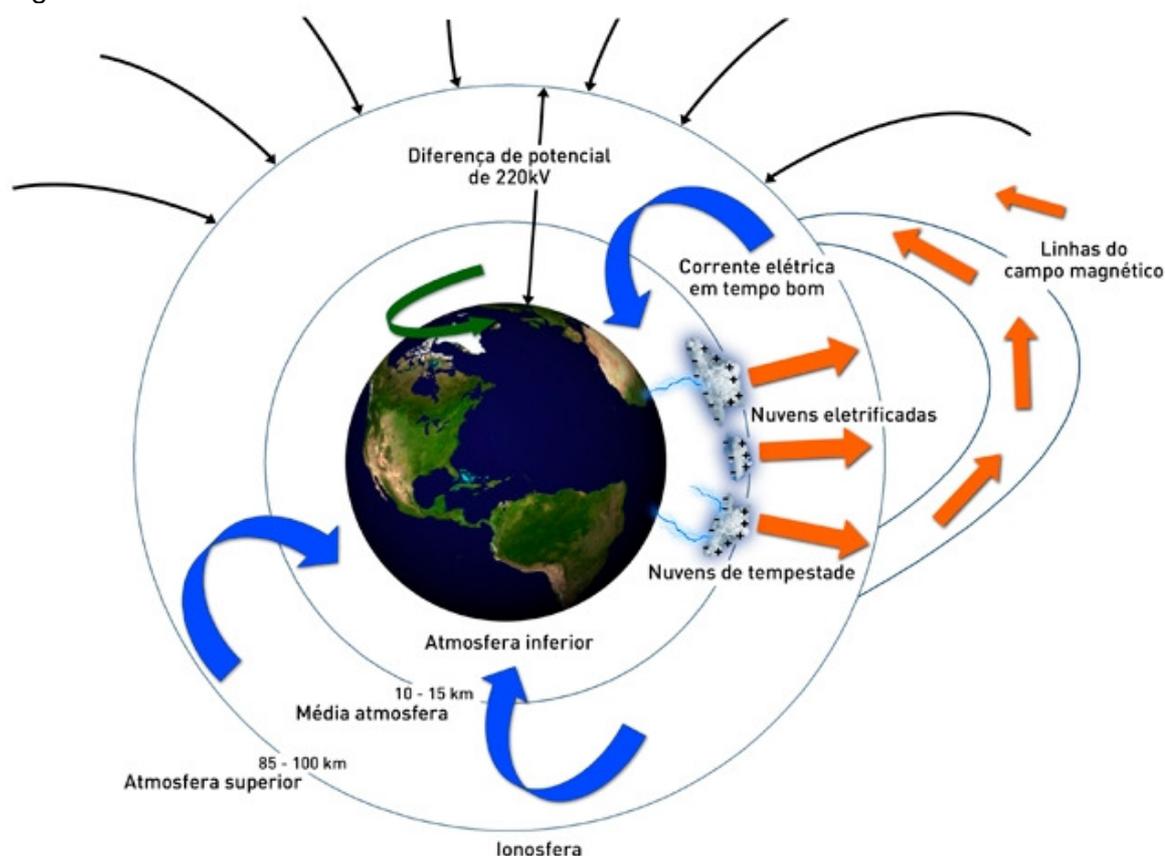
a) Eletricidade atmosférica

Segundo a teoria do Circuito Elétrico Atmosférico Global (CEAG), proposta por C. T. R. Wilson em 1920, é apresentado um modelo que tenta explicar a diferença de potencial (220 kV) entre a superfície da Terra e a Ionosfera, existente na região de tempo bom (WILSON, 1920). Consiste de um sistema análogo a um capacitor esférico constituído de duas superfícies equipotenciais: uma com carga negativa (superfície terrestre), outra com carga positiva (ionosfera), separadas por um meio levemente condutor (atmosfera) (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS/ELAT, 2016) (Figura 2.3).

Portanto, nesta situação há atuação de um campo elétrico vertical orientado de cima para baixo, induzindo a formação de uma densidade de corrente neste mesmo sentido devido à presença de íons positivos e negativos na atmosfera. Caso multiplicada pela área total da superfície da Terra, estima-se uma corrente de fuga deste capacitor de aproximadamente 1 kA devido à condutividade da atmosfera. Assim, como qualquer dispositivo deste tipo, a carga elétrica armazenada nele se esgotaria após um intervalo de tempo, quando toda a carga positiva da fronteira atmosfera/ionosfera fluiria para a superfície da Terra cancelando sua carga negativa de modo que não existiria mais um campo elétrico. Segundo Iribarne e Cho (1980) a

diferença de potencial desapareceria em aproximadamente 7 minutos. Surge então a base da teoria deste modelo que sugere a existência de alguma fonte de carga em sentido contrário para manter o nível de potencial nas duas superfícies. Assim, as atividades de tempestades que ocorrem fora do regime de tempo bom foram supostas atuarem como uma das principais fontes deste gerador de corrente de reposição, transportando cargas positivas da Terra para a ionosfera na mesma proporção de 1 kA.

Figura 2.3 - CEAG



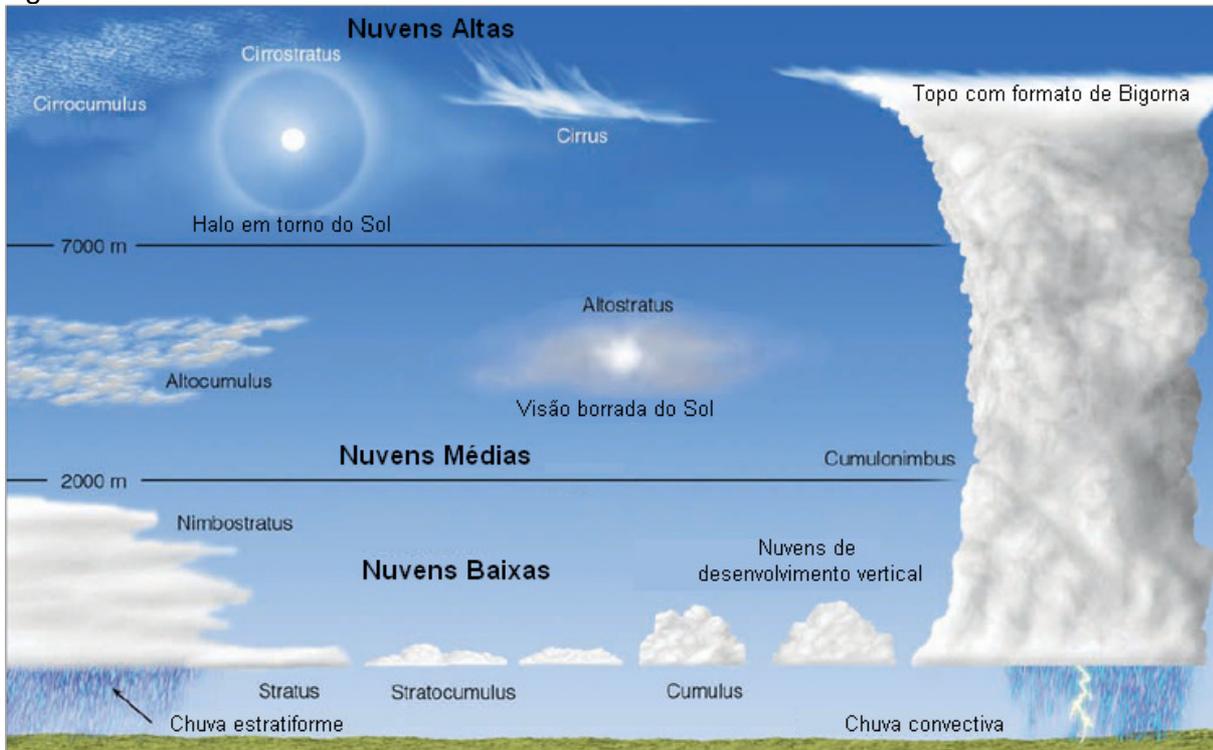
Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/ELAT (2016).

b) Nuvens de tempestades

A formação de uma nuvem de tempestade, denominada “cumulonimbus” (Figura 2.4), se inicia com a elevação de uma parcela de ar úmido por aquecimento ou por um agente forçante (montanhas, frentes frias, etc.). Durante esta elevação, devido o decréscimo de pressão e temperatura, esta parcela de ar no estado gasoso começa a condensar com a ajuda de outras partículas presentes (núcleos de condensação) formando gotículas de água, cristais de gelo e granizo. São essas partículas que

darão origem à sua estrutura elétrica devido ao acúmulo de partículas carregadas, produzidas por processos microfísicos e microfísicos. Seu ciclo de vida é estimado em aproximadamente 1 h e possui três fases (WALLACE; HOBBS, 1977).

Figura 2.4 – Nuvem cumulonimbus



Fonte: Minha Paixão é Avião e Aviação (2015).

Na fase inicial, que pode durar dezenas de minutos, os movimentos verticais são predominantemente ascendentes arrastando gelo e gotas d'água para cima, devido a temperatura no interior da nuvem ser maior que no exterior para uma mesma altura.

Na fase madura, cuja duração é de aproximadamente 30 minutos, ocorrem tantos movimentos ascendentes como descendentes, dependendo da região da nuvem cuja temperatura no interior seja maior ou menor que no exterior, respectivamente. O movimento descendente que no início é apenas na base, passa a se intensificar horizontal e verticalmente, e as gotas de água e gelo arrastadas para cima na primeira fase tornam-se mais numerosas e maiores de tal forma que parte delas não se movimenta mais, iniciando, assim, a chuva na base da nuvem.

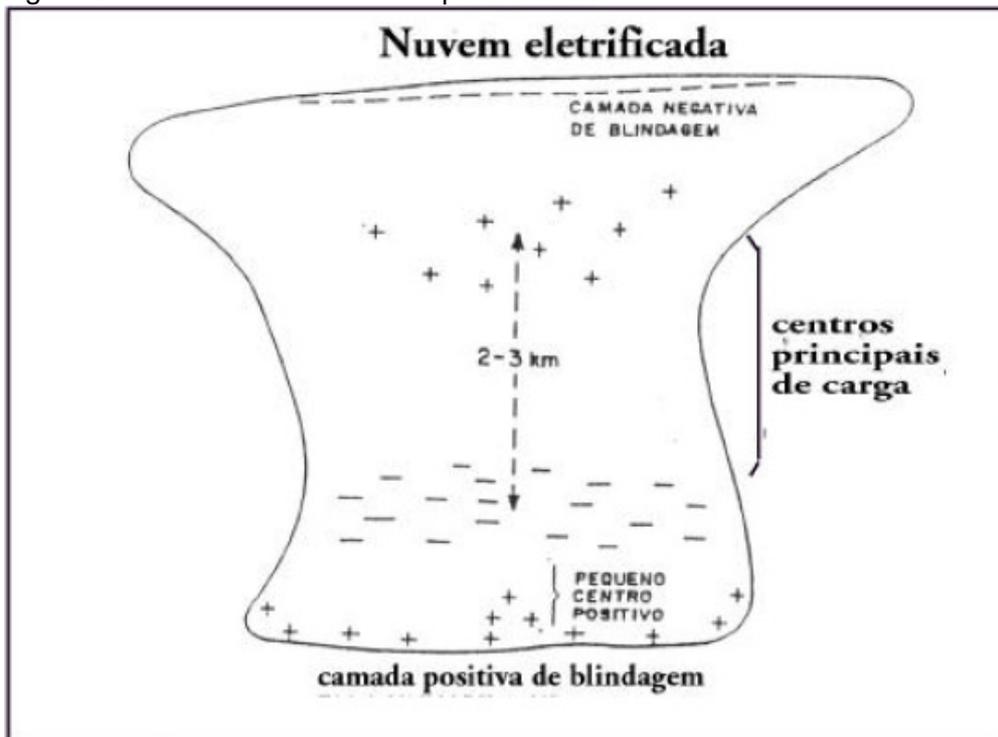
A última fase, conhecida como fase de dissipação, que também tem uma duração média de 30 minutos, é caracterizada por movimentos verticais predominantemente descendentes. A temperatura no interior da nuvem é menor que da exterior e ela irá se dissipar até que as temperaturas sejam iguais.

Os processos microfísicos são aqueles que detalham como surge a polarização e separação das cargas elétricas dentro da nuvem. A teoria mais aceita é a denominada colisional, que afirma ocorrer transferências de cargas através de colisões entre partículas de tamanhos diferentes (IRIBARNE; CHO, 1980). Caso o campo elétrico gravitacional tenha uma papel predominante nesta separação é dito colisional indutivo. Caso seja a temperatura o fato predominante denomina-se colisional termoelétrico (WILLIAMS, 1988). Ambas afirmam que a partir de colisões entre o granizo (partícula grande) e cristais de gelo (partículas menores), ocorrem as polarizações das mesmas com o surgimento de partículas eletricamente carregadas que então são separadas pelos processos microfísicos. Esta separação reforça o campo elétrico dentro da nuvem eletrificada, provocando novos efeitos indutivos.

Já para os processos microfísicos os mais aceitos são o processo gravitacional e o processo convectivo. No primeiro tem-se a ação do campo gravitacional como fator principal para separação das partículas carregadas, enquanto que no segundo esta separação ocorreria devido às interações com correntes de ar oriundas da superfície da terra, assim como, com raios cósmicos incidentes na atmosfera (WILLIAMS, 1988).

Como resultado desses processos surge internamente às nuvens de tempestade uma estrutura elétrica de aspecto dipolar, tripolar ou até mesmo multipolar. Porém, a teoria que tem sido mais aceita é a estrutura dipolar, conforme ilustra a Figura 2.5, composta por dois centros principais de cargas, um positivo na parte superior da nuvem e outro negativo na parte inferior. Além destes principais ela possui camadas de cargas nas bordas superior e inferior, chamadas de camadas de blindagem, que surgem devido à atração sobre os íons existentes na atmosfera exercida pelos centros principais de cargas. Há ainda um pequeno centro de cargas positivas localizadas na base da nuvem, entre o centro principal de cargas negativas e a camada de blindagem existente na base (IRIBARNE; CHO, 1980).

Figura 2.5 – Nuvem eletrificada dipolar



Fonte: Iribarne e Cho (1980).

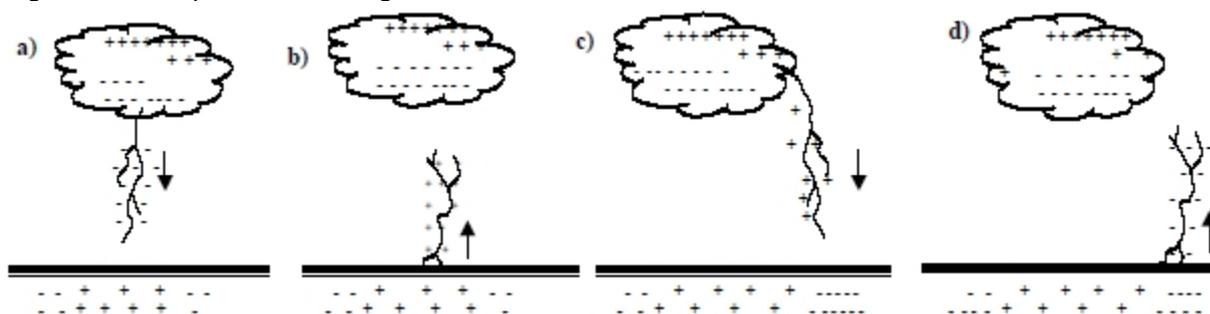
c) Tipos de descargas atmosféricas

Quando o campo elétrico produzido por estes centros de cargas dentro da nuvem excede a capacidade dielétrica do ar (cerca de 300 kV/m nestas condições) surgem descargas elétricas com duração média de um quarto de segundo, percorrendo uma trajetória de 5 a 10 km na atmosfera, capazes de produzir intensas correntes elétricas e campos eletromagnéticos. Geralmente são acompanhadas por trovões, que são ondas sonoras produzidas pela expansão do ar aquecido no canal percorrido pela corrente da descarga (PINTO JUNIOR; PINTO, 2000).

Classificam-se os raios inicialmente pelos pontos de início e fim da descarga, podendo ocorrer dentro das nuvens, entre nuvem e solo, entre nuvem e estratosfera e mesmo entre duas nuvens. Predomina-se a ocorrência dentro das nuvens, com apenas cerca de 20% do tipo entre nuvem e solo, porém, sendo este último os mais estudados por implicarem diretamente em danos materiais e à vida terrestre. Devido esta importância, são por isso subclassificados segundo a polaridade da carga que efetivamente é transferida para o solo (negativa ou positiva) e a direção da evolução do canal de descarga (descendente ou ascendente), como indicado na Figura 2.6. Totalizando quatro subtipos, com a ocorrência das negativas representando cerca

de 90% e positivas 10% das descargas entre nuvem e solo (PINTO JUNIOR; PINTO, 2000).

Figura 2.6 – Tipos de descargas nuvem-solo



Fonte: Mesquita (2006).

Notas: Os quatro tipos de descargas nuvem-solo: (a) negativa descendente; (b) negativa ascendente; (c) positiva descendente e (d) positiva ascendente. As setas indicam a direção de propagação do canal de descarga.

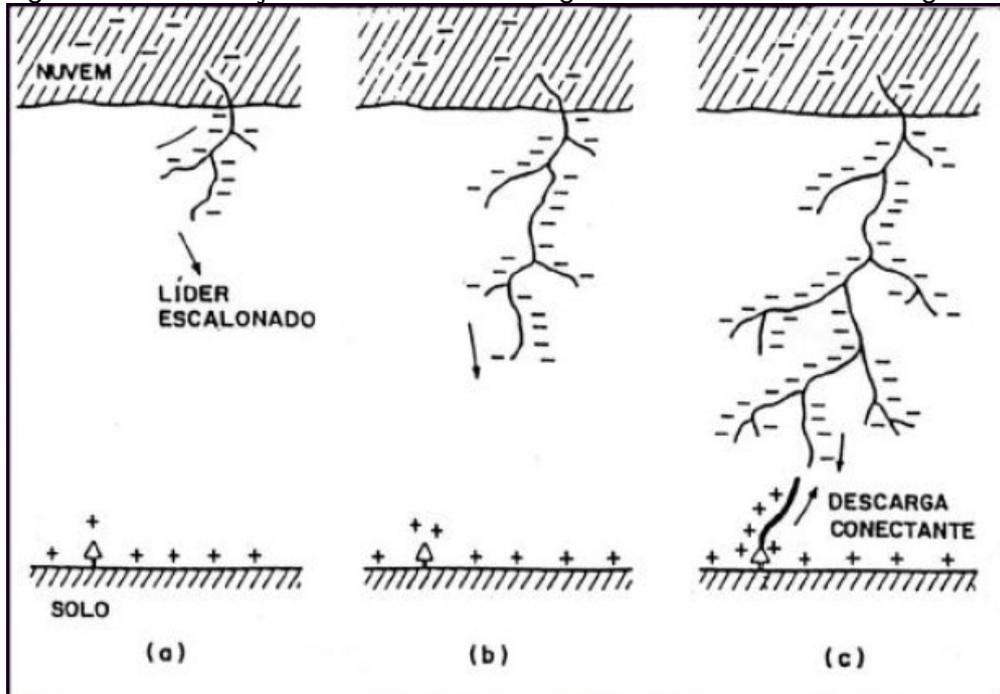
2.1.2 Descarga nuvem-solo negativa descendente

Esse tipo surge após o processo da quebra da rigidez dielétrica já citada (conhecido como “breakdown”), quando uma descarga elétrica (ou múltiplas descargas elétricas sucessivas) parte dos centros de cargas negativos da nuvem e se dirige em direção ao solo. Esta descarga é chamada de líder escalonado (“stepped leader”). O líder escalonado propaga-se em passos que tem comprimento médio da ordem de 30 a 100 m cada, percorrem uma trajetória ramificada à procura de caminhos mais condutores e velocidade média de 10^5 m/s. Apesar de ocorrerem ramificações no líder escalonado, não significa que todos irão alcançar o solo. A luminosidade apenas é observada nos últimos microssegundos, com passos durando em média $1 \mu\text{s}$ e pausas de $50 \mu\text{s}$ entre eles. Ao total a duração do líder escalonado fica em torno de 20 ms (PINTO JUNIOR; PINTO, 2000).

Segundo Volland (1984) a intensidade de corrente é de 100 A, com pulsos de 1 kA em cada passo (PINTO JUNIOR; PINTO, 2000). Seu canal de ionização teria um núcleo de alguns centímetros com diâmetro total em torno de 1 a 10 m, propagando-se até um ponto com distância inferior a 200 m do solo. Quando ele se aproxima do solo, o campo elétrico torna-se mais intenso provocando a quebra da rigidez dielétrica do ar e o surgimento de uma ou mais descargas positivas ascendentes em direção ao líder escalonado, denominadas descargas conectantes. E quando ocorre a união do líder escalonado com uma descarga conectante (“attachment”), o primeiro passa a ter uma intensa luminosidade e uma forte descarga ocorre,

chamada de descarga de retorno (“return stroke”), com duração de cerca de 100 μ s (PINTO JUNIOR; PINTO, 2000). Estes passos estão representados na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Formação do canal de descarga dos raios nuvem-solo negativos



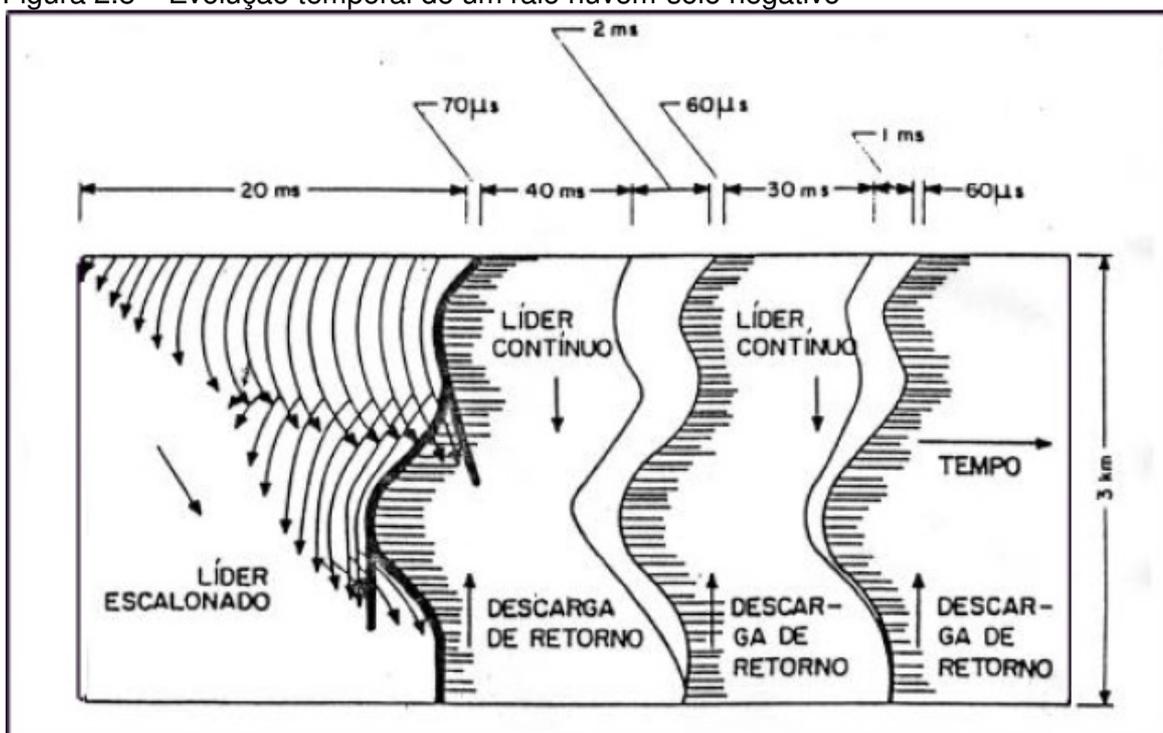
Fonte: adaptado de Iribarne e Cho (1980).

Notas: (a) início do líder escalonado; (b) evolução do líder escalonado e (c) encontro do líder escalonado com a descarga conectante.

A corrente elétrica originada na descarga de retorno é bem elevada, cujo valor médio do pico é de 30 kA, podendo mesmo atingir picos maiores do que 100 kA (UMAN; KRIDER, 1989), em alguns casos, propagando-se a uma velocidade na ordem de 10^7 m/s a 10^8 m/s (IRIBARNE; CHO, 1980).

Se ocorrer apenas uma descarga de retorno a mesma é denominada simples, porém, após algumas dezenas de milissegundos poderá ocorrer o recarregamento de parte deste mesmo canal de descarga, alimentado por outro centro de cargas da nuvem, chamado agora de líder contínuo (“dart leader”), que diferente do escalonado não tem ramificações, possui menor intensidade de corrente e maior velocidade em relação a este (cerca de 10^6 m/s). Ao se aproximar do solo une-se a uma descarga conectante surgindo uma descarga de retorno subsequente (“subsequent return stroke”). Esta pode ocorrer mais de uma vez, chegando até 20 descargas de retorno em apenas um evento (“flash”) (VOLLAND, 1984), denominadas assim de descargas múltiplas, que são sucessivas e separadas por intervalos de tempo de 1 a 100 ms (PINTO JUNIOR; PINTO, 2000), conforme ilustra a Figura 2.8.

Figura 2.8 – Evolução temporal de um raio nuvem-solo negativo



Fonte: adaptado de Iribarne e Cho (1980).

As descargas subsequentes duram em média $50 \mu\text{s}$, apresentam velocidades maiores em comparação com a primeira descarga de retorno e intensidade de correntes menores com valores de pico em torno de 10 a 20 kA. Além disso, o intervalo de tempo entre a descarga de retorno e o líder contínuo é cerca de 50ms, com tempo de duração deste último estimado em 1ms. Estas características estão relacionadas ao fato de já haver um canal ionizado pela primeira descarga, e o centro de carga originário da descarga já estar parcialmente descarregado (PINTO JUNIOR; PINTO, 2000).

De 14 a 20% das descargas atmosféricas (“flashes”) são constituídas por apenas uma descarga de retorno (“stroke”), nos demais restantes uma boa parte das descargas negativas descendentes possuem de duas a quatro descargas, sendo que destas estima-se que metade utilizada integralmente o mesmo canal onde houve a primeira corrente de retorno, incidindo no mesmo ponto. Enquanto outra metade utiliza apenas parte deste canal, tendo a sua parte inferior traçando um caminho diferente, resultando na incidência em pontos distintos (RAKOV; HUFFINES, 2003).

A Tabela 2.1 mostra alguns parâmetros físicos de corrente de descargas nuvem-solo negativos:

Tabela 2.1 – Parâmetros físicos das correntes de descargas nuvem-solo negativas

Parâmetros	Primeira Descarga de Retorno	Descarga de Retorno Subsequente
Corrente de pico (kA)	30	10 – 15
Tempo de subida da corrente entre 10%-90% (μ s)	5	0,3 – 0,6
Máxima taxa de subida da corrente (kA/ μ s)	$\geq 10 - 20$	100

Fonte: Rakov e Uman (2003).

Os aspectos dos raios podem sofrer alterações em função da localização e condições meteorológicas (PINTO JR. et al., 1992), circunstâncias sazonais (ORVILLE et al., 1987) e latitude (FISHER; PLUMER, 1977; PINTO JR. et al., 1997).

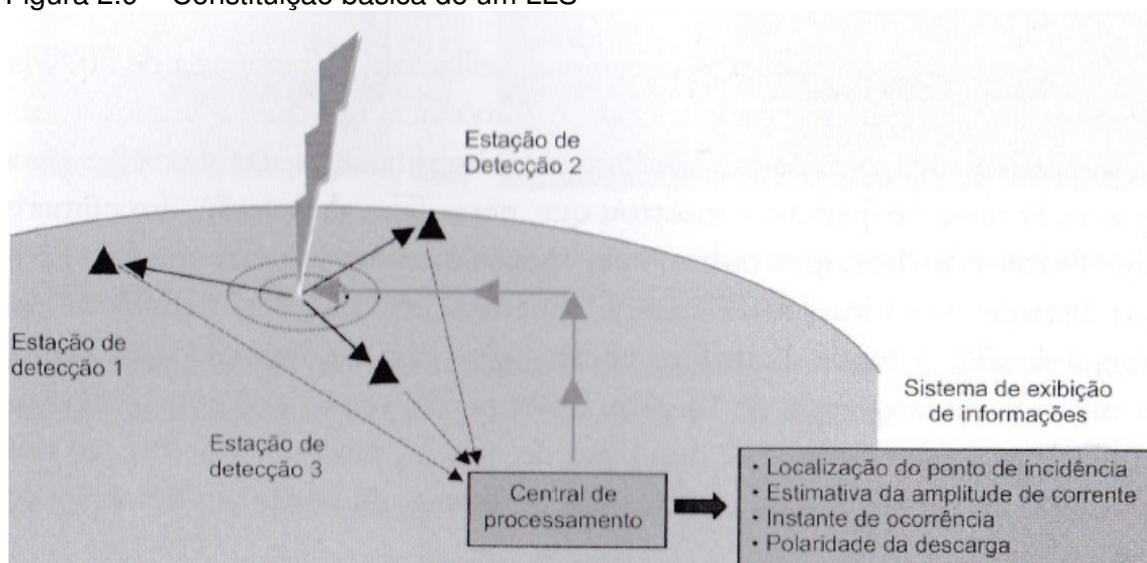
2.2 Sistemas de detecção e localização de descargas atmosféricas

A caracterização do fenômeno das descargas atmosféricas é feita através de medições de forma direta ou indireta. Na primeira utiliza-se de instrumentos posicionados em torres em locais elevados (torres instrumentadas) ou através de lançamento de foguetes para indução de descarga, enquanto que a segunda consiste em utilizar um dos efeitos originados pela descarga (campo eletromagnético, luminosidade, som e variação da temperatura), provocados pela corrente de descarga no canal de retorno, para estimar os parâmetros desta corrente. Sistemas de detecção indireta de descargas atmosféricas, detectores ópticos em satélite para observação da atividade atmosférica, medidores de campo elétrico e/ou magnético e contadores de descargas são exemplos de sistemas de medição indireta (MESQUITA, 2001).

Nos LLS o sinal da onda do campo eletromagnético gerado é detectado por sensores especiais posicionados em várias estações terrestres distantes entre si, distribuídas na região de monitoramento. São capazes de prover informações sobre localização, indicação de polaridade, multiplicidade e estimativa de intensidade de corrente dos eventos ocorridos em sua área de cobertura (VISACRO, 2005).

Na Figura 2.9 abaixo está ilustrada a constituição básica desse tipo de sistema, formado por um conjunto de sensores colocados em estações remotas e por uma estação central de processamento. Quando da incidência de eventos de raios na área de monitoramento, esses sensores detectam os sinais eletromagnéticos na faixa de radiofrequência emitidos a partir do fluxo da corrente de retorno pelo canal de descarga. Em seguida, as informações individuais dos sensores relativas à detecção do evento são enviadas para a estação central para processamento e determinação dos parâmetros associados ao evento (localização, polaridade, amplitude de corrente, etc.).

Figura 2.9 – Constituição básica de um LLS



Fonte: Visacro (2005).

Assim, para realizar estas atividades os LLS devem compreender pelo menos as seguintes funcionalidades (VISACRO, 2005):

- Técnicas de detecção de descarga e de localização do ponto de incidência;
- Critérios de discriminação para tipificação do evento;
- Modelos para estimativa da intensidade de corrente e de outros parâmetros.

No Brasil, é comum também designar os LLS como “sistemas de localização de tempestades”, atribuindo-lhes a sigla SLT (VISACRO, 2005).

2.2.1 Propagação das ondas eletromagnéticas

De forma a entender melhor como trabalham os LLS que se utilizam da captação das ondas eletromagnéticas como recurso de medição indireta, faz-se necessário uma pequena revisão da teoria de propagação eletromagnética com foco na faixa de frequências de interesse deste trabalho para o evento das descargas atmosféricas.

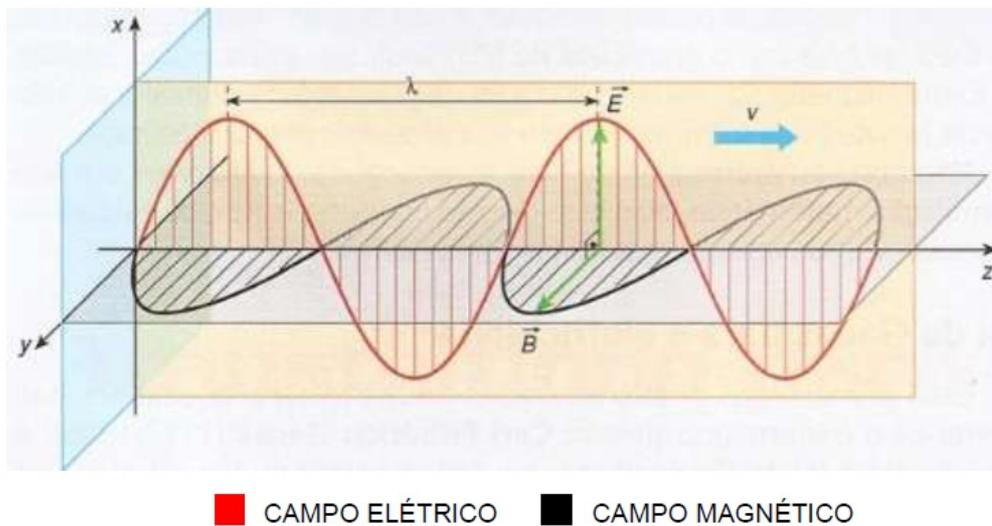
a) O espectro eletromagnético dos raios

A radiação eletromagnética é uma oscilação autossustentada dos campos elétrico e magnético. Os dois campos oscilam com a mesma fase e encontram-se desacoplados das cargas elétricas que lhes deram origem. No espaço livre suas oscilações são perpendiculares entre si e se propagam em uma onda transversal (Figura 2.10), com as oscilações normais em relação à direção de propagação da onda. Assim, cada vetor representativo da direção de oscilação de um campo pode ser decomposto em duas componentes: uma vertical (eixo x) e outra horizontal (eixo y), neste plano perpendicular à direção de propagação (em azul na figura). A distância entre dois máximos consecutivos desta onda corresponde ao seu parâmetro λ , denominando comprimento de onda, que está relacionado com a frequência de oscilação f da sua fonte geradora pela equação 2.1:

$$v = \lambda \cdot f \quad (2.1)$$

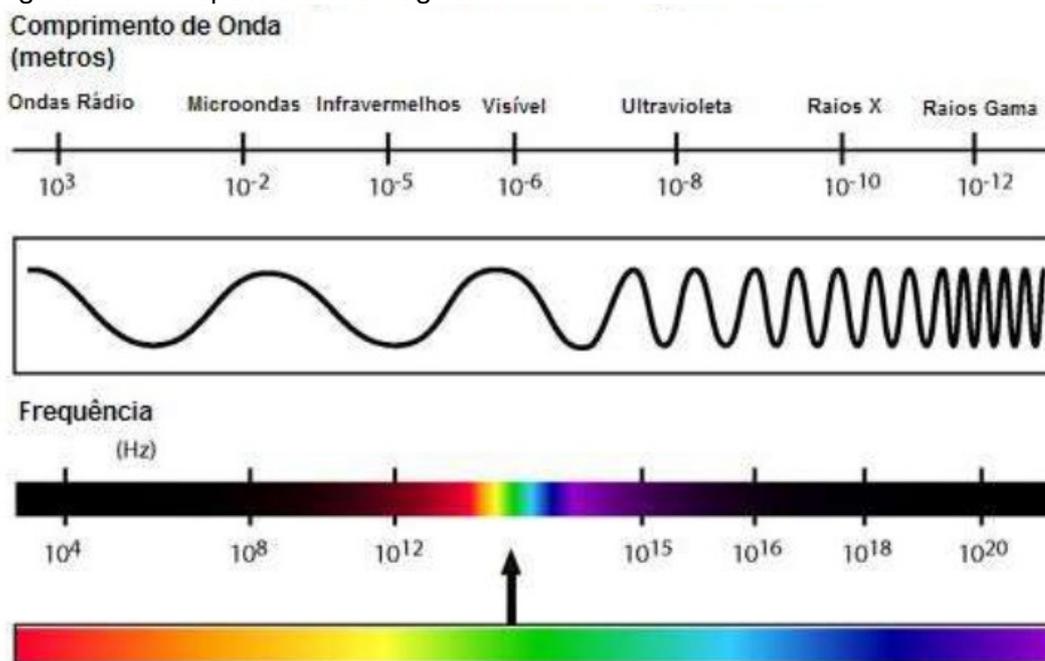
onde v é a velocidade de propagação da onda. Portanto, o comportamento de propagação de uma onda eletromagnética depende fortemente de seu comprimento de onda. Tal fato fundamentou a classificação das ondas na forma de espectro eletromagnético (Figura 2.11) e na padronização por faixas de frequências para designação de operação dos serviços de telecomunicações (NASCIMENTO, 2000), conforme ilustra a Figura 2.12.

Figura 2.10 – Onda eletromagnética



Fonte: Cola da Web (2016).

Figura 2.11 – Espectro eletromagnético



Fonte: Tudo sobre Geoprocessamento (2011).

Durante o transcorrer do fenômeno de uma descarga atmosférica, o canal ionizado criado gera, como um dos efeitos físicos, um impulso de onda eletromagnética que emite radiações dentro das várias faixas do espectro eletromagnético. Somente em 1987 identificou-se o espectro efetivo de emissão eletromagnética das descargas atmosféricas (LE VINE, 1987). A partir daí outros pesquisadores, como Uman, demonstraram que as descargas de retorno dos raios nuvem-solo emitiam radiação eletromagnética em LF variando entre 10 a 300 kHz

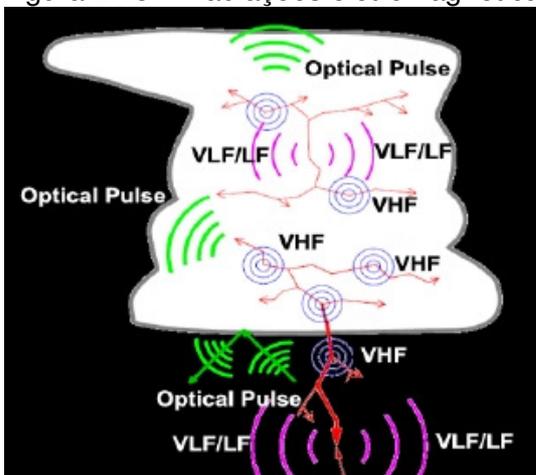
(UMAN, 1987). Já os raios intranuvem emitem radiação eletromagnética em VHF que variam entre 100 e 800 MHz (KRIDER, 1996) (Figura 2.13).

Figura 2.12 – Padronização por faixas de frequências de comunicações

Faixa	Abreviatura	Frequências	Comprimentos
Frequência muito baixa (Very Low Frequency)	VLF	10 a 30 kHz	30.000 a 10.000m
Frequência baixa (Low Frequency)	LF	30 a 300 kHz	10.000 a 1.000m
Frequência média (Medium Frequency)	MF	300 a 3.000 kHz	1.000 a 100m
Frequência alta (High Frequency)	HF	3 a 30 MHz	100 a 10m
Frequência muito alta (Very High Frequency)	VHF	30 a 300 MHz	10 a 1m
Frequência ultra alta (Ultra High Frequency)	UHF	300 a 3.000 MHz	100 a 10cm
Frequência super alta (Super High Frequency)	SHF	3.000 a 30.000 MHz	10 a 1cm
Frequência extremamente alta (Extremely High Frequency)	EHF	30.000 a 300.000 MHz	1 a 0,1cm

Fonte: Pozzera (2016).

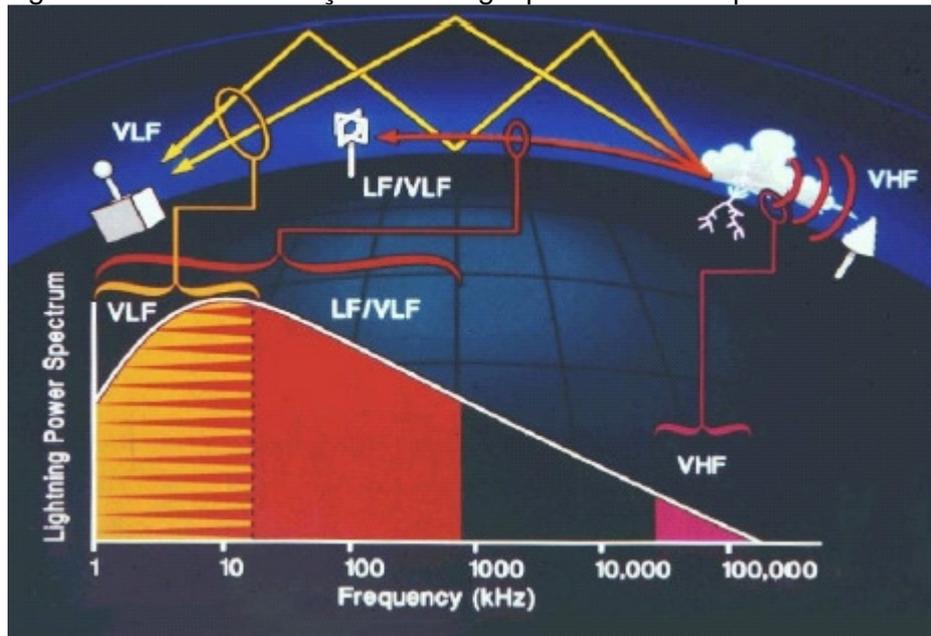
Figura 2.13 – Radiações eletromagnéticas dos raios



Fonte: Finke e Kreyer (2002).

O nível de energia no sinal gerado não é uniformemente distribuído dentro deste espectro, com as componentes de frequência de maior amplitude compreendidas na faixa de 0,5 kHz a 20 kHz e máximo no entorno de 10 kHz (VISACRO, 2005), conforme ilustra a Figura 2.14. Portanto, fortemente concentrado na faixa VLF e vizinhanças da LF.

Figura 2.14 – Concentração de energia por faixa de frequência nos raios



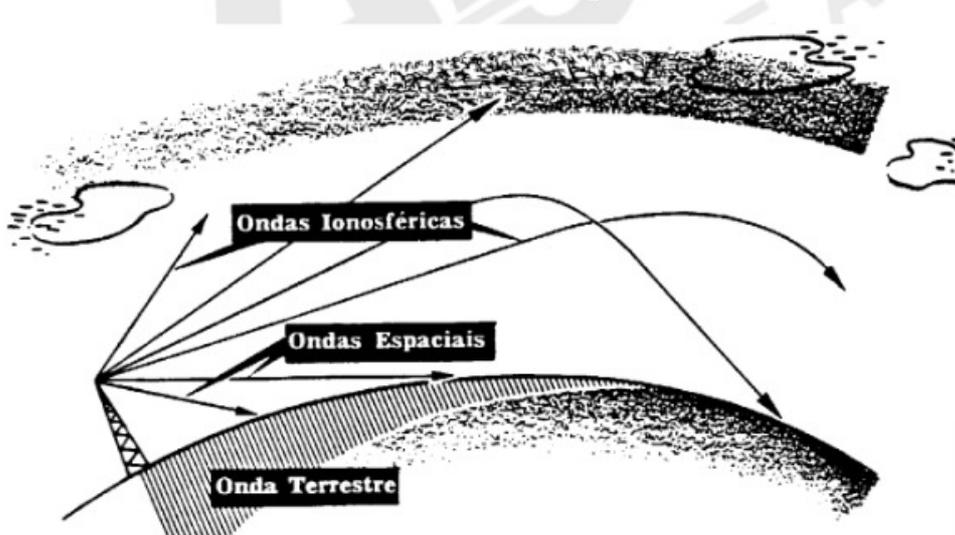
Fonte: adaptado de Cummins e Murphy (2009).

b) Principal Modo de Propagação em LF

Existem diversas maneiras nas quais as ondas eletromagnéticas se deslocam, dependendo da frequência de transmissão. Ondas que se propagam com frequências inferiores a 3 MHz (VLF, LF e MF) acompanhando a curvatura da Terra são chamadas de ondas de superfície ou terrestres. Já entre 3 MHz e 30 MHz, ondas da faixa de HF, são refletidas pelas camadas ionizadas da atmosfera, por isso são chamadas de ondas ionosféricas ou indiretas. A partir daí, acima de 30 MHz, da faixa de VHF em diante, propagam-se em linha reta, sendo chamadas, por essa razão, de ondas diretas, espaciais ou troposféricas (NASCIMENTO, 2000). A Figura 2.15 ilustra a classificação das ondas por modo de propagação.

A onda terrestre, as ondas espaciais e as ondas ionosféricas, contêm a informação transmitida. Entretanto, em certas frequências uma dessas ondas será muito mais eficiente na transmissão da informação do que as outras.

Figura 2.15 – Componentes de uma onda radiada



Fonte: Aero TD (2016).

Na transmissão de frequências baixas, ou seja, em LF (que é de interesse deste trabalho), a maior parte da energia radiada está na onda terrestre. Como o solo é um mau condutor, a onda é atenuada rapidamente e, portanto, não é eficaz para transmissão a grandes distâncias, estando a radiação da onda efetivamente limitada a um raio de cerca de 200 km do transmissor. Portanto, áreas cobertas por esta distância podem detectar sinais nesta faixa com boa seletividade, porém acima dos 200 km de distância podem sofrer de interferência mútua (AERO TD, 2016).

2.2.2 Sensores e técnicas de localização de descargas atmosféricas

Um sensor de raios pode ser comparado a um receptor de rádio tipo AM (“amplitude modulation”) em que os pulsos eletromagnéticos emitidos pelos raios são detectados, e através de processamento digital deles é extraído a forma de onda do sinal no domínio do tempo. Iniciativas de desenvolver equipamentos deste tipo não são recentes, datam de meados da década de 20. A seguir será descrito um pouco da história desses instrumentos que deram origem aos atuais sensores de raios, com foco na plataforma da empresa Vaisala que foi a tecnologia utilizada na RDR-SIPAM. Também será feito um resumo dos principais métodos de localização de descargas atmosféricas.

a) Sensores de detecção de raios

O primeiro equipamento utilizado para localizar a direção de uma fonte de radiação em baixas frequências, que se tem notícia, foi criado pelos pesquisadores Watson e Herd em 1926 que desenvolveram um dispositivo de raios catódicos o qual chamaram de “cathode-ray direction finder” (CRDF) (KRIDER,1996). Ele utilizava-se de duas antenas em “loop” (antenas fechadas) ortogonais entre si e sintonizadas na frequência de 10 kHz com o objetivo de detectar o campo magnético horizontal produzido pelos raios. Além disso, esse arranjo possibilitava obter o ângulo azimute com o norte verdadeiro da direção de detecção da descarga atmosférica. Assim, dois ou mais CRDF situados em posições conhecidas eram suficientes para determinar a localização da incidência da descarga atmosférica através da intersecção dessas direções azimutais com a obtenção de uma provável área de ocorrência. Posteriormente, sistemas de localização similares a este foram denominados de sistemas magnéticos de localização de direção ou “magnetic direction finder “ (MDF) (NACCARATO, 2001).

Somente em 1976 esta técnica foi aprimorada com o desenvolvimento de um sistema MDF capaz de localizar descargas atmosféricas em uma área de cobertura de aproximadamente 500 km de raio. Operava no domínio do tempo e foi projetado de tal forma que detectava apenas radiações oriundas das descargas de retorno, trabalhando na faixa de 1 a 500 kHz (KRIDER et al., 1976,1980).

De forma paralela em Lewis et al. (1960) houve a descrição de um método para localização de raios utilizando as diferenças entre os tempos de chegada da frente de onda eletromagnética em vários sensores. Este método ficou conhecido pelo nome “time of arrival” (TOA) ou método hiperbólico, devido ao fato da diferença constante no tempo de chegada do sinal da onda entre duas estações definir uma hipérbole (considerando propagação na velocidade da luz). Assim, várias estações dão origem a múltiplas hipérbolas cujas intersecções definem a localização da fonte de radiação (BENT; LYONS, 1984). E no final da década dos anos 80, em Casper e Bent (1992), se desenvolve um receptor TOA de banda larga apropriado para localizar fontes de radiação de raios a média e longa distâncias, utilizando este método.

Métodos de localização por tempo de chegada (TOA) podem fornecer localizações mais precisas a longas distâncias que a técnica de localização de direção magnética (MDF) (LEE, 1989).

Em 1987 tem início nos Estados Unidos uma rede nacional de detecção denominada “National Lightning Detection Network” (NLDN), com o objetivo de fornecer dados de descargas atmosféricas em tempo real para agências florestais e empresas de energia elétrica (CUMMINS et al., 1992, 1995). Inicialmente formada por várias redes regionais, que cobriam o oeste e centro-oeste, e composta por sensores que utilizavam a tecnologia MDF, que eram fabricados pela empresa “Lightning Location and Protection Inc.” (LLP). Porém, simultaneamente, uma rede de sensores TOA, fabricados pela empresa “Atmospheric Research Systems Inc.” (ARSI) denominados “Lightning Positioning and Tracking System” (LPATS), era instalada em escala nacional (CASPER; BENT, 1992). Por final, as redes constituídas desses dois tipos de dispositivos de detecção foram integradas à NLDN (NACCARATO, 2001).

Em 1991, após o reconhecimento dos benefícios gerados pela informação da estimativa de localização dos raios, principalmente pelas empresas de energia elétrica, e crescimento do interesse comercial nesses dados as empresas LLP e ARSI foram fundidas em uma companhia especializada neste segmento chamada “Global Atmospheric Inc.” (GAI), sobre a supervisão da organização sem fins lucrativos “Electric Power Research Institute” (EPRI) (NACCARATO, 2001).

Posteriormente, em 1992, esta empresa desenvolveu um método que combinava as informações provenientes de ambas as técnicas, possibilitando melhorar significativamente a precisão de localização dos raios, dando origem à tecnologia “Improved Accuracy from Combined Technology” (IMPACT) e a sistemas de detecção capazes de processar tanto informações provenientes de sensores TOA e MDF, como de IMPACT, os quais podem medir tanto o tempo de chegada quanto a direção magnética das descargas (CUMMINS et al., 1998).

Por outro lado, no final da década de 70, a Agência Nacional de Investigação Aeroespacial Francesa (ONERA) iniciou pesquisas sobre formas de proteger aviões e lançadores espaciais da eletricidade atmosférica e raios. O sistema desenvolvido também utilizava técnicas de detecção, mas em altas frequências, especificamente em VHF, e entre 1985 e 1988 esta agência lança o projeto SAFIR (“Système d'Alerte Foudre par Interérométrie Radioélectrique”) para o Departamento Francês de Defesa

e a Agência Espacial Nacional. Logo em seguida, em 1989, uma empresa denominada Dimensions foi fundada como “spin-off” da ONERA para industrialização e comercialização do sistema SAFIR (VAISALA, 2001).

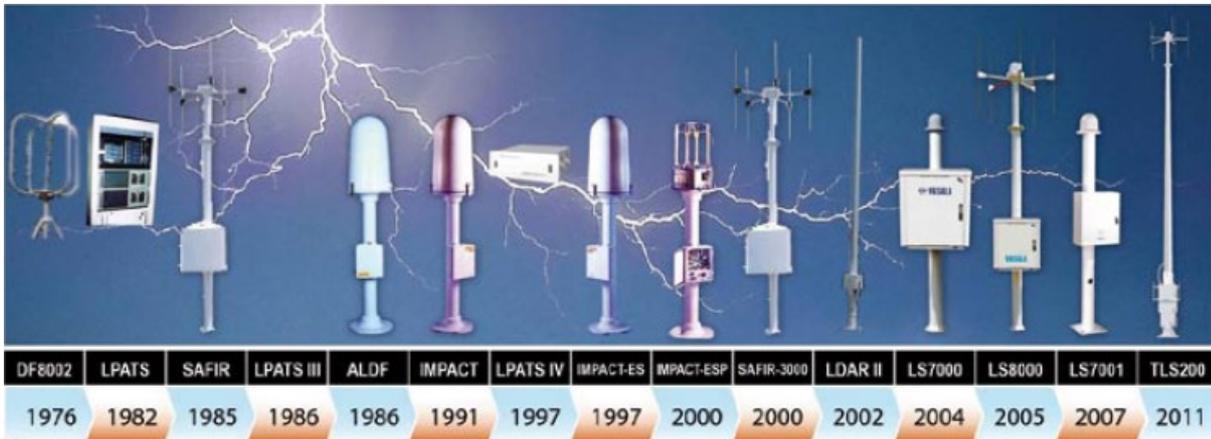
Entre 1990 e 2000, a Dimensions desenvolveu aplicações operacionais SAFIR para meteorologia, aviação, hidrologia e eletricidade. O SAFIR foi reconhecido como uma referência única para a detecção total de raios, e previsão de tempestade em curto prazo, através de seus sucessos comerciais na Europa e na Ásia. E em 2000 esta empresa ingressa no Grupo Vaisala (VAISALA, 2001) (empresa sediada em Helsinque, capital da Finlândia, e um dos líderes mundiais em medição ambiental e industrial).

Em março de 2002 ocorre a aquisição da GAI pela Vaisala, e a partir daí há um grande esforço para integração da tecnologia SAFIR a sistemas híbridos compostos por sensores do tipo IMPACT e LPATS (MESQUITA, 2006). Neste mesmo ano todos os 63 sensores LPATS III, com tecnologia TOA, e 43 sensores IMPACT, com tecnologias TOA e MDF, da rede NLDN foram substituídos por sensores IMPACT-ESP que possuíam melhorias em relação ao seu antecessor, como: circuitos analógicos avançados, maior velocidade de processamento e critérios de forma de onda configuráveis. Assim, todos os sensores da rede agora trabalhavam com os dois métodos de detecção (CUMMINS et al., 2006).

No ano de 2004 a Vaisala lança a série LS7000 com melhorias na precisão de localização de raios nuvem-solo, através da otimização da combinação das tecnologias de indicação de direção magnética e tempo de chegada, na faixa LF. No ano seguinte lança o modelo LS8000, que foi o primeiro sensor com integração das tecnologias de detecção em baixas e altas frequências (antes da aquisição a GAI havia lançado o sistema LDAR II, em 2002, para trabalhar somente em altas frequências que deu origem depois aos atuais LMA), juntando as vantagens da técnica de detecção por interferometria digital em VHF com as TOA e MDF do seu antecessor, permitindo a upgrade para um sistema de detecção que esta empresa denominou de “Total Lightning”. Nos anos seguintes foram lançadas novas versões para família de sensores LS7000, para sistemas de detecção em baixas frequências, com significativas melhorias: LS7001 e LS7002, em 2007 e 2013, respectivamente. Já para a sucessão do LS8000 lança o sensor TLS200 em 2011. Em 2013 a rede NLDN foi atualizada para os sensores LS7002 que substituíram a geração anterior de sensores LS7001 e IMPACT-ESP, melhorando a precisão de localização para

cerca de 200 m (HEMBURY, N.; HOLLE, R., 2011)(BUCK, T. L.; NAG, A.; MURPHY M. J, 2014). A Figura 2.16 ilustra por fotos a evolução dos sensores Vaisala de 1976 a 2011.

Figura 2.16 – Evolução dos sensores Vaisala



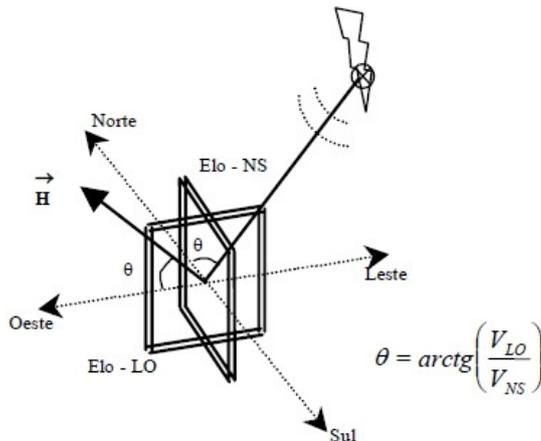
Fonte: Hembury e Holle (2011).

b) Técnicas de localização de descargas atmosféricas

Como visto as técnicas de detecção mais utilizadas pelos primeiros LLS foram a indicação de direção e tempo de chegada, mas ainda há as técnicas de intersecções circulares e interferométrica, todas detalhadas nos itens a seguir:

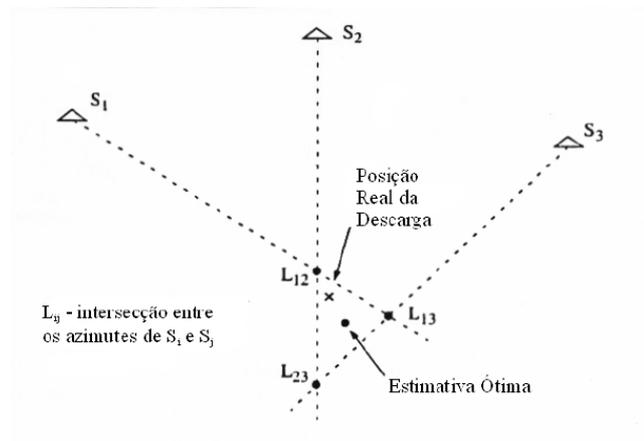
b1 – Técnica de indicação de direção (MDF – “Magnetic Direction Finder”): esta técnica emprega duas antenas tipo “loop”, ou seja, constituídas por espirais verticais e ortogonais entre si, cujas áreas internas são atravessadas pelo fluxo magnético gerado pela descarga atmosférica (Figura 2.17). Estas antenas têm a função de indicar a direção de chegada do pulso eletromagnético originado da descarga (MESQUITA, 2001). Assim, três ou mais sensores utilizando um procedimento de otimização, denominado de triangulação, podem delimitar uma área provável do ponto de incidência da descarga, formada pela intersecção das três direções medidas pelos sensores, e a localização ótima obtida após a triangulação, conforme ilustra a Figura 2.18. Os três pontos: L_{12} , L_{13} e L_{23} , mostram as possíveis localizações que seriam estimadas caso apenas dois sensores informassem a ocorrência da descarga (NACCARATO, 2001).

Figura 2.17 – Antenas tipo “loop”



Fonte: Mesquita (2006).

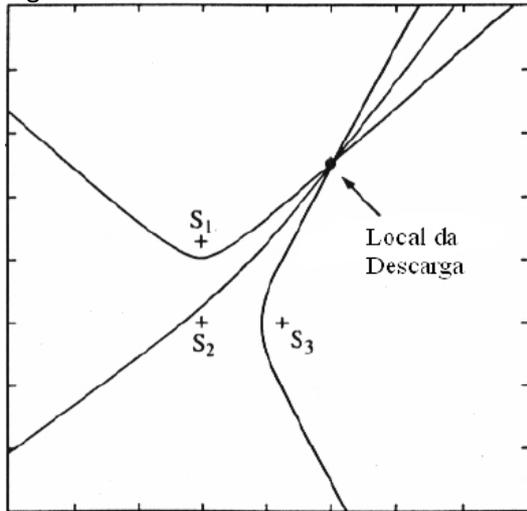
Figura 2.18 – Técnica MDF



Fonte: Adaptado de GAI (1999).

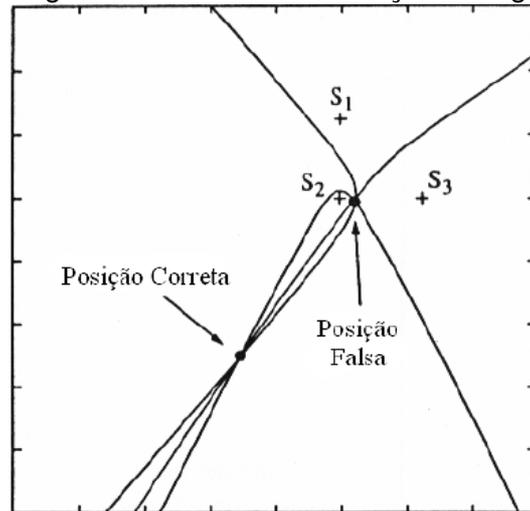
b2 – Técnica do tempo de chegada (TOA – “Time of Arrival”): esta técnica determina a localização da descarga atmosférica através da diferença relativa entre os tempos de chegada dos sinais eletromagnéticos gerados por um mesmo evento de incidência quando detectados pelos sensores da rede. Assim, cada par de sensores define uma curva hiperbólica que descreve o conjunto de possíveis localizações (lugar geométrico dos pontos) que satisfaz aquela diferença temporal medida. Para isso é necessário que eles estejam em perfeita sincronia temporais através de relógios de alta precisão, pois qualquer imprecisão pode implicar em erros de localização da ordem de quilômetros de distância. Essa técnica também é conhecida por “localização por intersecções hiperbólicas”, pois dadas duas dessas curvas, é possível determinar uma localização a partir do ponto de intersecção entre elas, conforme mostra Figura 2.19. Entretanto, em algumas condições geométricas as curvas definidas por apenas três sensores participantes poderão resultar em dois pontos de intersecção, conforme ilustra a Figura 2.20. Assim, fazendo-se necessário a utilização de pelo menos quatro sensores (NACCARATO, 2001).

Figura 2.19 – Técnica TOA



Fonte: Adaptado de GAI (1999).

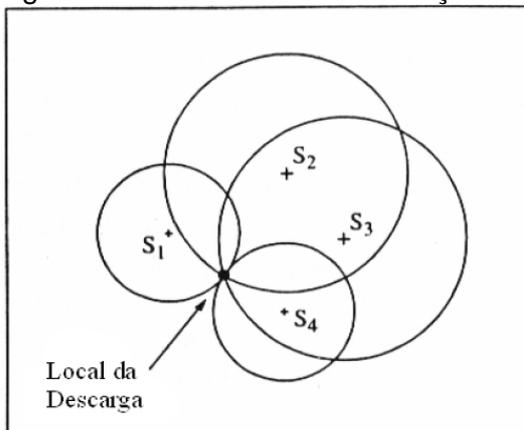
Figura 2.20 – TOA com solução ambígua



Fonte: Adaptado de GAI (1999).

b3 – Técnica das interseções circulares: esta técnica é uma abordagem alternativa para localização de raios utilizando o método de tempo de chegada, mas medindo o horário absoluto de chegada do sinal eletromagnético em cada sensor, estimando-se assim tanto a localização quanto o horário de ocorrência do evento. Assim, cada sensor fornece uma informação que pode ser interpretada como sua distância efetiva do ponto de incidência, definindo um lugar geométrico circular com as possíveis posições em torno de cada sensor. O raio de cada círculo é baseado na diferença entre o horário estimado do evento e o horário medido no instante da chegada do sinal eletromagnético no sensor, conforme ilustrado na Figura 2.21. A posição e o horário correspondentes ao ponto de interseção de todos os círculos determina a localização da descarga (NACCARATO, 2001).

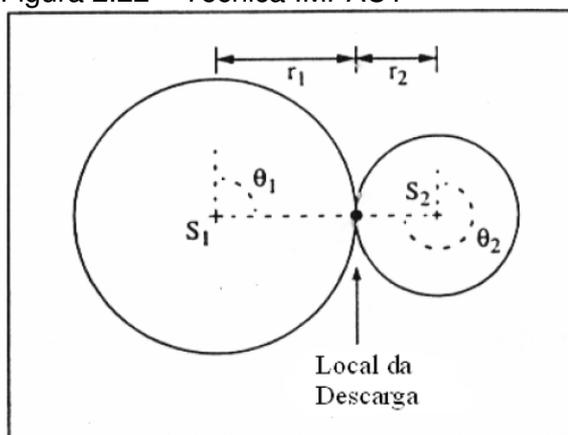
Figura 2.21 – Técnica das interseções circulares



Fonte: Adaptado de GAI (1999).

b4 – Técnica da combinação MDF e TOA (IMPACT – “Improved Accuracy from Combined Technology”): técnica que resulta da combinação dos métodos MDF e TOA, ou seja, o primeiro fornece a informação do ângulo de azimute em relação ao ponto de ocorrência do evento, enquanto que o segundo fornece a informação da distância em relação ao sensor (interseções circulares) para obter-se uma estimativa ótima da localização da descarga. Tem a vantagem de não sofrer com os problemas inerentes de cada método utilizado separadamente (CUMMINS et al., 1993). Por exemplo, se uma descarga ocorrer no segmento de linha que une dois sensores, ela será localizada com precisão através da interseção entre a linha definida pelo azimute e os círculos definidos pelas distâncias aos sensores, conforme mostra a Figura 2.22 (NACCARATO, 2001).

Figura 2.22 – Técnica IMPACT



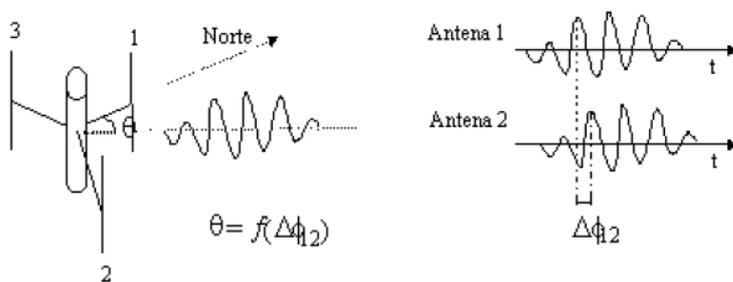
Fonte: Adaptado de GAI (1999).

Nessa figura, a informação do azimute para o sensor S_1 corresponde ao ângulo θ_1 e o valor da distância (baseada no horário de chegada absoluto) é representada por um círculo de raio r_1 . Valendo a mesma interpretação para o segundo sensor S_2 , de tal forma que com dois sensores determina-se a provável localização do evento (GAI, 1999). O desempenho desta técnica supera os métodos MDF e TOA isoladamente, tanto na precisão de localização quanto na probabilidade de detecção, minimizando assim a probabilidade de obter-se uma localização completamente errada (CUMMINS et al., 1993).

b5 – Técnica interferométrica: técnica fundamentada nas medições da diferença de fase da onda eletromagnética recebida pelas diferentes antenas de um arranjo (conjunto) de antenas (“antenna array”). Estas diferenças de fase são diretamente

relacionadas com a direção de chegada da onda no sensor (RICHARD, 1998). As antenas operam dentro de uma determinada faixa de frequência de interesse, com o espaçamento entre elas apresentando dimensões relativas ao comprimento de onda associado a esta faixa. Desta forma, cada antena do conjunto mede a onda em uma determinada fase. As diferenças de fase dependem da geometria do conjunto de antenas e da direção da chegada do sinal eletromagnético. Assim, conhecida a geometria do conjunto de antenas é possível determinar a direção de chegada em função das diferenças de fases medidas, conforme ilustra a Figura 2.23.

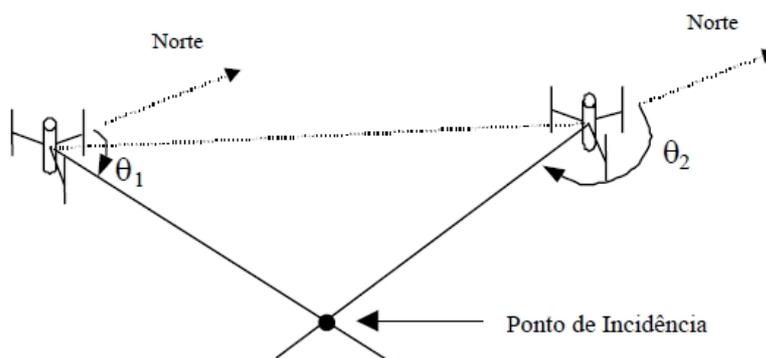
Figura 2.23 – Técnica interferométrica



Fonte: Adaptado de Barker et al. (1996).

Portanto, utilizando a indicação de direção de pelo menos dois conjuntos de antenas é possível estimar o ponto de incidência do evento através do procedimento de triangulação (MESQUITA, 2006), conforme ilustrado na Figura 2.24.

Figura 2.24 – Triangulação por interferometria



Fonte: Visacro (2005).

2.2.3 Características dos LLS

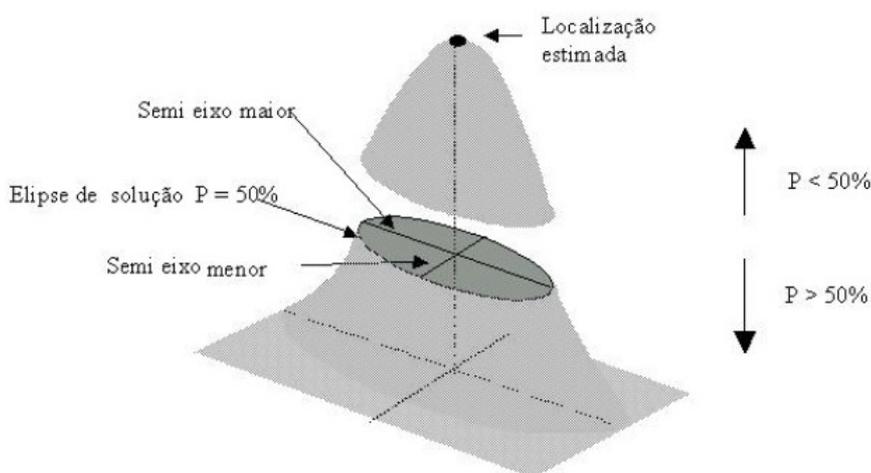
Sistemas de detecção e localização indireta de descargas atmosféricas possuem duas principais características: desempenho e parâmetros fornecidos. A seguir um resumo dos mesmos.

a) Desempenho

Há uma série de fatores que afetam o desempenho de um LLS, entre os principais estão: precisão e consistência dos dados de localização, assim como, a eficiência de detecção (NACCARATO, 2001).

a1 – Precisão da localização: em 1947 o trabalho do matemático Stansfield (1947) mostrou que quando os erros de localização obedecem a uma distribuição gaussiana (como nos sistema LLS), as regiões de segurança tornam-se elípticas. Assim, para as localizações de descargas calculadas pelos LLS, pode-se determinar uma elipse de segurança que circunscreve uma região centrada na posição calculada, na qual existem 50% de probabilidade de que a descarga tenha ocorrido no seu interior (CUMMINS et al., 1998), definindo assim a precisão de localização, ou LA (“location accuracy”), conforme ilustra a Figura 2.25.

Figura 2.25 – Distribuição gaussiana de erro de localização

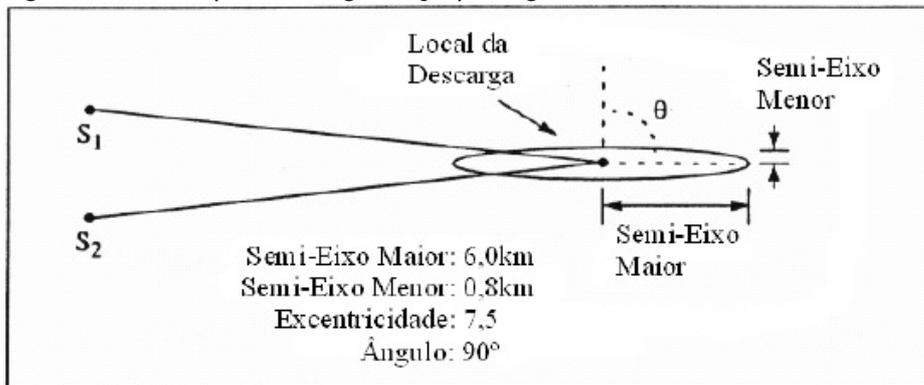


Fonte: Adaptado de Pinto Jr. (2005).

Notas: A elipse em destaque corresponde à região com probabilidade de 50% de ocorrência da descarga. O aumento da probabilidade implica no aumento da área da elipse, com o local mais provável da incidência no ponto central.

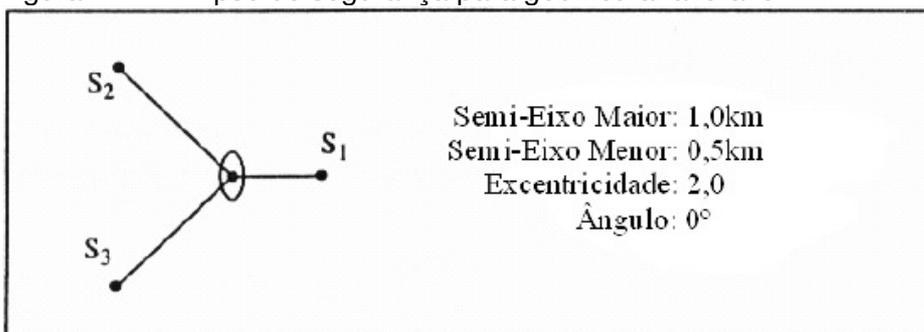
Esta elipse de segurança, ou elipse de solução (“confidence ellipse”), pode ser descrita em termos do seu semieixo maior, sua excentricidade (razão entre o semieixo maior e o semieixo menor) e o ângulo de orientação do semieixo maior em relação ao norte verdadeiro. Assim, por exemplo, se uma descarga for detectada por apenas dois sensores MDF situados a uma grande distância do seu ponto de ocorrência (Figura 2.26) a elipse possuirá grande excentricidade. Entretanto, se a descarga for detectada por vários sensores, cujos ângulos de azimute apresentem uma geometria mais favorável, a elipse tenderá a ser menor e mais circular (Figura 2.27). Com isso, conclui-se que a distribuição espacial dos sensores, com a efetiva participação deles na detecção de um evento, apresenta um papel fundamental na precisão de localização de um sistema LLS (NACCARATO, 2001).

Figura 2.26 – Elipse de segurança para geometria desfavorável



Fonte: Adaptado de GAI (1999).

Figura 2.27 – Elipse de segurança para geometria favorável



Fonte: Adaptado de GAI (1999).

A elipse de segurança pode ser calculada para outras probabilidades diferentes de 50%, bastando para isto alterar apropriadamente a escala dos semieixos maior e menor. O comprimento de cada eixo é proporcional ao valor do desvio padrão normalizado σ (sigma) correspondente à probabilidade desejada (CUMMINS et al., 1995).

a2 – Eficiência de detecção: em um LLS nem todas as descargas são detectadas e informadas, pois algumas podem apresentar formas de onda incoerentes ou intensidade de sinal captado abaixo do limiar de sensibilidade dos sensores. Além disso, a localização de determinadas descargas não poderão ser calculadas pelo sistema caso os dados oriundos dos sensores não puderem ser correlacionados ou produzam soluções erradas. Assim, a capacidade de um LLS em detectar e informar as soluções na determinação da localização das descargas define sua eficiência de detecção da rede, ou DE (“detection efficiency”), a qual é uma porcentagem da quantidade total de descargas detectadas (NACCARATO, 2001).

Usualmente a DE é um valor estimado, devido ao desconhecimento do número real de incidências no solo. Portanto, se faz necessário utilizar outro sistema de medição como referência para indicar de forma mais precisa o valor deste parâmetro para a região ou local em estudo. O fabricante utiliza um algoritmo para o cálculo da DE da sua rede que leva em conta vários fatores, entre eles (MESQUITA, 2006):

- Eficiência individual de cada sensor (capacidade de detecção);
- Sensores em operação contínua (sem interrupções de operação e/ou transmissão de dados à central de processamento);
- Tipos de sensores que compõem a rede de detecção (tecnologia dos sensores);
- Número médio de sensores sensibilizados que contribuem para a solução da descarga;
- Distribuição geográfica dos sensores (geometria da rede e região de cobertura);
- Distribuição estatística da amplitude de corrente.

a3 – Consistência dos dados: é a quantificação da qualidade das medições realizadas pelo LLS, assim, além das informações da localização do ponto de incidência e instante de ocorrência da descarga, são fornecidos valores que representam o grau de concordância das medidas feitas pelos sensores em comparação com os dados calculados pelo sistema (GAI, 1999). É baseada nos métodos dos mínimos quadrados e fornecida por uma “função erro”, também conhecida como “chi quadrado normalizado” (χ^2). Consiste na somatória dos erros de medidas de tempo e de ângulo de cada sensor sensibilizado participante da

solução da localização da descarga atmosférica, normalizada pelos erros esperados de tempo e de ângulo e pelo grau de liberdade da descarga analisada, que é a diferença entre o número de medidas realizadas (tempo e ângulo que possuem desvios aceitáveis) e o número de parâmetros estimados (latitude, longitude e horário de ocorrência), conforme descrito na equação 2.2 abaixo (MESQUITA, 2006):

$$\chi^2 = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{(m_j - m_j^*)^2}{e_j^2} + \sum_{j=1}^n \frac{(t_j - t_j^*)^2}{\sigma_j^2}}{x} \quad (2.2)$$

onde:

n é o número total de medidas (sensores sensibilizados);

m_j é o ângulo medido pelo sensor j ;

m_j^* é o ângulo calculado para o sensor j (baseado na localização ótima da descarga);

e_j é o erro teórico de ângulo do sensor j (desvio padrão do erro de direção do sensor j);

t_j é o tempo medido pelo sensor j ;

t_j^* é o tempo calculado para o sensor j (baseado na localização ótima da descarga);

σ_j é o erro teórico de tempo do sensor (desvio padrão do erro de tempo do sensor j);

x é o grau de liberdade da descarga.

O erro esperado para as medidas de ângulo pode ser mantido na faixa de $\pm 1^\circ$ e para as medidas de tempo na faixa de $\pm 1,5 \mu\text{s}$ (GAI, 1997).

Bons valores de χ^2 encontram-se na faixa de 0 a 3, enquanto que valores aceitáveis ficam entre 3 e 10. Valores maiores representam erros de localização não minimizados, ruídos não previstos ou má correlação no tempo. Localizações associadas a esses valores elevados devem ser consideradas “afastadas” da posição real, indicando a necessidade de correções locais na rede, como ajustes no ganho dos sensores e/ou em sua orientação em relação ao norte verdadeiro,

alteração da geometria ou mesmo a inclusão de novos sensores (NACCARATO, 2001).

b) Parâmetros fornecidos

Os principais parâmetros disponibilizados pelos LLS relativos ao evento de uma descarga atmosférica são os seguintes (MESQUITA, 2006):

- Localização;
- Instante de ocorrência;
- Tempo de subida e largura de pulso;
- Tipo de raio;
- Multiplicidade;
- Polaridade;
- Pico da corrente.

b1 – Localização: informada em coordenadas geográficas (latitude e longitude) do ponto de incidência da descarga atmosférica. É calculada segundo as técnicas de detecção descritas nos itens 2.2.2: b1, b2, b3, b4 e b5 deste trabalho. A técnica aplicada dependerá de cada tipo de sistema e associada a esta informação podem ser disponibilizados parâmetros como o “chi quadrado” e os comprimentos dos semieixos da elipse de solução da descarga, permitindo, assim, a análise da qualidade desses dados de localização, conforme descrito no item 2.2.3.a3.

b2 – Instante de ocorrência: é calculado pela central de processamento que considera os instantes de chegada do sinal eletromagnético relatados pelos sensores participantes da solução de localização da descarga e a velocidade de propagação do campo eletromagnético sobre a superfície terrestre (assumida como valor padrão a velocidade da luz). Usualmente os LLS são sincronizados pelo sistema GPS (“global positioning system”).

b3 – Tempo de subida e largura de pulso: em termos práticos, define-se a largura de pulso como o tempo decorrido entre o pico da radiação e o instante em que seu valor atinge o nível mínimo necessário para sensibilizar os sensores (“threshold”). O

tempo de subida, por sua vez, é definido como o tempo em que o sinal eletromagnético leva para atingir o valor de pico, partindo do valor mínimo de sensibilização dos sensores (NACCARATO, 2001). Porém, a fim de minimizar os efeitos de propagação sobre a forma de onda da radiação em função da distância percorrida e da intensidade do sinal, distorcendo assim seus valores de tempo de subida e largura de pulso, os valores desses parâmetros correspondem aos registrados pelo sensor mais próximo da primeira descarga de retorno (aquele que informou o horário mais próximo do horário calculado pela central) (COORAY, 1987).

b4 – Tipo de raio: os níveis de detecção dos raios nuvem-solo são recebidos com mais intensidade em sistemas que focam neste tipo, pois a antena está posicionada verticalmente devido a polarização da onda eletromagnética. Assim, nas faixas VLF/LF a discriminação entre raios nuvem-solo e intranuvem é geralmente baseada na forma e na amplitude do sinal medido pelo sensor através da alteração da intensidade do campo elétrico, onde o tempo de queda é o parâmetro mais importante (dE/dt). As variações são maiores para as descargas nuvem-solo que produzem maiores picos de corrente na descarga de retorno. Ocorrendo esta seleção nos próprios sensores, os quais registram apenas os raios cuja largura de pulso seja superior a 10 μ s, valor padrão de configuração definido pela GAI (1994), que considera como raios intranuvem todos aqueles com largura de pulso inferior a este valor.

b5 – Polaridade:

A polaridade está relacionada aos raios do tipo nuvem-solo. No caso de uma descarga negativa o campo elétrico é orientado verticalmente para baixo, enquanto que no caso de uma descarga positiva o campo elétrico é orientado verticalmente para cima. E no caso de um raio intranuvem a orientação pode ser qualquer, inclusive horizontal. A maioria das antenas está posicionada para receber a onda de polarização vertical e permitem a medição do sinal da componente vertical do campo elétrico. Porém, na faixa VLF os receptores não podem determinar diretamente a polaridade porque esse parâmetro é afetado pelas reflexões da onda na ionosfera (DENTEL, 2013).

b6 – Multiplicidade:

Um evento de raio (“flash”) é formado por uma sequência de várias descargas de retorno (“strokes”), entre 2 até 20, com duração nominal de dezenas de microssegundos. Estão separadas no tempo por cerca de 0 até 100 ms e no espaço por até vários quilômetros (CUMMINS et al., 1998). O número de “strokes” em um evento de raio é referido como multiplicidade. Então, para identificar uma descarga de retorno única um critério de distância e tempo é aplicado. Descargas de retorno que seguem um curto período de tempo (1 s), após a primeira ocorrência, e localizada a menos de 10 km do ponto da primeira incidência podem ser atribuídas a um mesmo evento (CUMMINS et al., 1998).

b7 – Pico da corrente:

O pico de corrente de uma descarga de retorno de um raio nuvem-solo pode ser estimado a partir da medição remota do campo elétrico ou magnético gerado pelo evento. De acordo com Uman et al. (1975) o pico de corrente I_p de uma descarga de retorno, associada a um raio nuvem-solo, está relacionado com a intensidade do pico do campo elétrico E_p , medido pelo sensor, e a velocidade da descarga de retorno v através da equação 2.3 abaixo:

$$I_p = \frac{2\pi\epsilon_0 c^2 d}{v} \cdot E_p \quad (2.3)$$

onde d é a distância entre o sensor e o ponto de contato no solo da descarga, c a velocidade da luz e ϵ_0 a constante dielétrica do ar. Da mesma maneira, pode-se estimar o valor do pico da corrente a partir da componente horizontal do campo magnético.

Em alguns sistemas de detecção o valor do pico da corrente da descarga é estimado a partir do pico de intensidade do sinal denominado RNSS (“Range Normalized Signal Strength”) usando uma relação linear empírica (JERAULD et al., 2005):

$$I_p = 0,185 \cdot RNSS \quad (2.4)$$

Essa relação empírica foi encontrada apenas para raios do tipo nuvem-solo, cujo campo elétrico é orientado verticalmente. Os raios tipo intranuvem têm uma orientação qualquer, inclusive horizontal. Então, o valor do pico de corrente estimado no caso deste tipo de raio não é relevante porque a medição de campo elétrico vertical não é proporcional à amplitude da onda eletromagnética emitida (DENTEL, 2013).

2.3 Análise do campo eletromagnético radiado

Os campos eletromagnéticos associados a uma descarga atmosférica possuem características bem particulares que podem ser utilizadas para a validação de um modelo que visa representar o processo de descarregamento do canal de retorno. Faz-se necessário então o conhecimento de equações que possibilitem o cálculo destes campos a partir das correntes obtidas pelo modelo em questão.

2.3.1 Representação da corrente no canal de descarga

O impulso transitório de corrente de variação muito rápida ao longo do canal de descarga dá origem à radiação de um campo eletromagnético que se propaga a partir deste fluxo de cargas. O cálculo dos parâmetros da corrente de retorno a partir desse campo radiado requer o conhecimento da geometria do canal de descarga e o modelo do desenvolvimento no tempo e no espaço da distribuição de carga e da onda de corrente de retorno em todos os pontos do canal.

a) Modelos para representação da descarga de retorno

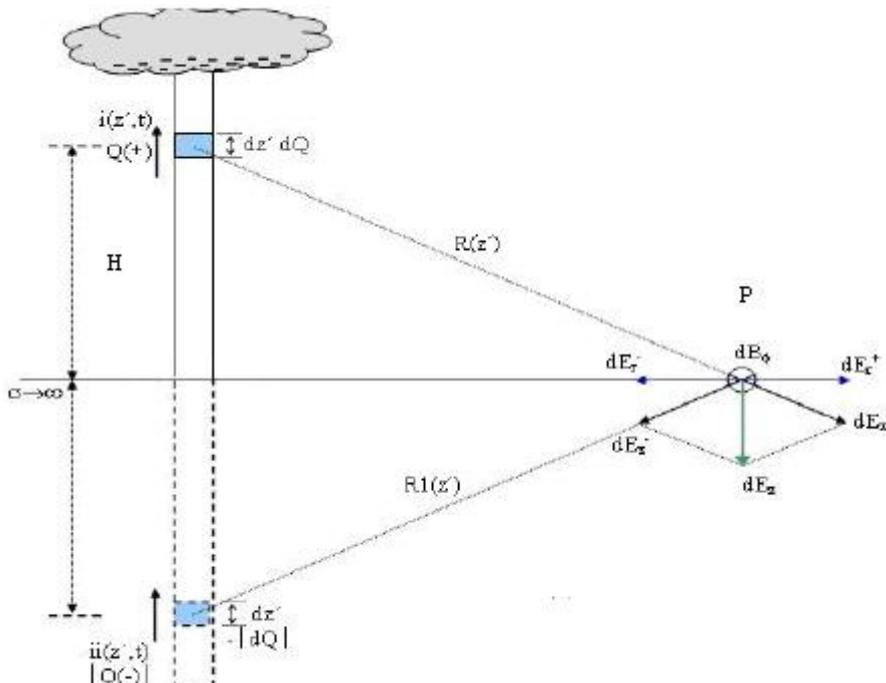
A análise do comportamento temporal e espacial da distribuição de carga e da onda de corrente de retorno, em todos os pontos do canal de descarga, é realizada através da adoção de um modelo dos chamados Modelos de Corrente de Retorno, assim definidos em Gomes e Cooray (2000, p. 82) como “[...] uma construção matemática, interpretada verbalmente, numericamente ou graficamente, que possa representar as propriedades observadas de uma corrente de retorno.”.

Por se tratar de inferência de um fenômeno extremamente complexo, a compreensão deste processo e a sua representação como modelo, requer, portanto,

que as condições de fronteira e suas simplificações sejam claramente definidas. Por isso, seguem abaixo as considerações assumidas (parâmetros geométricos) no desenvolvimento dos modelos citados (Figura 2.28):

- O campo elétrico criado pelas cargas armazenadas no canal de retorno tem uma componente vertical (E_z) e outra horizontal (E_r), e o campo indução magnética decorrente da movimentação das cargas neste canal é azimutal (B_ϕ) na superfície do solo;
- O canal é considerado verticalmente perpendicular ao nível do solo e possui uma altura H até à extremidade inferior da nuvem;
- O solo possui condutividade infinita ($\sigma \rightarrow \infty$) e é perfeitamente plano;
- O observador está localizado a uma distância horizontal r (ponto P) do ponto onde a descarga atmosférica atinge o solo;
- Em um trecho diferencial do canal, com comprimento elementar dz' a uma determinada altura z' acima do solo, um termo elementar de corrente $i(z', t)$ percorre o canal, produzindo campos elementares, dE_z , dE_r e dB_ϕ . A corrente total no canal é a integração deste termo elementar de corrente no tempo e no espaço, com limites apropriados;
- A distância entre o observador no ponto P e o trecho elementar dz' é $R(z')$.

Figura 2.28 – Parâmetros geométricos para determinação das resultantes dos campos



Fonte: Adaptado de Uman (1987).

Observa-se que devido às considerações para o solo, há formação de um canal imagem idêntico ao canal de descarga, onde também há nele o deslocamento de outro termo elementar de corrente $ii(z',t)$ distante $R1(z')$ do ponto P , produzindo os campos imagens elementares dE_{zimag} , dE_{rimag} e $dB_{\phi imag}$. Também nesta situação, ao nível do solo, as componentes horizontais do campo elétrico se anulam.

Segundo Rakov e Uman (1998), estes modelos são classificados em quatro grupos: modelos de dinâmica do gás (ou modelos físicos), modelos eletromagnéticos, modelos de circuitos distribuídos e os modelos de engenharia.

a1 – Modelos físicos ou modelos de dinâmica de gás (MDG): nesses modelos, o canal é tratado como 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 deste modelo incluem a temperatura e pressão dentro do canal e a densidade de massa como função do tempo e do estado, a partir do comportamento da corrente no canal como entrada (RAKOV, 2001).

a2 – Modelos eletromagnéticos (MEM): nesses modelos, o canal é aproximado a uma antena reta e vertical constituída por um fio fino condutor. Os resultados são encontrados com base nas soluções numéricas das equações de Maxwell para determinar a distribuição de carga elétrica e de corrente ao longo do canal de onde os campos eletromagnéticos podem ser calculados, permitindo, assim a avaliação destes em pontos distantes em relação ao canal de descarga (RAKOV, 2001).

a3 – Modelos de circuito distribuído (RLC): nesses modelos 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 (RAKOV, 2001).

a4 – Modelos de engenharia (MEN): nesses modelos a distribuição espacial e temporal da corrente ou da densidade de carga do canal é especificada a partir da corrente de descarga de retorno observada na base do canal e na velocidade de propagação ascendente da frente de onda da corrente. Possuem a importante característica que é o pequeno número de parâmetros empregados nos cálculos, além da corrente na base do canal que pode ser estimada ou medida experimentalmente (RAKOV, 2001).

Segundo Rakov (2003) e Cooray (2003) os modelos de engenharia podem ser classificados em duas categorias: modelos tipo linha de transmissão (TL) ou corrente de propagação (CP), e modelos tipo fonte de corrente viajante ou corrente gerada (CG). Os primeiros ainda são subdivididos em: modelo da linha de transmissão (MTL), modelo da linha de transmissão modificado com decaimento linear da corrente (MTLL) e modelo da linha de transmissão modificado com decaimento exponencial da corrente (MTLE), enquanto que os seguintes são subdivididos em: modelo de Bruce e Golde (MBG), modelo de fonte de corrente viajante (TCS) e modelo de Diendorfer e Uman (MDU).

Pela sua eficiência e simplicidade, os Modelos de Engenharia são aqueles de maior interesse para os sistemas de localização de descargas atmosféricas existentes, assim foram os escolhidos para as simulações de corrente ao longo do canal de descarga neste trabalho. Por isso, os mesmos serão detalhados no próximo item.

b) Aplicação dos modelos de engenharia

Nestes modelos relaciona-se a corrente $i(z',t)$ a uma determinada altura z' e tempo t à corrente na base do canal $i(0,t)$, a fim de se definir a distribuição da corrente ao longo do canal. Também se assume uma propagação ascendente da frente de onda de descarga de retorno a uma velocidade v_f , admitindo o canal uma linha de transmissão sem perdas. Além disso, todas as demais considerações por cada subtipo deste modelo buscam ajustar os campos eletromagnéticos gerados pela distribuição proposta aos resultados de campos observados experimentalmente. Ou seja, cada um tenta descrever o comportamento físico da distribuição da carga no canal, a distribuição espaço-temporal de corrente, a

distribuição de carga removida do líder pela descarga de retorno e a relação matemática entre os termos de radiação distante dos campos elétrico e magnético e a corrente na base do canal.

Ao considerar estes modelos assume-se uma série de simplificações, as quais se destacam:

- O canal é considerado reto, perpendicular ao solo e sem ramificações;
- O solo é considerado com condutividade infinita;
- A velocidade de deslocamento da frente de onda do pulso de corrente que percorre o canal de retorno é considerada constante;
- Ausência de canais ascendentes;
- São desconsideradas as reflexões da corrente no solo.

Segundo Rakov e Uman (1998) e Rakov (2001), nos modelos de engenharia a representação da distribuição espaço-temporal da corrente pode ser feita através da equação geral da propagação da corrente no canal da descarga:

$$i(z', t) = u(t - z'/v_f) \cdot P(z') \cdot i(0, t - z'/v) \quad (2.5)$$

onde u é a função de Heaviside (ou função degrau) igual a unidade para $t \geq z'/v_f$ e zero para $t < z'/v_f$.

O parâmetro $P(z')$ é um fator de atenuação da corrente dependente da altura introduzido por Rakov e Dulzon (1991), v_f é a velocidade de propagação da frente de onda da descarga de retorno (“return stroke”), ou velocidade da descarga de retorno, e v é a velocidade de propagação da onda de corrente, ou velocidade de propagação da onda.

b1 – Modelo da linha de transmissão (MTL): neste modelo, que foi desenvolvido em 1969 por Uman e McLain (1969), a onda de corrente introduzida na base do canal propaga-se para cima sem distorção e sem atenuação com velocidade constante e igual à velocidade de propagação da descarga de retorno ($v = v_f$). Característica principal deste modelo é ser a corrente a mesma em todos os pontos do canal (mas considerando o tempo de trânsito desta até este ponto), ou seja, não é considerada a remoção de cargas depositadas ao longo do canal.

Neste modelo o fator de atenuação da corrente, $P(z')$, e a função de Heaviside, u , tem valor unitário, portanto, a sua representação matemática, conforme a equação 2.5 é a seguinte:

$$i(z', t) = i(0, t - z'/v) \text{ para } z' \leq v.t$$

$$i(z', t) = 0 \text{ para } z' > v.t$$
(2.6)

b2 – Modelo da linha de transmissão modificado com decaimento linear de corrente (MTLL): modelo apresentado em 1987 por Rakov e Dulzon (1987), manteve a mesma corrente $i(z', t)$ do modelo MTL e introduziu um fator de atenuação da corrente dependente da altura $P(z') = 1 - z'/H$, onde H é constante e representa o comprimento total do canal de descarga de retorno (RAKOV, 2001; RAKOV e DULZON, 1987). Também, igual ao modelo anterior, a corrente se propaga para cima com velocidade igual à velocidade da descarga de retorno ($v = v_i$), porém, sua amplitude decresce linearmente de acordo com $P(z')$. Entretanto, esta atenuação não é devida às perdas no canal, mas por conta do efeito da remoção das cargas depositadas pelo líder (“leader”) que ocorre durante a fase correspondente à descarga de retorno (“return stroke”) (RAKOV, 2001; NUCCI et al., 1988).

Com base no exposto, a representação matemática deste modelo, conforme a equação 2.5 é descrita pela relação abaixo:

$$i(z', t) = (1 - z'/H) \cdot i(0, t - z'/v) \text{ para } z' \leq v.t$$

$$i(z', t) = 0 \text{ para } z' > v.t$$
(2.7)

Segundo Rakov (2001), neste modelo a distribuição de cargas removidas ao longo do canal (ρ_L) não é igual a zero e vale:

$$\rho_L(z', t) = \left(1 - \frac{z'}{H}\right) \cdot \frac{i(0, t - z'/v)}{v} + \frac{Q(z', t)}{H}$$
(2.8)

onde $Q(z', t) = \int_{z'/v}^t i(0, \tau - z'/v) d\tau$.

b3 – Modelo da linha de transmissão modificado com decaimento exponencial de corrente (MTLE): modelo proposto em 1988 por Nucci et al. (1988) que também considerou a remoção das cargas depositadas pelo líder, entretanto, com decaimento exponencial que ocorre durante a fase da descarga de retorno (RAKOV, 2001; NUCCI et al., 1988). Assim como no MTL a corrente se propaga para cima com velocidade igual à velocidade da descarga de retorno ($v = v_f$).

Neste modelo o fator de atenuação da corrente é dado por $P(z') = \exp(-z'/\lambda)$, onde λ é a constante de decaimento da amplitude da corrente que leva em consideração o efeito da distribuição vertical das cargas armazenadas no líder durante a descarga de retorno. E neste trabalho foi definido, através dos dados experimentais obtidos em Lin et al. (1979), que λ assume valores típicos da ordem de 2 km (NUCCI et al., 1988).

A seguir a representação matemática deste modelo, conforme equação 2.5:

$$i(z', t) = e^{(-z'/\lambda)} \cdot i(0, t - z'/v) \text{ para } z' \leq v \cdot t \quad (2.9)$$

$$i(z', t) = 0 \text{ para } z' > v \cdot t$$

E na equação 2.10 abaixo, representa-se a distribuição de cargas removidas ao longo do canal neste modelo (RAKOV, 2001):

$$\rho_L(z', t) = e^{-z'/\lambda} \cdot \frac{i(0, t - z'/v)}{v} + \frac{e^{-z'/\lambda}}{\lambda} \cdot Q(z', t) \quad (2.10)$$

onde $Q(z', t) = \int_{z'/v}^t i(0, \tau - z'/v) d\tau$.

b4 – Modelo de Bruce e Golde (MBG): modelo proposto em 1941 por Bruce e Golde (1941) foi o que originou a classe dos modelos denominados “modelos de engenharia”. Neste modelo a corrente abaixo da altura da frente de onda da descarga de retorno é equivalente à corrente na base do canal no nível do solo. Acima da frente de onda, como em todos os demais modelos, a corrente é nula. Também é exibida uma descontinuidade entre a distribuição de corrente de descarga de retorno ao longo do canal com a frente de onda da descarga de retorno

na origem, pois o modelo admite que a carga em cada altura seja removida do canal instantaneamente pela frente de onda da descarga de retorno. Porém, considerando que a distribuição da corrente com a altura é uniforme, para que isto ocorra admite-se então que a velocidade da frente de onda de corrente seja infinita ($v_f = v = \infty$), o que é fisicamente impossível.

A equação abaixo apresenta a sua representação matemática com base na equação 2.5:

$$i(z', t) = i(0, t) \text{ para } z' \leq v.t \quad (2.11)$$

$$i(z', t) = 0 \text{ para } z' > v.t$$

Neste modelo a remoção de cargas ao longo do canal pode ser determinada através da equação 2.12 a seguir (THOTTAPPILLIL et al., 1997; NUCCI et al., 1990):

$$\rho_L(z', t) = \frac{i(0, z'/v)}{v} \quad (2.12)$$

b5 – Modelo de fonte de corrente viajante (TCS): modelo proposto em 1985 por Heidler (1985), é outro modelo onde se assume a carga sendo removida instantaneamente do canal do líder pela frente de onda da descarga de retorno que está associada a uma fonte de corrente móvel que percorre toda a extensão do canal a partir do ponto de junção. Considera-se esta fonte deslocando-se para cima a uma velocidade v_f , enquanto que a corrente injetada no ponto de altura z' se propaga descendo pelo canal à velocidade da luz no vácuo ($v = -c$), ou seja, $i(z', t) = i(0, t - z'/(-c)) = i(0, t + z'/c)$. Assim, tem-se a seguinte representação matemática:

$$i(z', t) = i(0, t + z'/c) \text{ para } z' \leq v.t \quad (2.13)$$

$$i(z', t) = 0 \text{ para } z' > v.t$$

Se a velocidade da luz c for substituída por ∞ , este modelo se iguala ao modelo MBG (BRUCE; GOLDE, 1941; RAKOV, 2001). E segundo Nucci et al. (1990) a remoção de cargas ao longo do canal é obtida através da equação 2.14:

$$\rho_L(z', t) = \frac{1}{v^*} \cdot i(0, \frac{z'}{v^*}) \quad (2.14)$$

onde $v^* = 1/(1/v + 1/c)$.

b6 – Modelo de Diendorfer e Uman (MDU): proposto em 1990 por Diendorfer e Uman (1990), apresenta dois termos na sua equação matemática: o primeiro é semelhante à corrente do modelo TCS que se propaga para baixo com velocidade da luz no vácuo c , havendo descontinuidade na frente ascendente. No segundo, o componente da corrente tem polaridade oposta, cresce instantaneamente até se igualar ao valor da corrente na frente e depois decresce exponencialmente com constante de tempo τ_D (RAKOV, 2001; DIENDORFER; UMAN, 1990). Assim, temos sua representação matemática abaixo:

$$i(z', t) = i(0, t + z'/c) - i(0, z'/v^*) \text{ para } z' \leq v \cdot t \quad (2.15)$$

$$i(z', t) = 0 \text{ para } z' > v \cdot t$$

onde:

- $v^* = v/(1+v/c)$, com v e τ_D constantes;
- $P(z') = \exp[-(t-z'/v)/\tau_D]$;
- τ_D é o tempo durante o qual a carga, por unidade de comprimento, depositada em uma dada seção do canal pelo líder, se reduz a “1/e” do seu valor original, após a passagem da frente ascendente nesta seção do canal.

Se considerar $\tau_D = 0$ o modelo MDU se iguala ao modelo TCS, portanto, em ambos os modelos, a corrente que se propaga para baixo viaja a velocidade da luz no vácuo (RAKOV, 2001).

Segundo Thottappillil et al. (1997) a remoção de cargas ao longo do canal é representada pela equação 2.16 a seguir:

$$\rho_L(z', t) = -\frac{i(0, t + z'/c)}{c} - e^{-(t-z'/v)/\tau_D} \cdot \left[\frac{i(0, z'/v^*)}{v} + \frac{\tau_D}{v^*} \cdot \frac{di(0, z'/v^*)}{dt} \right] + \frac{i(0, z'/v^*)}{v^*} + \frac{\tau_D}{v^*} \cdot \frac{di(0, z'/v^*)}{dt} \quad (2.16)$$

c) Corrente na base do canal

Como visto, nos modelos de engenharia a distribuição espacial e temporal da densidade de carga do canal é especificada a partir da corrente de descarga de retorno observada na base do canal, assim é necessário definir um modelo que represente esta corrente.

Em 1941, Bruce e Gold (1941) apresentaram um modelo para calcular a corrente na base do canal, denominado como equação da dupla exponencial, e indicado na equação 2.17:

$$i(0, t) = I_0 \cdot [e^{-\alpha \cdot t} - e^{-\beta \cdot t}] \quad (2.17)$$

onde:

I_0 é a amplitude máxima da corrente na base do canal;

α , β são a constante de tempo de subida e a constante de decaimento da onda de corrente, respectivamente.

Posteriormente, em 1945, foi proposto por Norinder e Dahle (1945) um modelo para calcular a corrente na base do canal, considerando como dado de entrada valores medidos para o campo de indução magnética. E alguns anos depois, em 1969, os pesquisadores Uman e McLain (1969) aprofundaram os estudos nesta área fazendo melhorias nos modelos até então apresentados. Eles mudaram a forma original da equação de dupla exponencial (equação 2.17) considerando um fator de correção para o pico da corrente a fim de obter resultados mais confiáveis. A nova equação ficou conhecida como “aproximação da dupla exponencial”, conforme ilustra a equação 2.18 a seguir:

$$i(0, t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot [e^{-\alpha \cdot t} - e^{-\beta \cdot t}] \quad (2.18)$$

onde:

I_0 é a amplitude máxima da corrente na base do canal;

η é o fator de correção da amplitude da corrente.

E a partir desta última equação, em 1985, Heidler (1985) apresentou um novo modelo para calcular a corrente na base do canal de descarga. Esta equação, denominada de “equação de Heidler” (equação 2.19), tem como principal vantagem sobre as demais permitir os ajustes independentes da: amplitude da corrente, da derivada máxima da corrente e da carga transferida, variando I_0 , τ_1 e τ_2 , respectivamente. Com tais ajustes, pode-se aproximar o comportamento de $i(0, t)$ calculado, daqueles medidos.

$$i(0, t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{(t/\tau_1)^n}{[1 + (t/\tau_1)^n]} \cdot e^{(-t/\tau_2)} \quad (2.19)$$

sendo que:

$$\eta = \exp[-(\tau_1/\tau_2) \cdot (n \cdot \tau_2/\tau_1)^{1/n}]$$

onde:

I_0 é a amplitude máxima da corrente na base do canal (kA);

τ_1 é a constante de tempo para frente de onda (μs);

τ_2 é a constante de tempo de decaimento de onda (μs);

η é o fator de correção da amplitude da corrente;

n é o expoente que varia de 2 a 10.

A equação 2.19 normalmente é utilizada para representar a corrente na base do canal devido à primeira descarga. Para reproduzir o comportamento da corrente na base do canal, levando em consideração uma ou mais descargas de retorno subsequentes, é feito a soma de duas funções de Heidler, conforme exemplifica a equação 2.20 a seguir:

$$i(0, t) = \frac{I_{01}}{\eta_1} \cdot \frac{(t/\tau_1)^n}{[1 + (t/\tau_1)^n]} \cdot e^{(-t/\tau_2)} + \frac{I_{02}}{\eta_2} \cdot \frac{(t/\tau_3)^n}{[1 + (t/\tau_3)^n]} \cdot e^{(-t/\tau_4)} \quad (2.20)$$

sendo que:

$$\eta_1 = \exp[-(\tau_1/\tau_2) \cdot (n \cdot \tau_2/\tau_1)^{1/n}]$$

$$\eta_2 = \exp[-(\tau_3/\tau_4) \cdot (n \cdot \tau_4/\tau_3)^{1/n}]$$

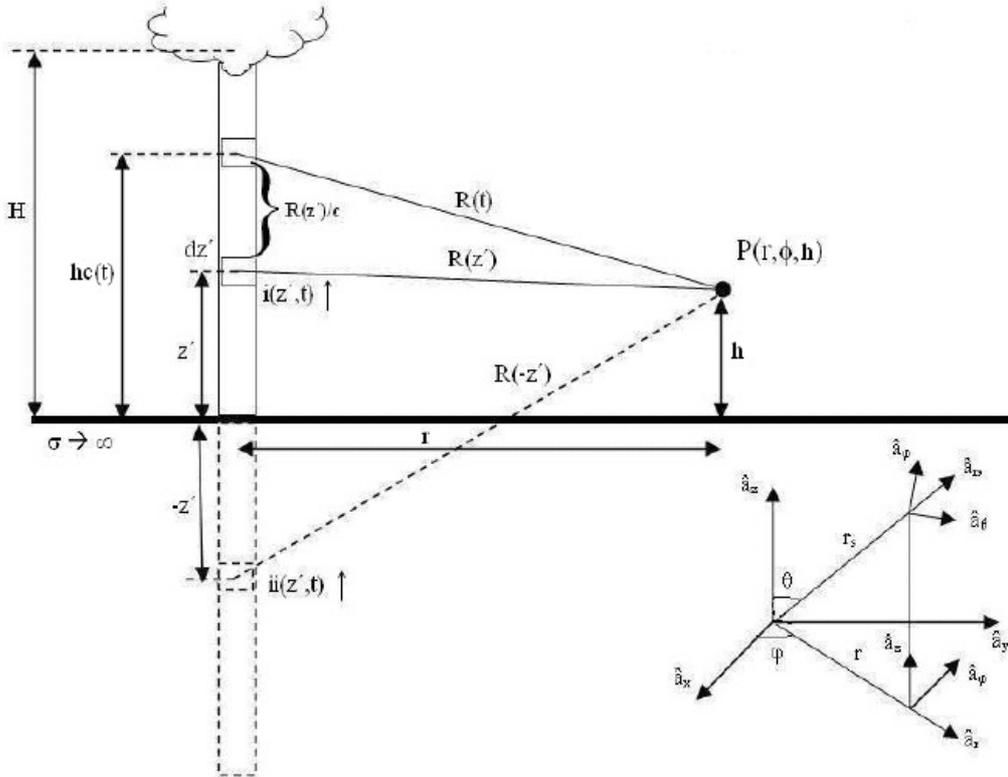
Para as necessidades deste trabalho o modelo da equação de Heidler é suficiente e será o adotado.

2.3.2 Campos eletromagnéticos originados pelas descargas

Ao considerar os modelos de engenharia para descrever a distribuição da corrente de retorno no canal de descarga, obtém-se uma formulação bastante simplificada que relaciona a corrente no canal de descarga ao seu campo elétrico e/ou magnético radiado. Assim, esses campos foram estudados por Master e Uman (1983) e posteriormente por Uman (1987) que desenvolveram uma teoria geral de radiação eletromagnética de uma antena finita, para descrever a radiação proveniente da descarga, considerando-se esta antena com orientação vertical e localizada no ponto de origem da descarga conectante. Portanto, faz-se uma aproximação com os casos reais, uma vez que os canais de descarga em geral são tortuosos e ramificados. As equações apresentadas nestes trabalhos foram derivadas das Equações de Maxwell e oferecem como resultado o comportamento dos campos eletromagnéticos radiados na direção de um determinado ponto P no espaço. Foram deduzidas no domínio do tempo e em coordenadas cilíndricas para o cálculo dos componentes vertical e horizontal do campo elétrico e da indução magnética, ambos associados à corrente contida em um elemento infinitesimal percorrendo todo o canal da descarga e considerando o solo totalmente plano e condutor perfeito.

A Figura 2.29 apresenta os parâmetros geométricos adotados para o cálculo dos campos eletromagnéticos usando as equações apresentadas em Master e Uman (1983) e Uman (1987). No canto inferior direito estão definidos os vetores unitários para sistemas de coordenadas cilíndricas e esféricas.

Figura 2.29 - Parâmetros geométricos para cálculo dos campos eletromagnéticos



Fonte: Adaptado de Uman (1987).

Abaixo a descrição dos parâmetros, onde c é a velocidade da luz no vácuo:

H é o comprimento total da descarga de retorno;

$h_c(t)$ é a posição real da frente de onda da corrente no instante t ;

dz' é um elemento infinitesimal que pode ser visto como um dipolo elétrico;

$i(z', t)$ é a corrente vista pelo observador no ponto $P(r, \phi, h)$, caminhando para cima ao longo do canal de descarga de retorno, em função da altura z' e do tempo t ;

$ii(z', t)$ é a corrente ao longo da imagem do canal de descarga;

z' é a posição em que o observador, localizado no ponto $P(r, \phi, h)$ “enxerga” a frente de onda da corrente em um determinado instante t ;

r é a distância horizontal entre o ponto de incidência da descarga até o ponto P ;

h é a altura do ponto P em relação ao solo;

$P(r, \phi, h)$ é a localização do ponto P em coordenadas cilíndricas;

$R(z')$ é a distância do ponto P até a localização do dipolo elétrico dz' ;

$R(z')/c$ é o atraso entre a posição real da frente de onda da corrente e a posição da frente de onda da corrente “vista” pelo observador localizado no ponto P .

As equações 2.21, 2.22 e 2.23 representam, respectivamente, as expressões no domínio do tempo e em coordenadas cilíndricas, para o cálculo do campo elétrico vertical, elétrico horizontal e campo de indução magnética radiados na direção do ponto P :

$$dE_z(r, \phi, h, t) = \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left[\frac{2 \cdot (h - z')^2 - r^2}{R(z')^5} \cdot \int_0^t i(z', t - R(z')/c) d\tau + \frac{2 \cdot (h - z')^2 - r^2}{c \cdot R(z')^4} \cdot i(z', t - R(z')/c) - \frac{r^2}{c^2 \cdot R(z')^3} \cdot \frac{\partial i(z', t - R(z')/c)}{\partial t} \right] \quad (2.21)$$

$$dE_r(r, \phi, h, t) = \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left[\frac{3 \cdot r \cdot (h - z')}{R(z')^5} \cdot \int_0^t i(z', t - R(z')/c) d\tau + \frac{3 \cdot r \cdot (h - z')}{c \cdot R(z')^4} \cdot i(z', t - R(z')/c) + \frac{r \cdot (h - z')}{c^2 \cdot R(z')^3} \cdot \frac{\partial i(z', t - R(z')/c)}{\partial t} \right] \quad (2.22)$$

$$dB_\phi(r, \phi, h, t) = \frac{\mu_0 dz'}{4\pi} \cdot \left[\frac{r}{R(z')^3} \cdot i(z', t - R(z')/c) + \frac{r}{c \cdot R(z')^2} \cdot \frac{\partial i(z', t - R(z')/c)}{\partial t} \right] a_\phi \quad (2.23)$$

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);

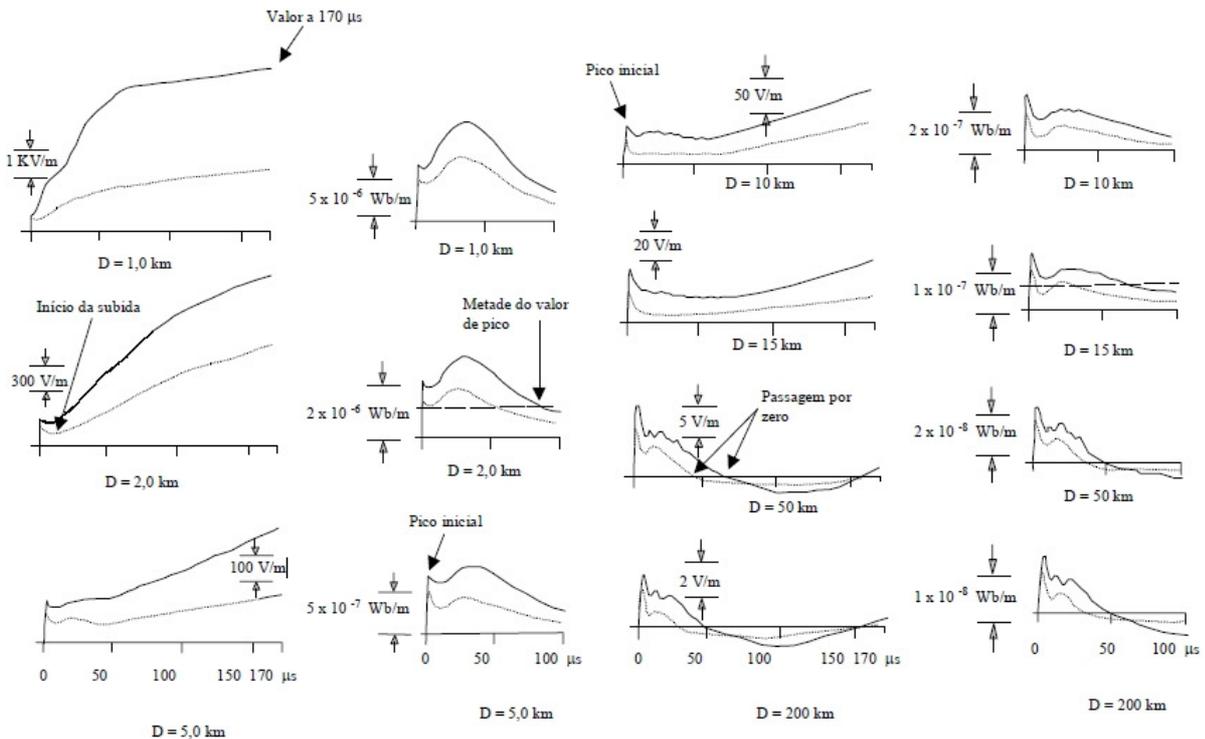
$i(z', t - R(z')/c)$ é a distribuição da corrente ao longo do canal, levando em conta o tempo de atraso em que a primeira onda eletromagnética leva para chegar ao ponto P .

Da análise das equações 2.21 e 2.22 do campo elétrico distinguem-se três componentes: a primeira parcela se refere ao campo próximo que está relacionado à carga elétrica (componente eletrostático); a parcela intermediária refere-se ao campo induzido devido à variação da carga no tempo, ou seja, à corrente (componente indução); e a última parcela se refere ao campo distante que está relacionado à variação da corrente no tempo (componente radiação). Já para a equação 2.23 do campo magnético, por não haver carga há somente as componentes indução e radiação. Para ambas observa-se que o decaimento dos componentes eletrostático e indução com o aumento da distância é muito superior àquele do componente radiação.

2.3.3 Padrões de comportamento dos campos distantes

O pesquisador Lin e coautores fizeram várias medições para o campo elétrico vertical e para a indução magnética apresentados em Lin et al. (1979). Neste trabalho as medidas foram referentes à primeira corrente de retorno e às correntes subsequentes nas distâncias de 1, 2, 5, 10, 15, 50 e 200 km, cujos resultados estão ilustrados na Figura 2.30 abaixo:

Figura 2.30 – Formas de onda de campo elétrico vertical e densidade de fluxo magnético horizontal



Fonte: Lin et al. (1979).

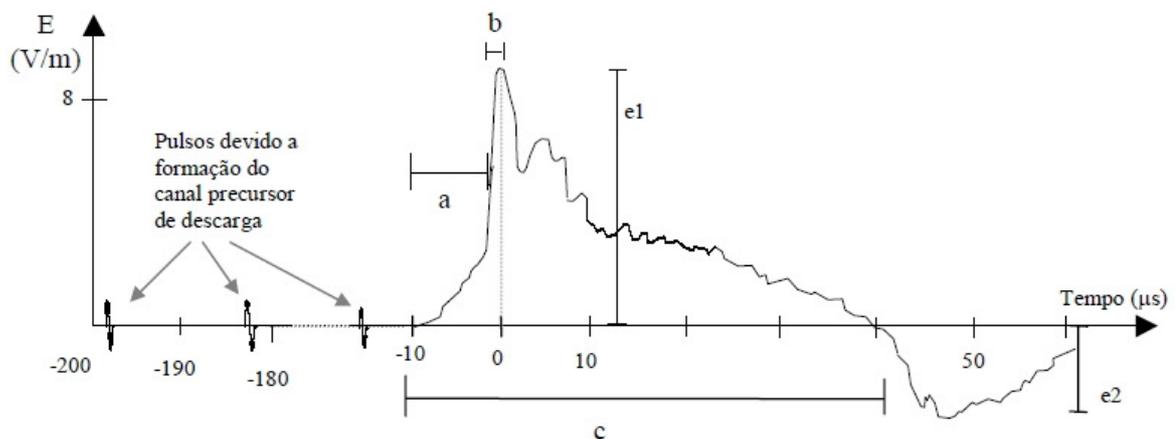
Para pequenas distâncias (1 a 15 km) as formas de onda do campo elétrico são bem distintas das formas de onda da indução magnética nas respectivas distâncias. Tais diferenças são acentuadas principalmente na “cauda” da onda, onde os efeitos de campos próximo e induzido podem ser visualizados. É significativo o efeito do campo próximo (devido à carga elétrica) na forma de onda do campo elétrico. Tal efeito pode ser notado comparando as formas de onda do campo elétrico e indução magnética, visto que apenas a primeira recebe a contribuição do campo próximo (eletrostático).

Para distâncias maiores (50 e principalmente 200 km) as formas de onda se assemelham bastante, inclusive o instante de passagem por zero. Isto se explica pelo fato de que nestas distâncias a única parcela significativa é a parcela radiada. Assim, pode-se dizer que o campo eletromagnético gerado por uma descarga adquire padrões relativamente definidos, consoante o tipo de raio, quando são consideradas distâncias elevadas em relação à extensão do canal de descarga (MESQUITA, 2006).

a) Descarga nuvem-solo negativa

Segundo Mesquita (2001) para distâncias da ordem de 20 km, ou superiores, quando apenas a componente radiada é significativa, a forma do campo eletromagnético originado por correntes de retorno nuvem-solo negativas apresenta um comportamento usualmente bipolar, como ilustrado na Figura 2.31:

Figura 2.31 – Forma de onda típica de campo elétrico originado a partir de descarga nuvem-solo negativa



Fonte: Mesquita (2001).

Normalmente verifica-se uma inversão na polaridade do campo a cerca de dezenas de microssegundos do pico inicial (e1). Medições em solo tendem a registrar um pico invertido (e2) em geral inferior ao pico inicial. Em Uman et al. (1975) foram feitas simulações dos campos E e B gerados por uma determinada onda de corrente, segundo o modelo TL, a longas distâncias (100 km) e verificou-se uma passagem por zero justamente no instante $50 \mu\text{s}$ em que a onda da corrente, que se propaga a uma velocidade de $0,8 \times 10^8 \text{ m/s}$ 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. Este efeito foi denominado pelo autor como “imagem espelho” e foi utilizado para sustentar o modelo teórico de corrente de retorno.

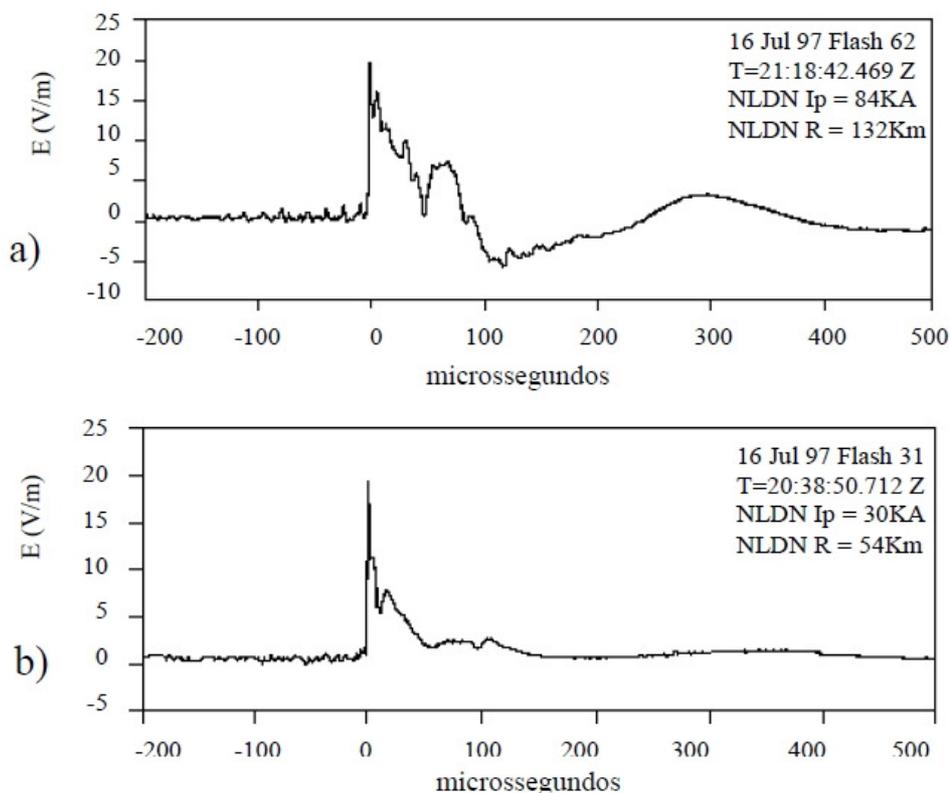
A frente de onda é usualmente caracterizada por uma transição mais lenta, que alcança a metade do pico em um período típico de 2 a 8 microssegundos (trecho a da Figura 2.31), seguido por uma rápida transição (trecho b) até o pico do campo. O tempo médio de variação entre 10% a 90% do valor do pico é cerca de 90 ns (KRIDER, 1986; UMAN, 1984). A duração típica do pulso devido à corrente de retorno (trecho c) é da ordem de algumas dezenas de microssegundos, geralmente entre 30 e 90 μs (RAKOV, 1999).

Já para distâncias reduzidas, inferiores a 20 km, os campos observados apresentam um comportamento unipolar devido à predominância da componente eletrostática sobre a radiada, como observado na Figura 2.30. O pico inicial devido à corrente de retorno negativa apresenta polaridade positiva.

A Figura 2.32 mostra exemplos de formas de onda de campos elétricos radiados e medidos pela rede NLDN em julho 1997. Nela estão indicadas as correntes de pico e as distâncias estimadas ao evento. Na figura (a) é possível visualizar os pulsos que antecedem a primeira corrente de retorno. Já na figura (b) os pulsos que antecedem a corrente de retorno subsequente não podem ser visualizados facilmente.

Geralmente os campos associados às correntes subsequentes apresentam tempo de frente e de duração do pulso inferiores aos tempos relativos à primeira corrente de retorno (MESQUITA, 2006).

Figura 2.32 – Exemplos de forma de onda de campos elétricos devido à descarga nuvem-solo negativa



Fonte: Adaptado de Rakov (1999).

Notas: ¹(a) Primeira corrente de retorno; (b) corrente de retorno subsequente.

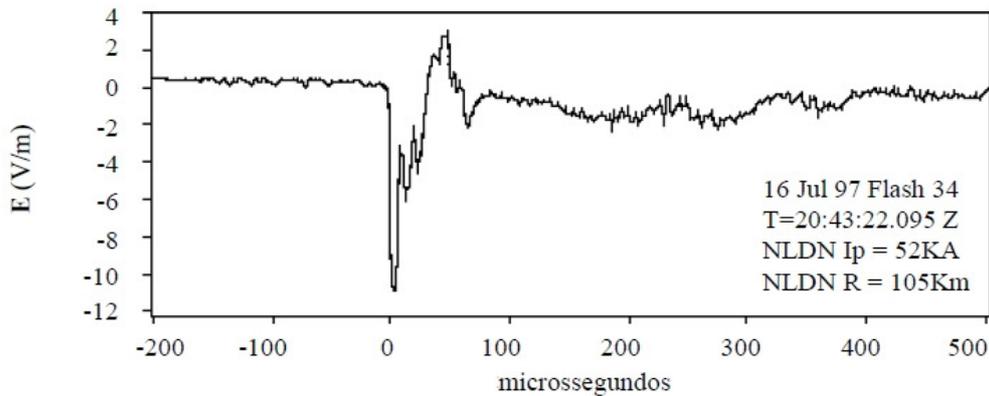
²Formas de onda medidas pela rede NLDN e não se referem ao mesmo “flash”.

b) Descarga nuvem-solo positiva

As formas de onda de campo elétrico originadas por descargas positivas são similares às originadas por descargas negativas, exceto por sua polaridade inicial, que é negativa (RAKOV, 1999). A Figura 2.33 mostra um exemplo de uma forma de onda do campo elétrico originada por uma corrente de retorno positiva detectada na rede NLDN em julho 1997, onde é possível verificar a relativa similaridade com as formas de onda apresentadas na Figura 2.32.

Apesar da similaridade quanto à forma de onda do campo observado para as descargas positivas e negativas, usualmente a intensidade e o tempo de frente de onda da forma do sinal associado à descarga positiva são maiores que aqueles correspondentes às correntes de retorno de descargas negativas. Além disso, geralmente as descargas positivas contêm uma única descarga de retorno (MESQUITA, 2006).

Figura 2.33 - Exemplo de forma de onda de campo elétrico devido à descarga nuvem-solo positiva

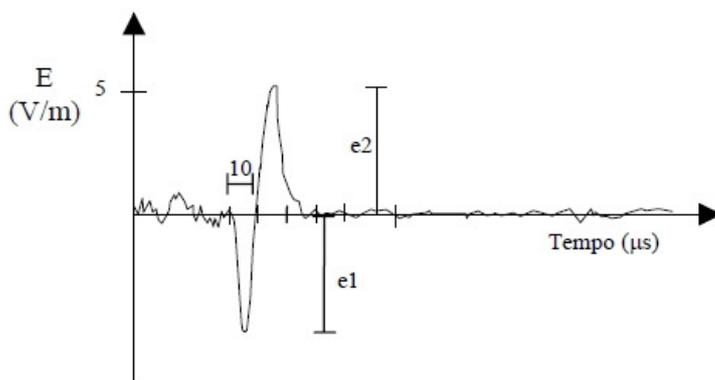


Fonte: Adaptado de Rakov (1999).

c) Descarga intranuvem

As descargas intranuvens apresentam uma forma de onda de campo radiado tipicamente bipolar (Figura 2.34) em que o pico inicial observado apresenta, com maior frequência, a mesma polaridade daquele gerado pela descarga positiva. Este comportamento justifica em parte a dificuldade de distinção da descarga intranuvem em relação às descargas nuvem-solo positivas (UMAN, 1984).

Figura 2.34 - Forma de onda típica de campo elétrico originado a partir de descarga intranuvem



Fonte: Mesquita (2001).

A relação dos picos de polaridades invertidas ($e2/e1$) tem sido utilizada como critério de discriminação entre as descargas bipolares originadas por descargas de nuvem e descargas nuvem-solo. Na descarga intranuvem o pico invertido apresenta amplitude comparável ao pico inicial, enquanto nas descargas nuvem-solo o pico invertido mostra-se relativamente menor que o pico inicial (Figuras 2.32 e 2.33). O

tempo de decaimento do pulso (tempo decorrido entre o instante de pico e o liminar inferior de sensibilização) associado à descarga intranuvem é usualmente menor daquele associado à descarga nuvem-solo.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo é descrita a metodologia adotada para o desenvolvimento de uma ferramenta computacional a fim de verificar a influência das características locais na detecção por LLS, operando na faixa LF, de ondas eletromagnéticas originadas por descargas atmosféricas nuvem-solo negativas.

O método foi utilizado para simular a propagação de ondas eletromagnéticas através do programa MATLAB®, utilizando como modelo de corrente de retorno no canal de descarga o Modelo da Linha de Transmissão (MTL).

Adotou-se um sistema de detecção indireta de descargas atmosféricas composto por quatro sensores. Inicialmente considerou-se um meio ideal sem perdas e com base em um trabalho de referência, utilizado para validação do experimento. Em seguida levaram-se em consideração as variações dos parâmetros: velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio, intensidade do pico da corrente na base do canal e velocidade de propagação da frente de onda da corrente ao longo do canal, visando mensurar a influência dessas mudanças no sistema de detecção.

3.1 Contextualização

Sensores utilizados em sistemas indiretos de detecção e localização de descargas atmosféricas apresentam erros em suas indicações que resultam das aproximações dos modelos adotados para o cômputo da descarga e da influência de fatores de natureza física (como as características do solo e do relevo) sobre o pulso eletromagnético radiado pela descarga em seu caminho de propagação até as estações de detecção. O fabricante adota certos procedimentos para calibração do sistema que objetivam reduzir os erros de suas indicações, entretanto, eles são baseados em redundâncias e experiências realizadas com o sistema em regiões particulares. Isto limita a eficácia desses procedimentos para aplicação generalizada aos sistemas dispostos nas diferentes partes do planeta (MESQUITA, 2006).

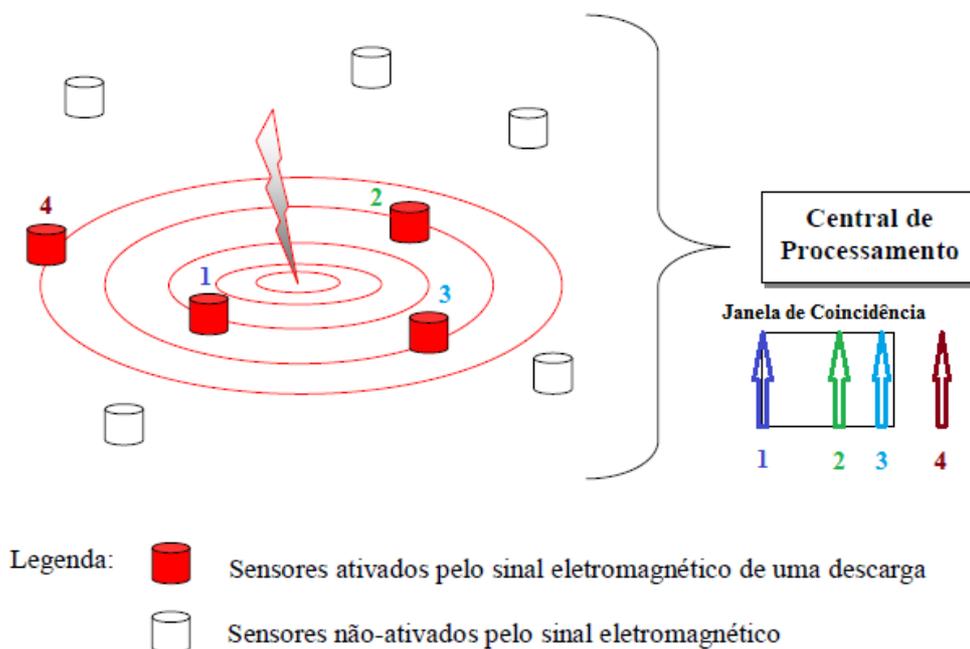
3.2 Parâmetro janela de coincidência

Nos sistemas LLS define-se uma janela de tempo, denominada “janela de coincidência”, utilizada para correlacionar os dados dos sensores referentes a uma

possível localização da descarga. Em outras palavras, esse tempo corresponde ao atraso sofrido pelo sinal ao ser detectado por dois sensores muito distantes um do outro e permite ao sistema determinar quais mensagens dos sensores correspondem a uma mesma descarga. Uma onda eletromagnética, devido ao fato de se propagar com uma velocidade finita (próxima à velocidade da luz), irá atingir sensores muito distantes entre si em tempos diferentes. Essa diferença constitui a “janela de coincidência” e é calculada com base na velocidade da luz e na maior distância em linha reta entre dois sensores da rede. Com base neste tempo, o sistema desconta os eventuais atrasos de propagação devido às diferentes distâncias dos sensores e determina quais sensores detectaram a descarga (GAI, 1999). A Figura 3.1 ilustra o princípio do conceito deste parâmetro, configurado na central de processamento do sistema.

Neste trabalho a janela de tempo de um evento de raio será utilizada para medir a influência das características locais no LLS simulado.

Figura 3.1 – Parâmetro janela de coincidência



Fonte: Adaptado de Sá (2011).

Notas: Não correlação da detecção no sensor 4 pela janela de coincidência configurada.

3.3 Validação dos modelos de engenharia

Para analisar o impacto da escolha de um modelo de engenharia no comportamento dos campos eletromagnéticos radiados, considerando diferentes

distâncias entre o ponto de incidência da descarga e o ponto de cálculo dos campos, pode-se adotar a metodologia de utilizar como parâmetro de entrada uma forma de onda padrão para a corrente na base do canal e um valor para a velocidade de propagação da corrente ao longo do canal e, assim, comparar o comportamento dos campos calculados com aqueles medidos (RAKOV, 2001).

Este método foi adotado em Nucci et al. (1990), em Rakov e Dulzon (1991) e em Thottappillil, Rakov e Uman (1997) para análise dos modelos MTL, MTLE, MBG e TCS através da comparação dos campos calculados com as medições feitas em Lin et al. (1979) para o campo elétrico vertical e para indução magnética.

No cálculo dos campos o canal de descarga foi geralmente assumido como sendo reto e vertical, com origem no solo, ou seja, condições que mais se aproximam das descargas subsequentes.

Os resultados alcançados em Nucci et al. (1990) serão os adotados como referência para validação deste trabalho. Nele os pesquisadores assumiram a mesma corrente na base do canal para todos os modelos e calcularam a distribuição espaço-temporal da corrente ao longo do canal. Em seguida, calcularam o campo elétrico vertical e indução magnética através das equações em Master e Uman (1983), considerando o ponto observado ao nível do solo nas distâncias de 50 m, 5 km e 100 km.

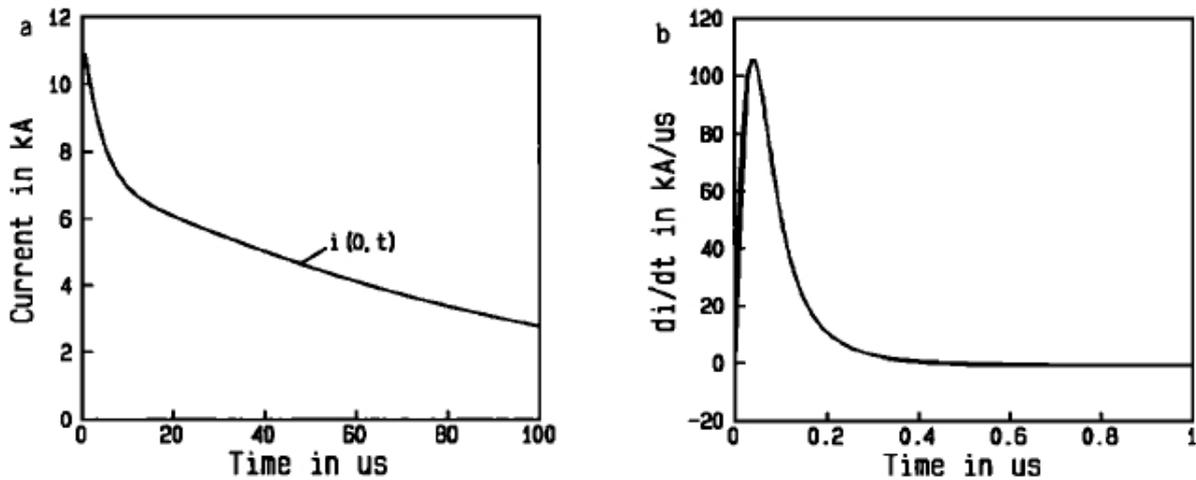
Em Nucci et al. (1990) o modelo adotado para simular a corrente na base do canal foi baseado na equação de Heidler e considera a soma de duas funções do tipo:

$$i(0, t) = \frac{I_{01}}{\eta_1} \cdot \frac{(t/\tau_1)^n}{[1+(t/\tau_1)^n]} \cdot e^{(-t/\tau_2)} + I_{02} \cdot (e^{-t/\tau_3} - e^{-t/\tau_4}) \quad (3.1)$$

onde admitiram-se os seguintes valores: $I_{01} = 9,9$ kA, $I_{02} = 7,5$ kA, $v = 1,3 \times 10^8$ m/s, $\tau_1 = 0,072$ μ s, $\tau_2 = 5,0$ μ s, $\tau_3 = 100,0$ μ s, $\tau_4 = 6,0$ μ s, $\eta = 0,845$ e $n = 2$.

Na Figura 3.2 está mostrado a forma de onda da corrente na base do canal e de sua derivada obtidos por esses pesquisadores com os valores citados, e a Figura 3.3, o comportamento de $i(z', t)$ ao longo do canal para o Modelo da Linha de Transmissão:

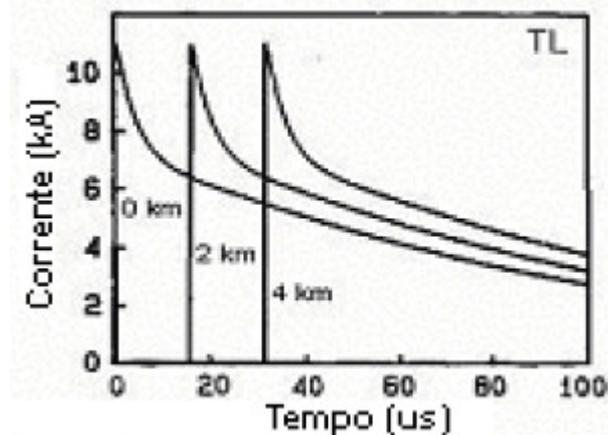
Figura 3.2 – Corrente na base do canal e sua derivada do experimento de Nucci et al.



Fonte: Nucci et al. (1990).

Notas: (a) Corrente na base do canal de retorno; (b) derivada desta corrente.

Figura 3.3 – Corrente ao longo do canal para o modelo MTL do experimento de Nucci et al.



Fonte: Adaptado de Nucci et al. (1990).

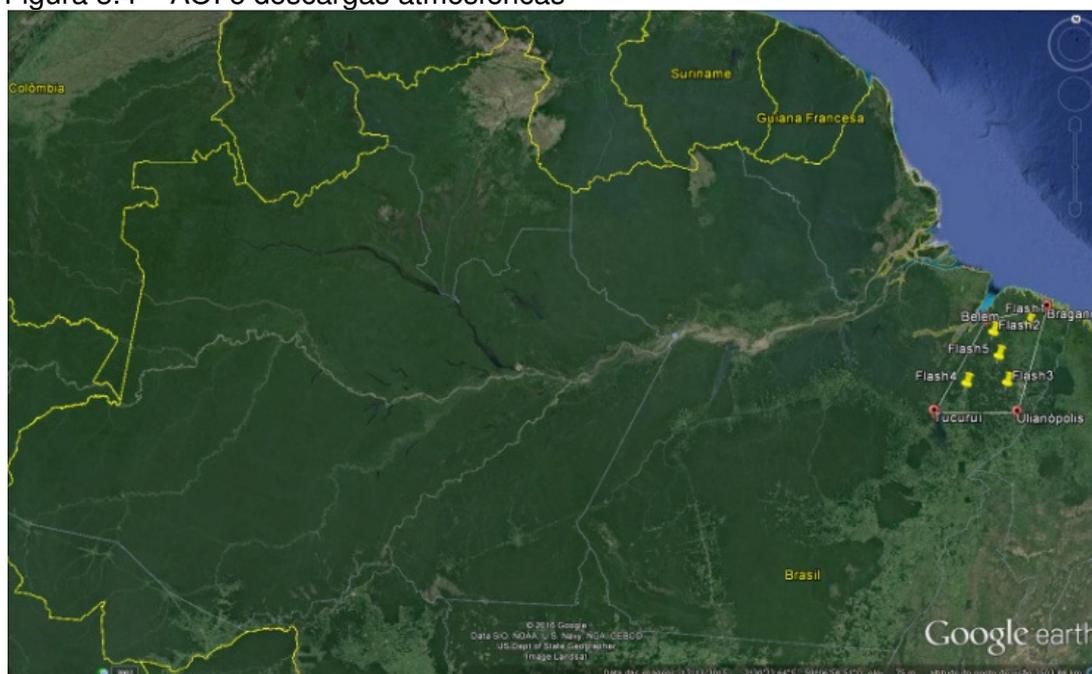
Notas: Forma de onda da corrente em três posições ao longo do canal (0 km, 2 km e 4 km) para $v=1,3 \times 10^8$ m/s.

3.4 Simulação

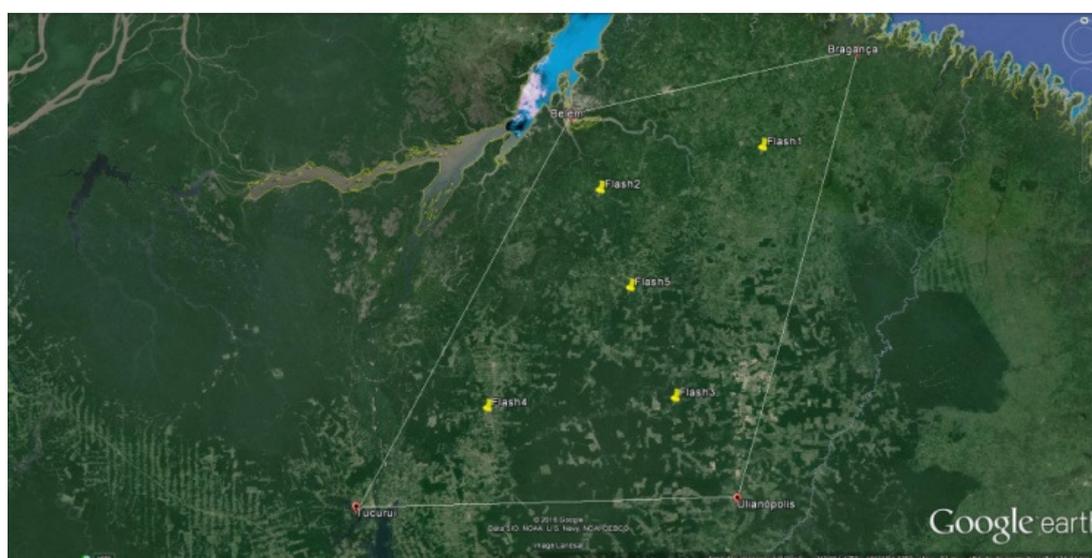
Métodos numéricos foram utilizados para simular a propagação de ondas eletromagnéticas na Amazônia oriental brasileira. Uma área de interesse (AOI) foi definida entre as cidades de Belém (-1.4087/-48.4627), Bragança (-0,9771/-46.6078), Ulianópolis (-3.7996/-47.5099) e Tucuruí (-3.7608/-49.6613) (Figura 3.4) onde se pode relacionar a localização de um ponto com as coordenadas geográficas (Lat/Long) (Datum WGS84). Posteriormente, de forma arbitrária, foram selecionados cinco pontos nesta AOI: Flash1 (-1,6785/-47,3667), Flash2 (-1,9363/-48,3316), Flash3 (-3,1801/-47,8868), Flash4 (-3,2388/-49,0017) e Flash5 (-2,5198/-48,1532)

onde o modelo MTL foi utilizado, em cada ponto, para representar a corrente de retorno da descarga atmosférica. Em seguida, os efeitos desses eventos foram simulados nos sensores localizados nestas cidades, admitindo-se todos rigorosamente sincronizados pelo sistema GPS.

Figura 3.4 – AOI e descargas atmosféricas



(a)



(b)

Fonte: do autor.

Notas: (a) Visão geral; (b) detalhe.

Também foi considerada nas simulações a técnica de localização de descargas do tipo TOA, pela detecção do campo elétrico vertical (E_z) da onda eletromagnética originada na descarga e incidente em antenas monopolo vertical. Este tipo de

antena é indicada para a captação de sinais em baixas frequências (LF) devido ao modo de propagação, exatamente onde há a maior concentração de energia no sinal oriundo das descargas atmosféricas nuvem-solo. Na Tabela 3.1 abaixo se tem as distâncias entre as localizações dos sensores, e na Tabela 3.2 a distância entre os eventos simulados e os sensores nas cidades citadas, ambas em metros:

Tabela 3.1 - Distância entre as localizações dos sensores (m)

	Trecho	Distância
1	Belém - Bragança	211.916
2	Belém - Ulianópolis	284.730
3	Belém - Tucuruí	292.120
4	Bragança - Ulianópolis	327.753
5	Bragança - Tucuruí	457.733
6	Ulianópolis - Tucuruí	239.003

Fonte: do autor.

Tabela 3.2 - Distância entre os sensores e os eventos (m)

	Belém	Bragança	Ulianópolis	Tucuruí
Flash1	125.541	114.643	253.082	343.950
Flash2	60.137	219.118	225.433	250.231
Flash3	206.054	281.983	80.305	207.472
Flash4	211.039	364.984	177.064	93.316
Flash5	127.592	242.094	158.588	216.770

Fonte: do autor.

Os trechos 4 e 5 da primeira tabela não atenderam às recomendações do fabricante de distâncias até 320 km entre sensores, para LLS que operam na faixa de LF, utilizando tecnologia TOA (GAI, 1998). Com o último não atendendo também ao requisito de distância para detecção com boa seletividade de sinal para propagações nesta faixa, como visto no item 2.2.1.b deste trabalho (distância máxima de 400 km entre dois sensores). Tudo isto para refletir, no ambiente simulado, as dificuldades práticas de encontrar bons sítios para a instalação dos sensores.

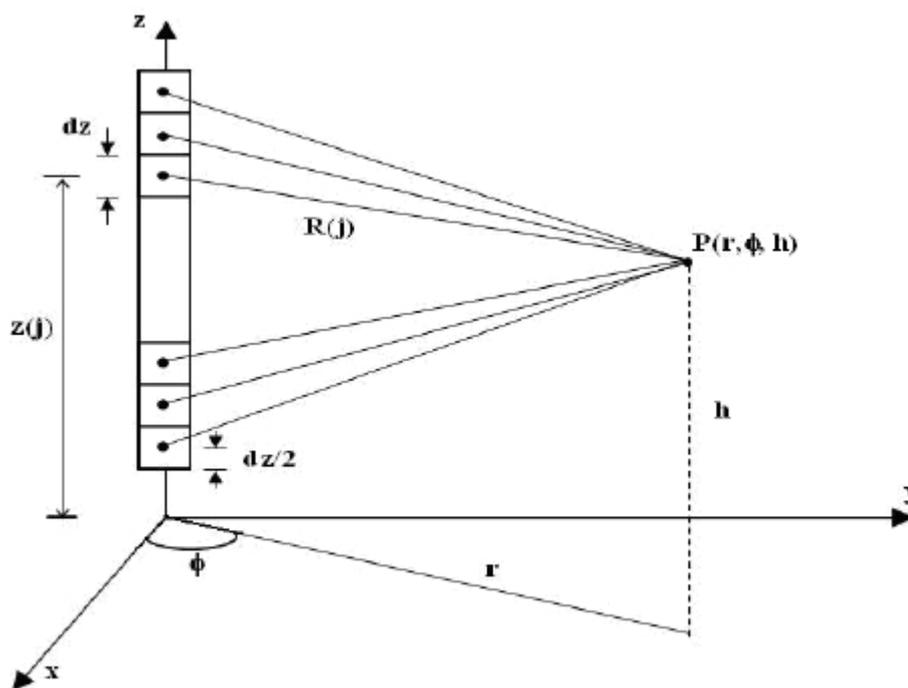
3.4.1 Implementação computacional

Tendo como referência a Figura 2.29, a corrente $i(z',t)$ associada a cada elemento infinitesimal dz' no canal de descarga de retorno viaja para cima a uma velocidade v desde a base do canal até a altura z' admitindo valores nulos de corrente para alturas acima da posição de z' .

Em coordenadas cilíndricas, a expressão para o cálculo do campo elétrico vertical foi dada pela equação 2.21. Para que a equação do campo seja usada computacionalmente se faz necessário colocarem em modo discreto os termos presentes nas equações em função do tempo e do espaço.

Na Figura 3.5 o canal de descarga de retorno foi dividido em vários elementos infinitesimais de comprimento dz (m), nos quais a corrente $i(z',t)$ associada a cada elemento infinitesimal é considerada uniformemente distribuída.

Figura 3.5 – Parâmetros geométricos usados na técnica de simulação do campo E_z



Fonte: adaptado de Wang e Song (2005).

Com relação a esta figura, o índice j indexa os valores de $z(j)$ e $R(j)$ ao longo do canal. Portanto, a distribuição da corrente ao longo do canal pode ser determinada pelo somatório dos valores das correntes associadas a cada elemento dz ao longo do canal, para $z(j)$ variando da base ao topo do canal. O campo total radiado no

ponto $P(r, \phi, h)$ é obtido pela distribuição da corrente ao longo do canal, levando em conta o atraso $R(j)/c$ (ROMERO, 2007).

Para representar a corrente na base do canal de descarga no MATLAB® foi implementado, através do recurso de função deste programa, a equação 2.21 com os mesmos valores assumidos no experimento de Nucci et al. (1990). Valores esses que também foram utilizados para programar o modelo MTL, também pelo recurso de função, através da expressão na equação 2.6, calculando a corrente ao longo do canal $i(j, k) = i(0, t - z(j)/v - R(j)/c)$ para $z(j) \leq v \cdot t$ e zero para $z(j) > v \cdot t$, onde v é a velocidade da corrente no canal, c a velocidade de propagação da luz no vácuo e k indexa os valores de t .

Para determinação da derivada da corrente em relação ao tempo presente no componente de radiação da equação 2.21, utilizaram-se as técnicas de diferenciação numérica, as quais estimam a derivada de uma função $f(x_n)$ em um ponto x_n através da aproximação da inclinação da reta tangente à curva nesse ponto, usando valores que a função assume em pontos perto de x_n . Essa aproximação pode ser feita através de três fórmulas, são elas (GILAT e SUBRAMANIAM, 2008):

- Fórmula da diferença regressiva ou “backward difference”;
- Fórmula da diferença progressiva ou “forward difference”;
- Fórmula da diferença central ou “central difference”.

Na elaboração da ferramenta computacional para cálculo dos campos, adotou-se a fórmula “forward difference” para o primeiro ponto, a fórmula “central difference” para o segundo até o penúltimo ponto e a fórmula “backward difference” para o último ponto (a fórmula da diferença central reduz o erro de aproximação).

Utilizando estas técnicas para calcular a derivada da corrente em relação ao tempo presente na equação do campo, foi definida uma função (*DEV*) para as três situações:

$$\begin{aligned}
 DEV(j, k) &= \frac{i(j, k+1) - i(j, k)}{dt} \text{ para o primeiro ponto;} \\
 DEV(j, k) &= \frac{i(j, k+1) - i(j, k-1)}{2dt} \text{ para o segundo até penúltimo ponto;} \\
 DEV(j, k) &= \frac{i(j, k) - i(j, k-1)}{dt} \text{ para o último ponto.}
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

onde k indexa os índices do vetor do tempo e j indexa os índices de segmentos $z(j)$ do canal.

A integral da corrente presente no componente eletrostático das equações do campo elétrico foi determinada usando a regra dos trapézios (GILAT e SUBRAMANIAM, 2008). A expressão geral da regra do trapézio é dada por:

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{\Delta x}{2} \cdot \sum_{i=1}^N f(x_{i+1}) + f(x_i) \quad (3.3)$$

onde a e b são, respectivamente, os intervalos inferior e superior de integração da função $f(x)$, $\Delta x = (b - a)/N$ e N corresponde ao número de subintervalos em que a curva da função é dividida entre o intervalo a e b .

Usando a ferramenta computacional a regra do trapézio foi implementada para calcular a integral da corrente presente na equação de campo. No MATLAB®, essa regra pode ser aplicada através da função pré-definida *trapz*. Tal função é definida como $Z = \text{trapz}(N, Y)$, onde Z apresenta uma aproximação da integral Y usando a regra do trapézio. Portanto, a integral da corrente foi definida computacionalmente como uma função (*INT*):

$$INT(j, k) = \text{trapz}(n, i(j, 1:k)) \quad (3.4)$$

onde $n = 0 : dt : t(k)$.

Substituindo (3.2) e (3.4) em (2.21) obtém-se:

$$dE_z = \frac{dz}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \left[\frac{2 \cdot (h - z(j))^2 - r^2}{R(j)^5} \cdot INT(j, k) + \frac{2 \cdot (h - z(j))^2 - r^2}{c \cdot R(j)^4} \cdot i(j, k) - \frac{r^2}{c^2 \cdot R(j)^3} \cdot DEV(j, k) \right] \quad (3.5)$$

onde $z(j)$ corresponde à posição em que a frente de onda da corrente $i(j, k)$ em um determinado instante t se encontra ao longo do canal “visto” pelo observador localizado no ponto P . Computacionalmente $z(j)$ é um vetor e percorre o canal da

descarga desde $z/2$ até H com passo dz , ou seja, $z(j) = dz/2 : dz : H$, onde H é a altura do canal, vide Figura 2.29.

Somando todas as contribuições da componente vertical do campo elétrico $dE_z(j,k)$ radiadas no ponto $P(r,\phi,h)$ devidas à corrente contida em cada elemento infinitesimal dz ao longo do canal, obtém-se o campo radiado no ponto de observação. Porém, para se levar em conta o efeito do solo, aplica-se o mesmo procedimento para a imagem do canal substituindo $R(j)$ por $R_1(j)$, onde $R_1(j) = \sqrt{r^2 + (z(j) + h)^2}$ e $z(j)$ por $-z(j)$ na equação 3.5. Assim, se $dz = 1$ m:

$$E_z = \sum_{j=1}^H dE_z(j, k) + \sum_{j=1}^H dE_{z_{imagem}}(j, k) \quad (3.6)$$

onde E_z é a resultante total do campo elétrico vertical no ponto P para todos os elementos infinitesimais do canal de descarga e de sua imagem no solo.

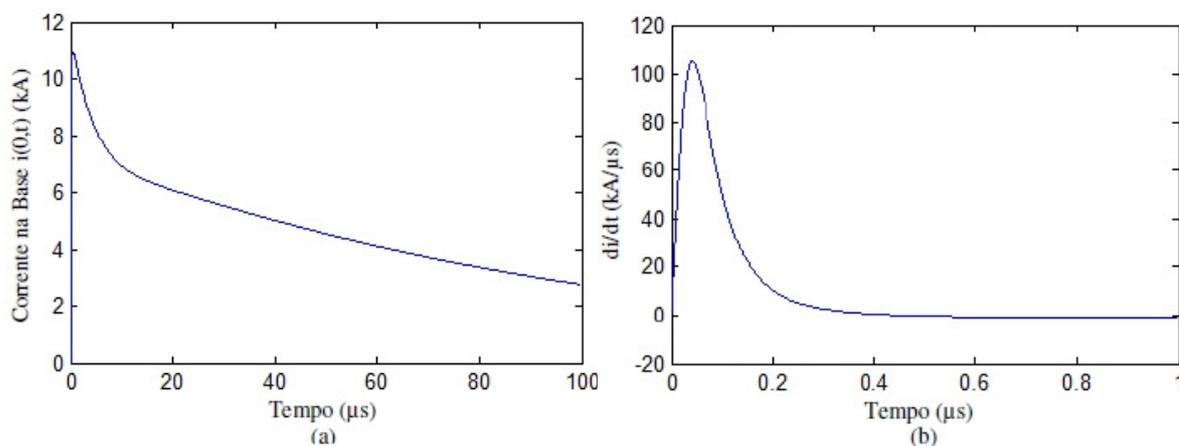
3.4.2 Validação do procedimento de cálculo do campo

Aqui são apresentadas as referências utilizadas para validação do procedimento adotado neste trabalho para cálculo do campo elétrico. São realizadas comparações entre os resultados obtidos com o procedimento de cálculo e os resultados da referência adotada para validação.

Adotou-se como referência para validar o procedimento de cálculo do campo E_z o trabalho em Nucci et al. (1990), considerando nas simulações os mesmos parâmetros e situações da referência. Neste trabalho a corrente na base do canal $i(0,t)$ foi calculada através da expressão apresentada na equação 3.1, a qual considera a soma de duas funções e representa, com boa exatidão, a forma de onda das descargas de retorno subsequentes medidas em Berger et al. (1975).

Na Figura 3.6, têm-se o comportamento de $i(0,t)$ e sua respectiva derivada em relação ao tempo. A corrente na base do canal tem amplitude próxima de 11 kA e derivada máxima igual a 105 kA/ μ s, valores de amplitude considerados representativos de correntes de descargas de retorno subsequentes típicas, conforme experimentos realizados com descargas provocadas por foguetes (LETEINTURIER et al., 1990).

Figura 3.6 – Corrente na base do canal usada para cálculo do E_z

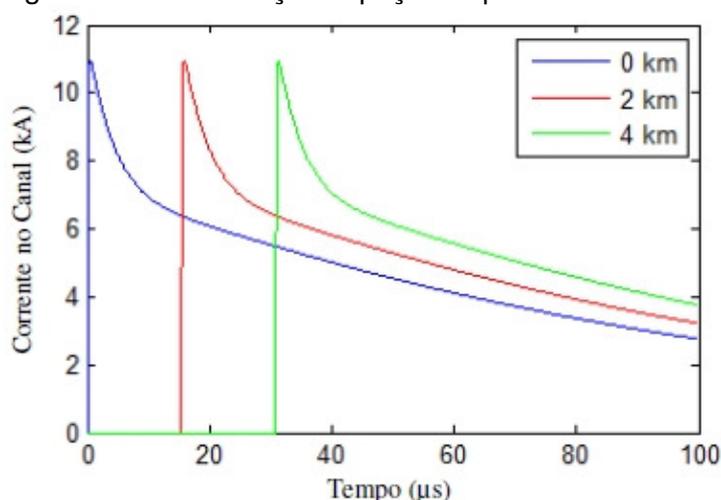


Fonte: Shinkai et al. (2016).

Notas: (a) Forma de onda da corrente; (b) derivada da corrente.

Para representar a distribuição espaço-temporal da corrente ao longo do canal, adotou-se o modelo MTL. Os gráficos da Figura 3.7 apresentam o comportamento de $i(z',t)$ em três posições ao longo do canal (0, 2 km e 4 km) com $v = 1,3 \times 10^8$ m/s.

Figura 3.7 – Distribuição espaço-temporal da corrente ao longo do canal



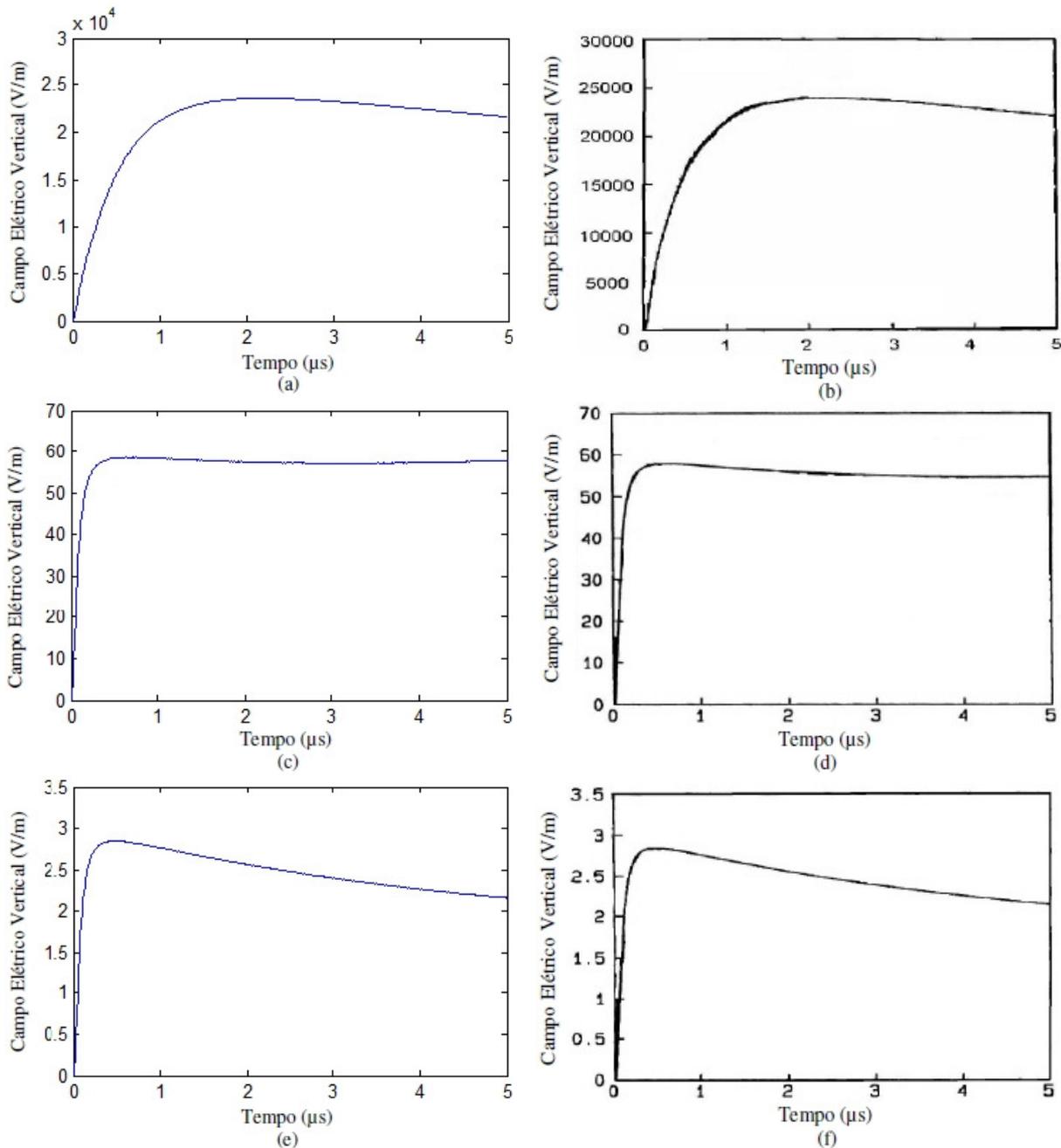
Fonte: Shinkai et al. (2016).

Notas: Representação da forma de onda em três posições no canal 0, 2 e 4 km.

Em Nucci et al. (1990), E_z foi calculado considerando o solo condutor perfeito e a geometria do canal da descarga apresentada na Figura 2.29. O canal de descarga tem comprimento $H = 4$ km, sem ramificações, e os campos foram calculados para distâncias de 50 m, 5 km e 100 km, respectivamente, entre o ponto de incidência da descarga e o ponto do cálculo do campo elétrico vertical através da expressão de Master e Uman (1983), descrita na equação 2.21.

A Figura 3.8 apresenta a comparação entre os resultados obtidos com o procedimento de cálculo adotado e aqueles apresentados no trabalho de referência, para diferentes distâncias de r entre o ponto P , ao nível do solo ($h = 0$ m), e o canal de descarga, representando as ondas sem considerar os tempos de atraso r/c .

Figura 3.8 - Comparação entre os resultados obtidos neste trabalho (esquerda) e aqueles obtidos em Nucci et al. (1990) (direita) para o campo elétrico vertical E_z



Fonte: Shinkai et al. (2016).

Notas: Cálculo do campo para os primeiros 5 μs nas distâncias (a)(b) 50 m, (c)(d) 5 km e (e)(f) 100 km, admitindo o solo condutor perfeito.

Verificou-se nos resultados obtidos neste trabalho ilustrados nas Figuras 3.6 e 3.7, em relação àqueles da referência, ilustrados nas Figuras 3.2 e 3.3, a obtenção dos mesmos valores e formas de onda para a representação da corrente na base do canal e sua derivada, assim como, para sua distribuição ao longo do canal de retorno. Além disso, analisando os resultados da Figura 3.8, verifica-se uma boa concordância entre os resultados desta simulação com os da referência citada, validando assim o procedimento adotado (ROMERO, 2007).

3.4.3 Parâmetros: intervalos e variáveis analisadas

A fim de ficar mais próximo da situação real foi definido na simulação um intervalo de detecção de E_z limitado entre um valor mínimo de sensibilização dos sensores (“threshold”) e um valor máximo de sobrecarga destes (“overhead”). Os valores escolhidos estão relacionados com a precisão de interpretação de E_z nos vários gráficos gerados no MATLAB® a partir da definição prévia dos valores de 1000 amostras com resolução de 0,1 para o parâmetro tempo, na escala em microssegundos. Ou seja, um intervalo de 100 μ s para análise dos eventos:

$$\begin{aligned} \text{threshold (min)} &= 1 \text{ V/m} \\ \text{overhead (max)} &= 3 \text{ V/m} \end{aligned} \tag{3.7}$$

Obviamente, na prática, esses valores são bastante diferentes e dependem da tecnologia utilizada nos sensores. Entretanto, o princípio é o mesmo, ou seja, os sensores detectam e gravam a forma de onda do campo elétrico, dentro de uma faixa de valores, e encaminham a uma central de processamento que as compara com um banco de dados com informações de descargas atmosféricas. Neste servidor central é então definido se o sinal recebido se trata realmente desse tipo de evento a partir da análise dos parâmetros da onda detectada, podendo, inclusive, em caso afirmativo, classificá-lo em nuvem-solo ou intranuvem (MESQUITA, 2006).

Após as simulações dos eventos listados na Tabela 3.2, para o ambiente da LLS especificada, considerando a parametrização estabelecida em Nucci et al. (1990), considerou-se a influência do ambiente local através do manuseio das seguintes variáveis (de forma consecutiva e não simultânea):

- Um retardo na velocidade de propagação da onda eletromagnética gerada no canal de descarga de $c = 3 \times 10^8$ m/s para $c' = 2,9 \times 10^8$ m/s;
- Um aumento na amplitude da corrente na base do canal de descarga de $ip = 11$ kA para $ip' = 12$ kA;
- Uma diminuição na velocidade de propagação da frente de onda da corrente de retorno ao longo do canal de descarga de $v = 1,3 \times 10^8$ m/s para $v' = 1,2 \times 10^8$ m/s.

3.5 Comparação entre os resultados

Ao final compararam-se os resultados obtidos com a mudança nessas três variáveis, através dos gráficos do MATLAB®, com aqueles obtidos nas simulações considerando os parâmetros do experimento da referência para o mesmo evento analisado.

A metodologia adotada foi considerar a janela de tempo de um evento de raio que tenha sensibilizado todos os 4 sensores, ou seja, o intervalo de tempo contado desde o recebimento, pela central de processamento, da detecção do sinal do raio pelo primeiro sensor até o recebimento feito pelo último sensor participante da solução. Está claro que a variação neste parâmetro, mediante o manuseio das variáveis citadas, implicará alterações na eficiência de detecção da rede devido a Janela de Coincidência configurada nesta central (poderá contabilizar todas as detecções ou não), influenciando assim no desempenho do LLS, conforme definido no item 2.2.3.a2 deste trabalho.

Também, a fim de ressaltar os tempos cronometrados nas simulações, considerou-se o tempo de transporte dos dados com as informações do sinal recebido pelos sensores até a central de processamento igual para toda a rede. Assim, na confecção deste parâmetro (janela de tempo) para comparação das simulações realizadas não foi considerado o “delay” do transporte de dados, já que foi igual para todos os sensores.

4. RESULTADOS

Neste capítulo serão demonstrados os resultados obtidos nas simulações dos eventos definidos no ambiente de simulação (Tabela 3.2). Primeiramente, considerando a parametrização estabelecida no experimento da referência para este trabalho e posteriormente variando os parâmetros velocidade de propagação da onda eletromagnética gerada pelo raio, amplitude do pico da corrente na base do canal de descarga e velocidade da frente de onda da corrente no canal de descarga, conforme estabelecido na metodologia.

4.1 Simulações com os parâmetros da referência

Para todas as simulações realizadas neste trabalho, foram registrados em tabelas os resultados para cada um dos eventos de descarga atmosférica relativos às seguintes características obtidas nos gráficos do MATLAB®:

- Valor de pico de E_z ;
- Tempo de captação do sinal;
- Tempo total.

A primeira corresponde ao máximo valor alcançado pelo campo elétrico vertical (em V/m), que está relacionado com o valor do pico da corrente no canal de descarga através da equação 2.3, conforme descrito no item 2.2.3.b7 deste trabalho. A segunda está relacionada a soma dos parâmetros Tempo de Subida e Largura de Pulso (em μs) descritos no item 2.2.3.b3. Enquanto que a terceira é a soma do tempo de captação ao intervalo de deslocamento da onda do campo E_z , ou seja, o tempo total (também em μs) desde a ocorrência do evento até seu processamento no sensor.

As Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 a seguir contêm os valores dessas grandezas, obtidas a partir dos gráficos do MATLAB®, para as simulações realizadas com os parâmetros definidos em Nucci et al. (1990), respectivamente. Na primeira, os valores marcados em azul foram aqueles que ficaram abaixo do limiar mínimo de sensibilidade dos sensores (“threshold”), e os em vermelho foram aqueles que levaram à saturação os mesmos (“overhead”). Observa-se que apenas o evento Flash5 teve captação da onda gerada, dentro dos limites de operação, em todos os sensores.

Tabela 4.1 – Valor de pico de E_z (V/m)

	Belém	Bragança	Ulianópolis	Tucuruí
Flash1	2,265	2,481	1,123	0,8263
Flash2	4,734	1,297	1,261	1,136
Flash3	1,380	1,008	3,543	1,370
Flash4	1,347	0,7787	1,606	3,049
Flash5	2,229	1,174	1,793	1,311

Fonte: do autor.

Tabela 4.2 – Tempo de captação do sinal (μ s)

	Belém	Bragança	Ulianópolis	Tucuruí
Flash1	64,8	84,7	2,2	-
Flash2	-	4,5	4,0	2,3
Flash3	5,9	0,7	-	5,8
Flash4	5,4	-	12,5	-
Flash5	61,6	2,8	25,9	4,7

Fonte: do autor.

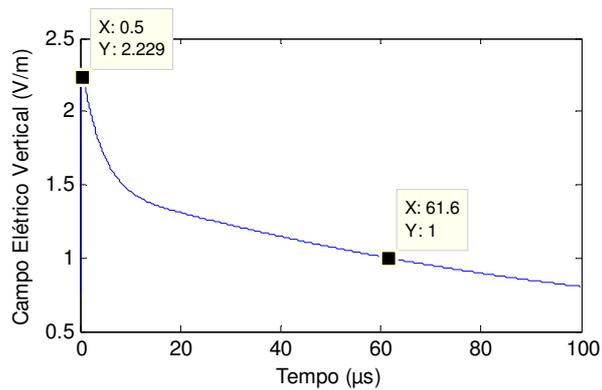
Tabela 4.3 – Tempo total (μ s)

	Belém	Bragança	Ulianópolis	Tucuruí
Flash1	483,27	466,84	845,81	-
Flash2	-	734,89	755,44	836,40
Flash3	692,75	940,64	-	697,37
Flash4	708,86	-	602,71	-
Flash5	486,91	809,78	554,53	727,37

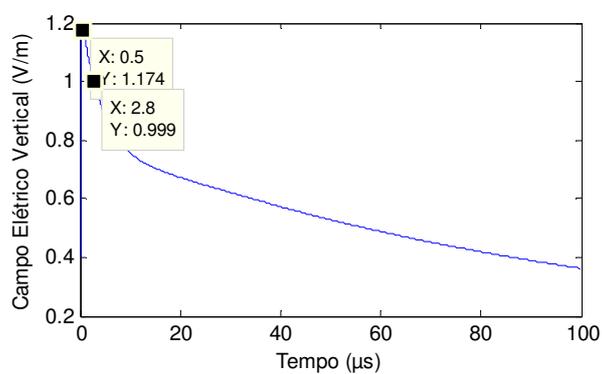
Fonte: do autor.

A seguir na Figura 4.1 estão os gráficos gerados no MATLAB® para o evento Flash5. Note que como todas as descargas atmosféricas simuladas tiveram sempre a mesma corrente na base do canal de descarga e ao longo deste canal, o valor do parâmetro Tempo de Subida do Pulso para as distâncias envolvidas foi sempre de 0,5 μ s, como já havia sinalizado o gráfico da Figura 3.8e.

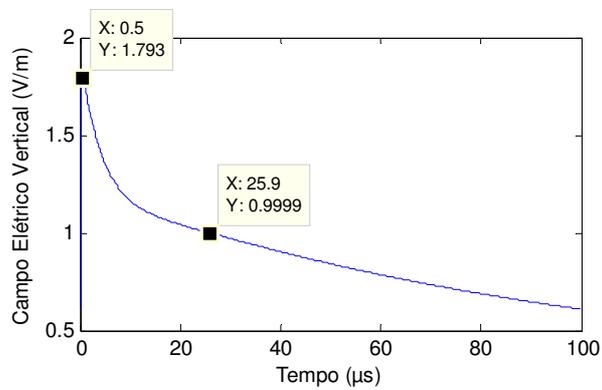
Figura 4.1 – Gráficos do MATLAB® para o evento Flash5



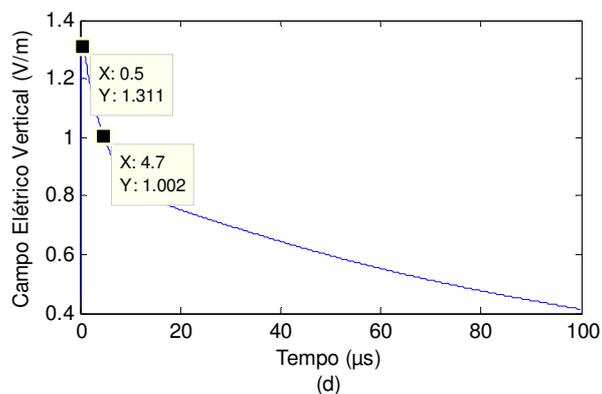
(a)



(b)



(c)



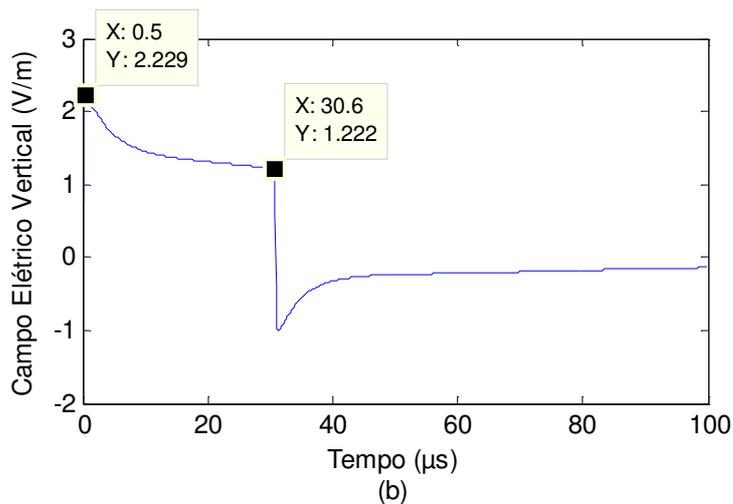
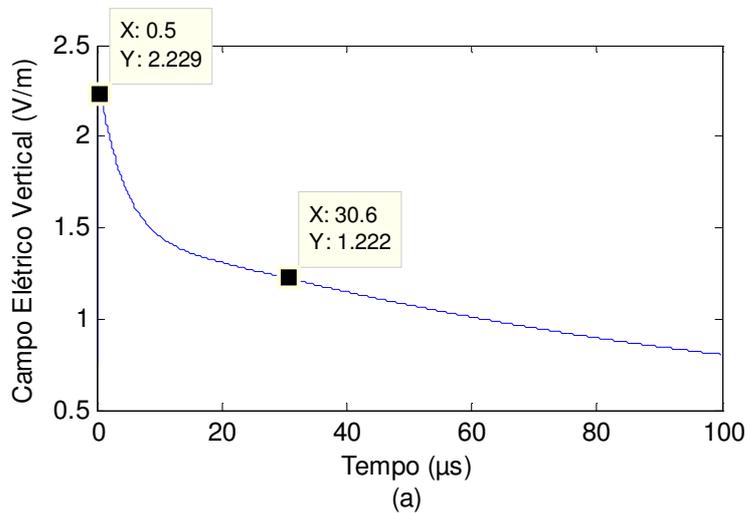
(d)

Fonte: do autor.

Notas: Sensores em (a) Belém; (b) Bragança; (c) Ulianópolis e (d) Tucuruí.

Nas simulações realizadas observou-se o mesmo resultado verificado em Uman et al. (1975), conforme descrito no item 2.3.3.a do trabalho, ou seja, uma inversão na polaridade da onda com passagem por zero em 30,6 μs . Assim, adotou-se o mesmo procedimento da referência que foi de considerar a altura do canal de descarga suficiente para evitar esta reflexão da onda na base da nuvem até o fim do intervalo de observação (100 μs). Porém, para validar este artifício foi gerado o gráfico para a altura de 4 km e comparado com o gráfico gerado sem terminação do canal, obtendo-se até o instante da inversão os mesmos valores para ambos, conforme ilustra a Figura 4.2 para o caso do sensor em Belém. Para todos os demais se observou o mesmo resultado.

Figura 4.2 – Validação do gráfico (a) na Figura 4.1



Fonte: do autor.

Notas: Sensor em Belém (a) sem inversão e (b) com inversão.

4.2 Simulações considerando a variável $c' = 2,9 \times 10^8$ m/s

Para as simulações considerando um retardo na velocidade de propagação da onda eletromagnética gerada no canal de descarga de $c = 3 \times 10^8$ m/s para $c' = 2,9 \times 10^8$ m/s, foi feita alteração no valor desta variável na equação 3.5. Os resultados estão ilustrados nas Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 abaixo.

Tabela 4.4 – Valor de pico de E_z (V/m) para c'

	Belém	Bragança	Ulianópolis	Tucuruí
Flash1	2,424	2,655	1,202	0,8843
Flash2	5,066	1,388	1,349	1,216
Flash3	1,476	1,079	3,792	1,466
Flash4	1,441	0,8333	1,718	3,262
Flash5	2,385	1,256	1,919	1,403

Fonte: do autor.

Tabela 4.5 – Tempo de captação do sinal (μ s) para c'

	Belém	Bragança	Ulianópolis	Tucuruí
Flash1	74,8	95,6	3,2	-
Flash2	-	6,1	5,4	3,4
Flash3	8,0	1,6	-	7,8
Flash4	7,2	-	19,2	-
Flash5	71,5	3,9	35,0	6,4

Fonte: do autor.

Tabela 4.6 – Tempo total (μ s) para c'

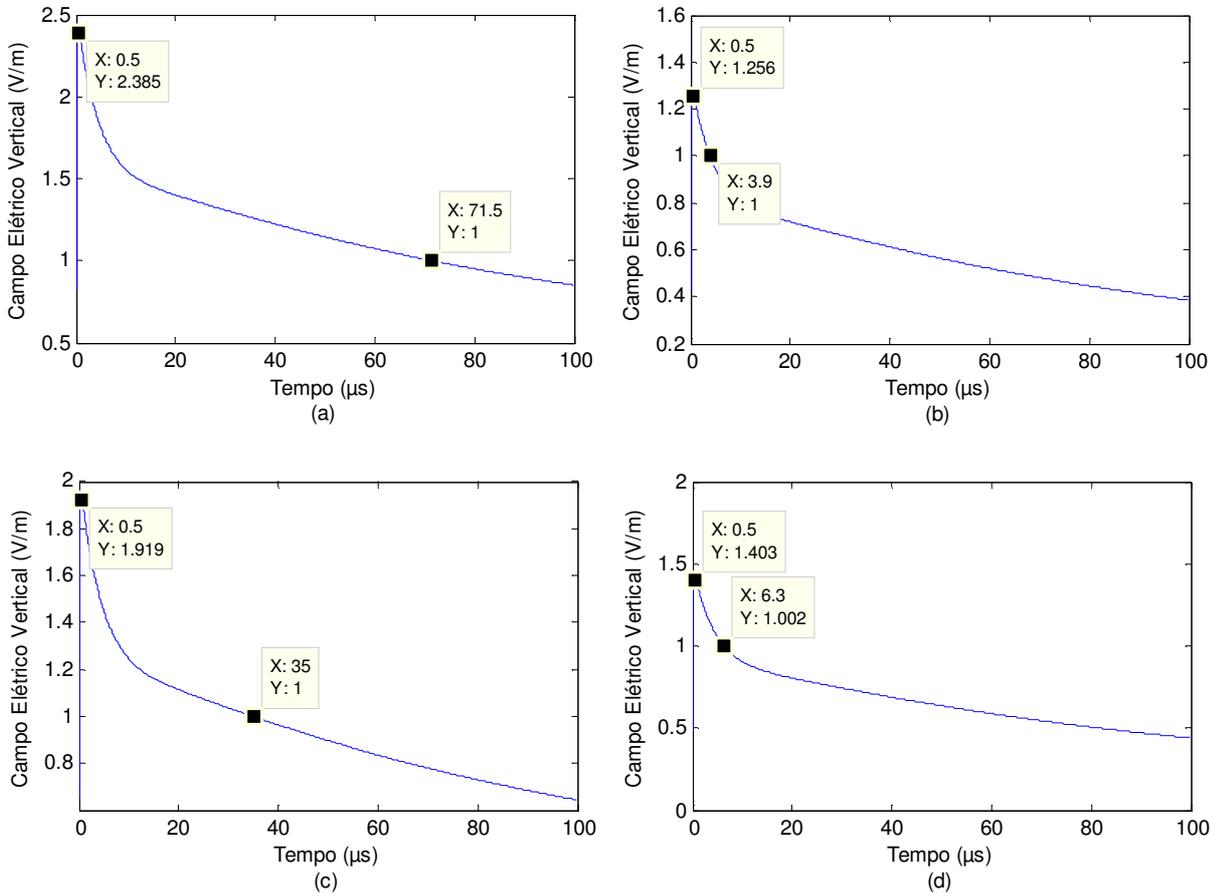
	Belém	Bragança	Ulianópolis	Tucuruí
Flash1	507,70	490,92	875,90	-
Flash2	-	761,68	782,76	866,27
Flash3	718,53	973,96	-	723,22
Flash4	734,92	-	629,77	-
Flash5	511,57	838,71	581,86	753,88

Fonte: do autor.

Onde novamente observa-se que apenas o evento Flash5 teve captação da onda gerada em todos os sensores.

Abaixo na Figura 4.3 estão os gráficos gerados no MATLAB® para este evento após variação de c para c' .

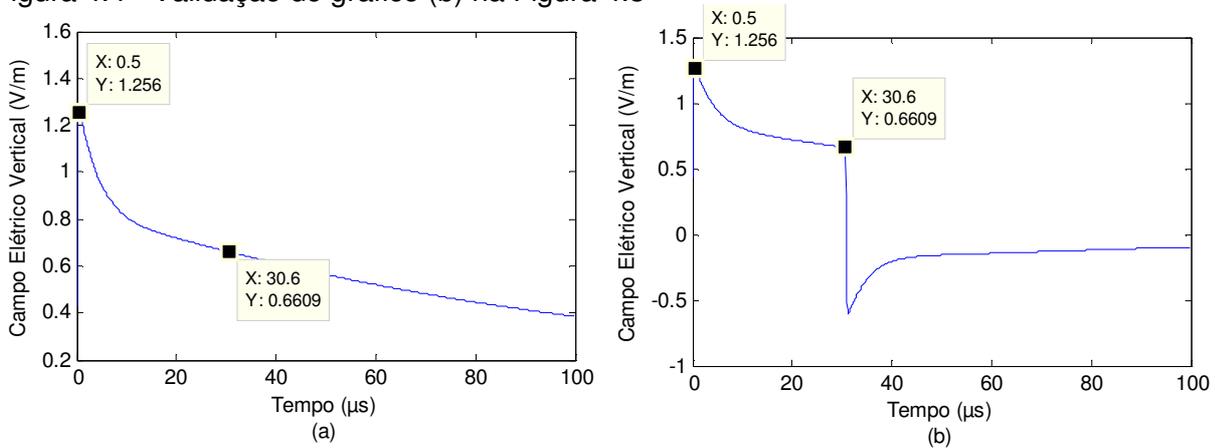
Figura 4.3 – Gráficos do MATLAB® para o evento Flash5 após variação de c para c'



Fonte: do autor.

Notas: Sensores em (a) Belém; (b) Bragança; (c) Ulianópolis e (d) Tucuruí.

Figura 4.4 - Validação do gráfico (b) na Figura 4.3



Fonte: do autor.

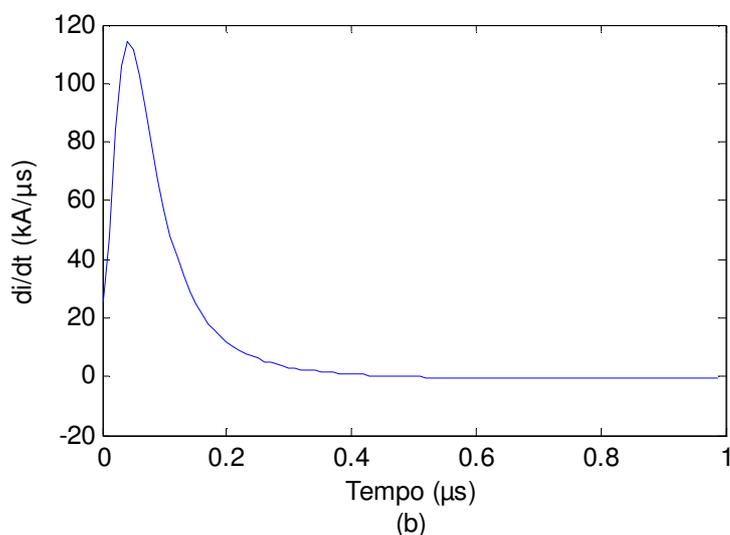
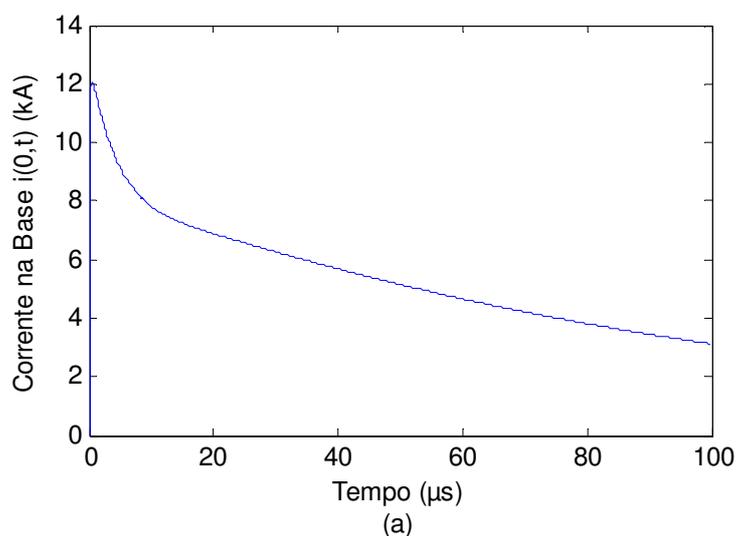
Notas: Sensor em Bragança (a) sem inversão e (b) com inversão.

Também neste caso foi aplicada a mesma técnica de validação para todos os sensores. Na Figura 4.4 na página anterior os gráficos para o sensor localizado em Bragança.

4.3 Simulações considerando a variável $ip' = 12$ kA

Para as simulações considerando um aumento na amplitude da corrente na base do canal de descarga de $ip = 11$ kA para $ip' = 12$ kA, foi feita alteração no valor de I_{01} e I_{02} na equação 3.1 que passaram de 9,9 kA para 10,9 kA e de 7,5 kA para 8,5 kA, respectivamente. Assim, a corrente na base do canal passou a apresentar a forma de onda e de sua derivada ilustradas na Figura 4.5 abaixo:

Figura 4.5 - Corrente na base do canal usada para cálculo do Ez para $ip' = 12$ kA



Fonte: do autor.

Notas: (a) Forma de onda da corrente; (b) derivada da corrente.

E como visto na figura, a corrente na base do canal passa a ter amplitude de 12 kA e derivada máxima em torno de 114 kA/ μ s.

Os resultados das simulações para este caso estão ilustrados nas Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 abaixo.

Tabela 4.7 – Valor de pico de E_z (V/m) para ip'

	Belém	Bragança	Ulianópolis	Tucuruí
Flash1	2,498	2,736	1,238	0,9111
Flash2	5,220	1,431	1,390	1,253
Flash3	1,521	1,111	3,907	1,511
Flash4	1,485	0,8586	1,771	3,362
Flash5	2,458	1,295	1,977	1,446

Fonte: do autor.

Tabela 4.8 – Tempo de captação do sinal (μ s) para ip'

	Belém	Bragança	Ulianópolis	Tucuruí
Flash1	86,3	100,0 ^(*)	3,8	-
Flash2	-	7,5	6,5	4,0
Flash3	10,2	2,1	-	9,8
Flash4	9,0	-	27,0	-
Flash5	82,7	4,7	43,3	7,9

Fonte: do autor.

Notas: ^(*) Extrapolou os 100 μ s.

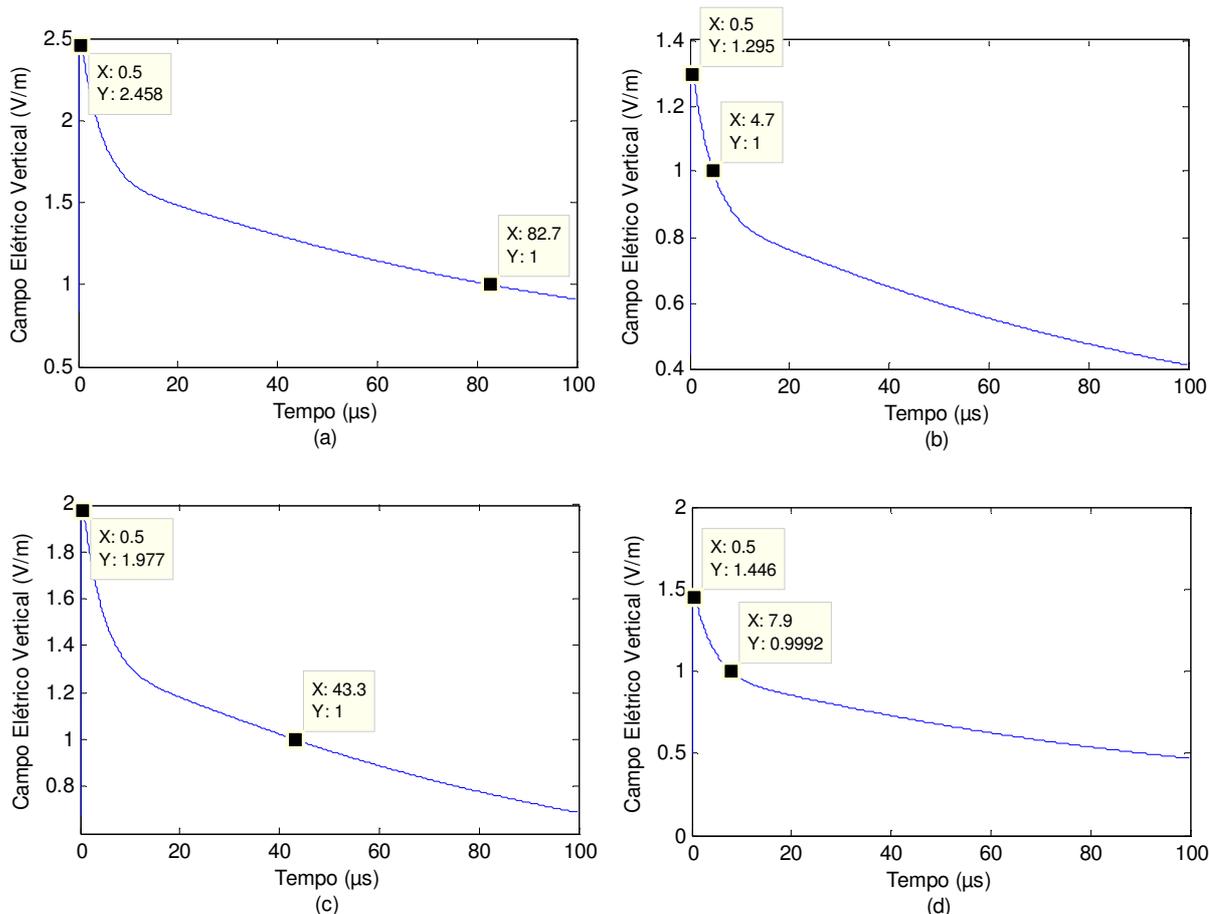
Tabela 4.9 – Tempo total (μ s) para ip'

	Belém	Bragança	Ulianópolis	Tucuruí
Flash1	504,77	482,14	847,41	-
Flash2	-	737,89	757,94	838,1
Flash3	697,05	942,04	-	701,37
Flash4	712,46	-	617,21	-
Flash5	508,01	811,68	571,93	730,57

Fonte: do autor.

Outra vez observa-se que apenas o evento Flash5 teve captação da onda gerada em todos os sensores. A seguir na Figura 4.6 estão os gráficos gerados no MATLAB® para este evento após variação de ip para ip' .

Figura 4.6 - Gráficos do MATLAB® para o evento Flash5 após variação de ip para ip'

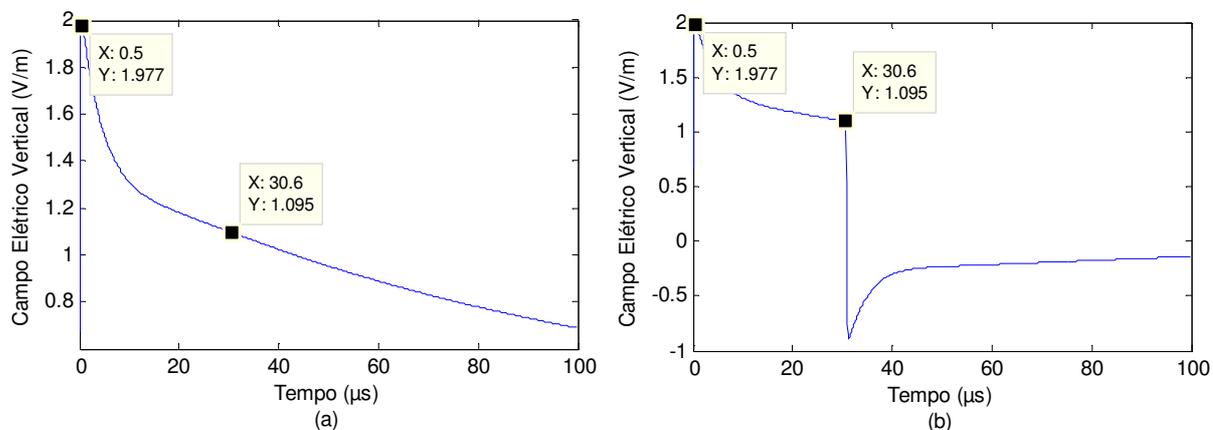


Fonte: do autor.

Notas: Sensores em (a) Belém; (b) Bragança; (c) Ulianópolis e (d) Tucuruí.

Na Figura 4.7 abaixo está ilustrada a validação para o sensor localizado em Ulianópolis. Para todos os demais se observou o mesmo resultado.

Figura 4.7 - Validação do gráfico (c) na Figura 4.6



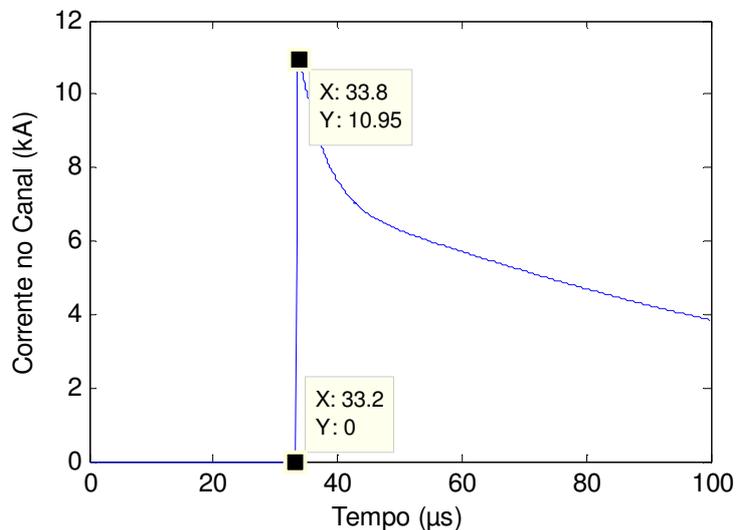
Fonte: do autor.

Notas: Sensor em Ulianópolis (a) sem inversão e (b) com inversão.

4.4 Simulações considerando a variável $v' = 1,2 \times 10^8$ m/s

Para as simulações considerando uma diminuição na velocidade de propagação da frente de onda da corrente de retorno ao longo do canal de descarga de $v = 1,3 \times 10^8$ m/s para $v' = 1,2 \times 10^8$ m/s, foi feita alteração no valor desta variável nas funções representativas do Modelo da Linha de Transmissão no MATLAB® desenvolvidas pela equação 2.6. A consequência disto é que agora a corrente ao longo do canal alcança o topo (4 km) no tempo de 33,2 μ s e não mais em 30,6 μ s, conforme ilustra a Figura 4.8 abaixo:

Figura 4.8 - Corrente ao longo do canal usada para cálculo do E_z para $v' = 1,2 \times 10^8$ m/s



Fonte: do autor.

Notas: Representação da forma de onda da corrente na posição 4 km no canal.

Os resultados das simulações para este caso estão ilustrados nas Tabelas 4.10, 4.11 e 4.12 a seguir.

Tabela 4.10 – Valor de pico de E_z (V/m) para v'

	Belém	Bragança	Ulianópolis	Tucuruí
Flash1	2,091	2,290	1,037	0,7627
Flash2	4,370	1,198	1,164	1,049
Flash3	1,273	0,9304	3,271	1,265
Flash4	1,243	0,7188	1,482	2,814
Flash5	2,057	1,084	1,655	1,211

Fonte: do autor.

Tabela 4.11 – Tempo de captação do sinal (μ s) para v'

	Belém	Bragança	Ulianópolis	Tucuruí
Flash1	52	70,3	1,1	-
Flash2	-	3,1	2,7	1,2
Flash3	4,2	-	-	4,1
Flash4	3,7	-	8,2	100,0 ^(*)
Flash5	49,1	1,7	15,5	3,3

Fonte: do autor.

Notas: ^(*) Extrapolou os 100 μ s.

Tabela 4.12 – Tempo total (μ s) para v'

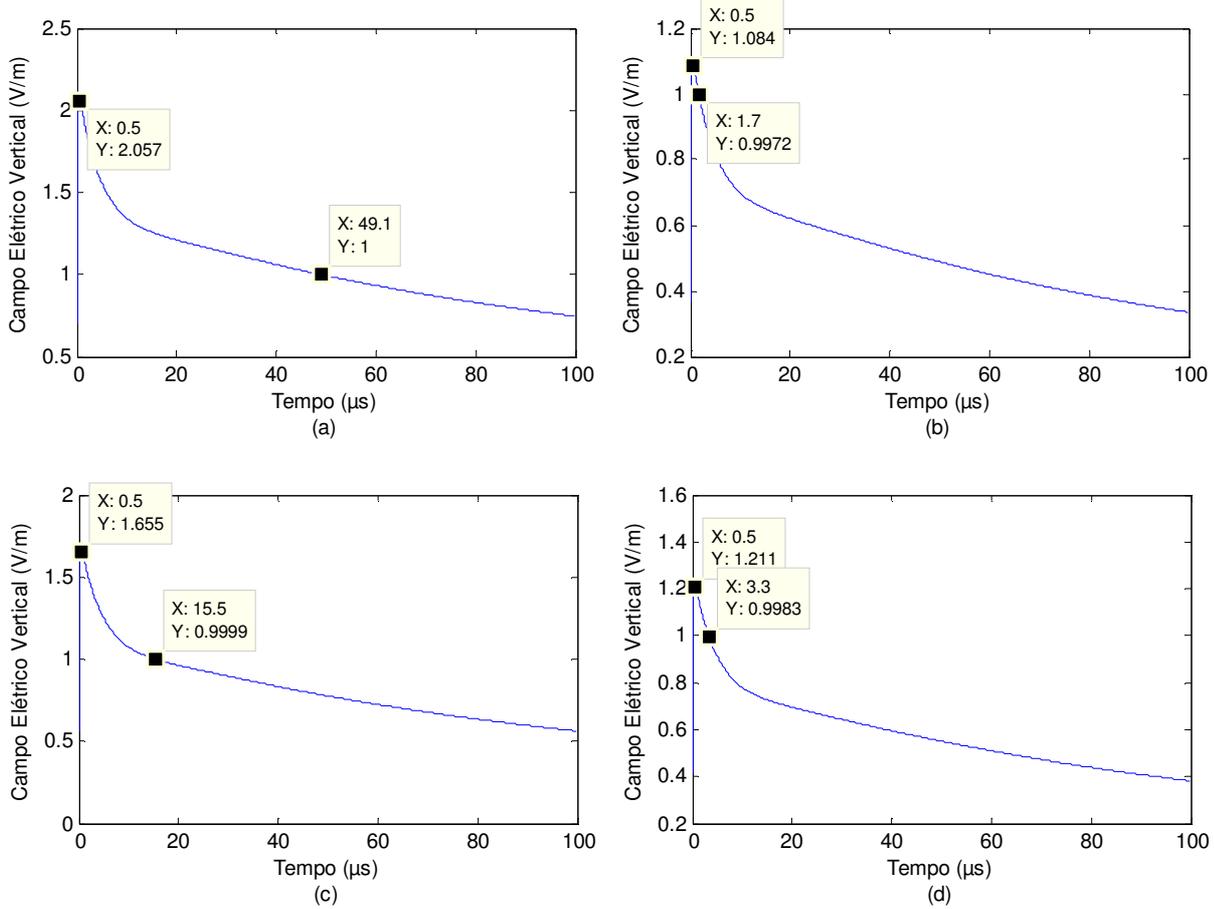
	Belém	Bragança	Ulianópolis	Tucuruí
Flash1	470,47	452,44	844,71	-
Flash2	-	733,49	754,14	835,30
Flash3	691,05	-	-	695,67
Flash4	707,16	-	598,41	411,05
Flash5	474,41	808,68	544,03	725,97

Fonte: do autor.

Com estes resultados encerram-se as simulações, mantendo-se o evento Flash5 como único a ter a captação do sinal da onda eletromagnética gerada pela descarga em todos os quatro sensores do LLS, mesmo com as variações nos parâmetros citados.

A seguir na Figura 4.9 estão os gráficos gerados no MATLAB® para este evento após variação de v para v' . E na Figura 4.10 está ilustrada a validação para o sensor localizado agora em Tucuruí. Novamente para todos os demais a validação foi confirmada.

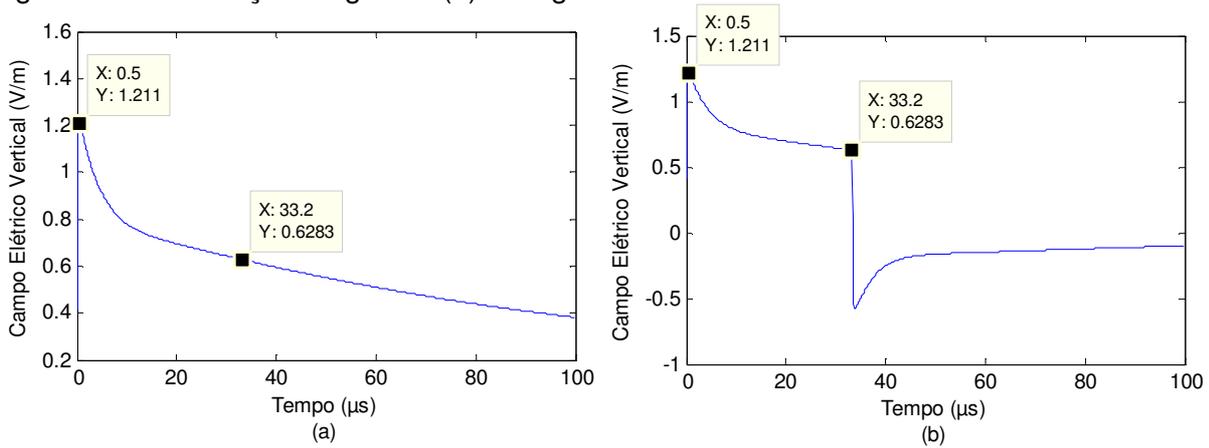
Figura 4.9 - Gráficos do MATLAB® para o evento Flash5 após variação de v para v'



Fonte: do autor.

Notas: Sensores em (a) Belém; (b) Bragança; (c) Ulianópolis e (d) Tucuruí.

Figura 4.10 - Validação do gráfico (d) na Figura 4.9



Fonte: do autor.

Notas: Sensor em Tucuruí (a) sem inversão e (b) com inversão.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho versou sobre a influência das características locais em sistemas de detecção indireta de descargas atmosféricas. Para isso foi desenvolvido um programa computacional que possibilitasse simulações da onda eletromagnética do campo elétrico vertical gerado por descargas do tipo nuvem-solo. Adotou-se como modelo da distribuição espaço temporal das cargas elétricas ao longo do canal de descarga o modelo de engenharia do tipo Linha de Transmissão (TL), especificamente o MTL, considerando o solo como um meio condutor perfeito.

Para validação do experimento o mesmo baseou-se na metodologia e considerações apresentadas em Nucci et al. (1990), referência clássica na literatura técnica desta área do conhecimento e muito utilizada para embasar análises relativas a modelagem deste tipo de fenômeno.

Após comprovação da efetividade da ferramenta desenvolvida, através da comparação dos resultados do trabalho da referência com os obtidos nas simulações (pela repetição do mesmo ensaio realizado por esses pesquisadores), partiu-se para criação de um ambiente que emulasse um LLS. Adotou-se, então, uma área de interesse no nordeste paraense, na Amazônia Oriental, para simular um sistema de detecção indireta constituído por quatro sensores, operando na faixa LF e com a técnica de detecção TOA. Para isso, imaginou-se em cada localidade de instalação de um sensor a presença de uma antena monopolo vertical para detecção da componente vertical do campo elétrico. Além disso, admitiu-se um LLS rigorosamente sincronizado por GPS e com tempo de transporte dos dados à central de processamento igual pra todos os sensores. Posteriormente, marcou-se nesta área a posição de cinco eventos de raios nuvem-solo negativos sem multiplicidade (descargas subsequentes). A localização foi aleatória, mas uniformemente distribuída com quatro eventos próximos às extremidades do polígono (Flash1, Flash2, Flash3 e Flash4) e um na região central (Flash5).

Em seguida foi realizada simulação da captação do sinal do campo elétrico vertical de uma descarga atmosférica, originado a partir da posição de cada um desses eventos, em cada um dos quatro sensores, utilizando-se os parâmetros da referência (caso 1):

- Na Tabela 4.1, verifica-se que apenas o evento Flash5 atendeu ao requisito da faixa de operação dos sensores estabelecido na metodologia (equação

3.7). Para os eventos Flash1, Flash2 e Flash3 houve a participação de três sensores na solução, enquanto no evento Flash4 apenas dois. Onde se conclui que o maior desempenho da LLS se dá no centro de sua área de cobertura, corroborando os resultados apresentados em Souza (2009) para a RDR-SIPAM;

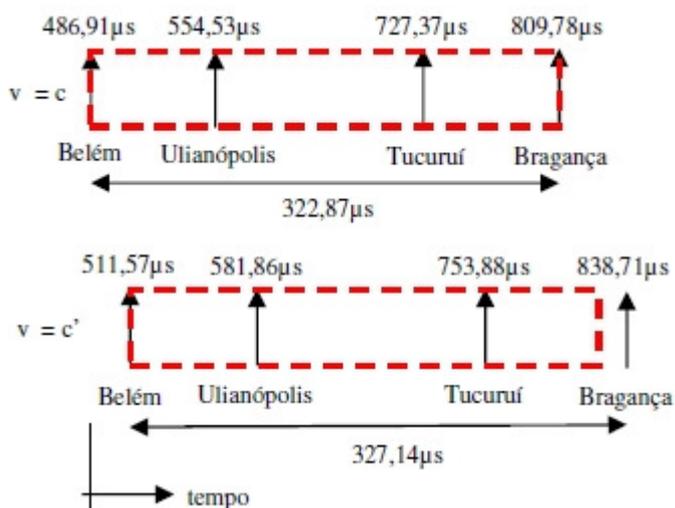
- Para o evento Flash4 observa-se que o mesmo saturou o sensor em Tucuruí, devido à proximidade, mas não teve nível de sinal suficiente para sensibilizar o sensor em Bragança. Atribui-se este fato ao trecho Bragança-Tucuruí não ter atendido ao requisito da distância entre dois sensores, conforme descrito no item 3.4;
- Na Tabela 4.3, verifica-se que a janela de tempo para o evento Flash5, único que teve participação de todos os sensores, foi de 322,87 μ s (diferença de tempo entre a primeira detecção em Belém e a última em Bragança).

Posteriormente, para verificar a influência do meio geográfico e do solo da área de interesse, adotou-se uma velocidade de propagação inferior à velocidade da luz e repetiram-se as simulações (caso 2):

- Na Tabela 4.4, observa-se o mesmo padrão de comportamento do caso anterior com o evento Flash5 o único que teve a participação de todos os sensores, e o evento Flash4 o mais crítico em termos de participação dos sensores, devido ao motivo já descrito;
- Comparando os valores do pico da onda e do tempo de captação do sinal com o caso anterior, verifica-se aumento médio de 6,55% e 26,88%, respectivamente, para uma redução de aproximadamente 3% na velocidade de propagação. Onde se conclui que ao considerar a velocidade de propagação da onda igual à velocidade da luz no vácuo estarão sendo subestimadas as grandezas desses parâmetros;
- Na Tabela 4.6, verifica-se que a janela de tempo para o evento Flash5 foi de 327,14 μ s. Comparando-se então à janela de tempo deste mesmo evento do caso anterior (Figura 4.11), constata-se uma diferença de 4,27 μ s a mais. Ou seja, se a Janela de Coincidência configurada no algoritmo da central de processamento estiver considerando a velocidade de propagação da onda igual à velocidade da luz no vácuo, poderá acarretar perda na correlação do

evento detectado pelo sensor em Bragança. Este fato vem ao encontro no que foi descrito em Pereira (2010) para RDR-SIPAM, ou seja, havia detecção dos eventos, mas sem solução devido à falta de correlação.

Figura 5.1 – Janela de tempo para o evento Flash5 com velocidade c comparada à situação com velocidade c'



Fonte: Shinkai et al. (2016)

Depois se repetiram as simulações visando verificar a influência na alteração das características da descarga, que estão atreladas aos aspectos climatológicos e ambientais locais. Primeiro se considerou um aumento no valor da amplitude da corrente na base do canal de descarga (caso 3):

- Na Tabela 4.7, novamente observa-se o mesmo padrão de comportamento do caso 1 com o evento Flash5 o único que teve a participação de todos os sensores, e o evento Flash4 o mais crítico em termos de participação dos sensores;
- Comparando os valores do pico da onda e do tempo de captação do sinal com o caso 1, verifica-se aumento médio de 9,31% e 41,28%, respectivamente, para um aumento de aproximadamente 8% na amplitude da corrente na base do canal;
- Na Tabela 4.9, verifica-se que a janela de tempo para o evento Flash5 foi de 303,67 μs . Comparando-se então à janela de tempo deste mesmo evento do caso 1, constata-se uma diferença de 19,2 μs a menos.

E por último, para o caso de diminuição na velocidade de propagação da frente de onda da corrente no canal de descarga, obteve-se o caso 4:

- Na Tabela 4.10, observa-se ainda o evento Flash5 como único que teve a participação de todos os sensores, porém o evento Flash4 deixa de ser o mais crítico devido a participação do sensor em Tucuruí, mas o evento Flash3 perde a participação do sensor em Bragança, tornando-se o mais crítico;
- Comparando os valores do pico da onda e do tempo de captação do sinal com o caso 1, verifica-se redução média de 8,33% e 50,72%, respectivamente, para uma diminuição de aproximadamente 7,7% na velocidade da frente de onda da corrente de retorno no canal de descarga;
- Na Tabela 4.12, verifica-se que a janela de tempo para o evento Flash5 foi de 334,27 μ s. Comparando-se então à janela de tempo deste mesmo evento do caso 1, constata-se uma diferença de 11,4 μ s a mais.

Assim, demonstrou-se pela ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho a possibilidade de haver influência da geografia local (solo e relevo), assim como do perfil do evento da descarga atmosférica no desempenho de um LLS. O parâmetro adotado para verificação deste efeito foi a “Janela de Coincidência”, descrita no item 3.2 conforme manual do fabricante. Nas simulações realizadas para o ambiente definido, ficou evidenciada esta influência pelas diferenças detectadas na janela de tempo de um evento com solução completa (participação de todos os sensores) que se mostrou sensível às variações no meio (velocidade de propagação do sinal gerado pelo raio) e em dois parâmetros que caracterizaram a modelagem do fenômeno pelo modelo MTL (amplitude da corrente na base do canal e velocidade de propagação da frente de onda da corrente ao longo do canal), conforme ilustra a Tabela 5.1. O fato do evento mais ao centro do polígono de interesse (Flash5) ter permanecido imune a estas variações (em nenhum momento o mesmo deixou de ter detecção dos quatro sensores), assim como, sensores que mudaram seu status na solução com as variações impostas indicaram uma forte dependência deste desempenho com a distribuição espacial dos mesmos.

Como proposta para trabalhos futuros sugere-se ratificar esta influência através da adoção dos parâmetros característicos reais das descargas atmosféricas de determinada área de monitoramento (a partir de banco de dados de informações de raios), bem como do meio de propagação, na ferramenta desenvolvida. Desta forma

podem-se cruzar as respostas obtidas no simulador com os resultados das soluções de localização do LLS que cobre esta área (operando na faixa LF). Outro sim, visando verificar a influência do modelo adotado, se sugere também repetir as simulações com a modelagem do fenômeno dos raios por outros citados neste trabalho. Pelo fato de ser estruturado, o programa permite o reaproveitamento de código, trabalhando apenas no módulo de determinada função desenvolvida no MATLAB®.

Tabela 5.1 – Comparação entre as janelas de tempo (μs) do evento Flash5

	Nucci et al.	<i>c'</i>	<i>ip'</i>	<i>v'</i>
Janela de Tempo para Flash5	322,87	327,14	303,67	334,27

Fonte: do autor.

REFERÊNCIAS

AERO TD Escola de Aviação Civil. **Curso Profissionalizante em Manutenção de Aeronaves: Sistemas de Comunicação e de Navegação – Módulo II**. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/10797304-Modulo-i-4-a-35-modulo-ii-36-a-79-modulo-iii-82-a-101-modulo-iv-102-a-138-modulo-v-140-a-169-modulo-vi-171-a-216.html>>. Acesso em: 10 novembro 2016.

ANTONESCU, B.; BURCEA, S. **A cloud-to-ground lightning climatology for Romania**. *Mon. Weather Rev.*, 138, 579-591, doi: 10.1175/2009MWR2975.1, 2010.

BARKER, P. P.; SHORT, T. A.; EYBERT-BERARD, A. R.; BERLANDIS, J. P. **Induced Voltage Measurements on an Experimental Distribution Line During Nearby Rocket Triggered Lightning Flashes**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, N. 2, April 1996.

BENETTI, C. A. A.; LEITE, E. A.; GARCIA, S. A. M.; ASSUNÇÃO, L. A. R.; FILHO, A. C.; REIS, R. J. **Ridat – Rede Integrada de Detecção de Descargas Atmosféricas no Brasil: Situação Atual, Aplicações e Perspectivas**. XI Congr. Bras. Met., 1971-1979, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

BENT, R. S.; LYONS, W. A. **Theoretical evaluations and initial operational experiences of LPATS (Lightning Positioning and Tracking System) to monitor lightning ground strikes using a time-of-arrival (TOA) technique**. In: International Conference on Atmospheric Electricity, 7., Albany, 1984. Proceedings. Albany: American Meteorological Society, p. 317-324, 1984.

BERGER, K.; ANDERSON, R. B.; KRÖNINGER, H.; PALVA, V. **Parameters of lightning flashes**. *Electra*, nº 41, p. 23-37, July, 1975.

BIAGI, C. J., CUMMINS, K. L. KEHOE, K. E.; KRIDER, E. P. **National Lightning Detection Network (NLDN) performance in southern Arizona, Texas, and Oklahoma in 2003-2004**. *J. Geophys. Res.*, 112, D05208, doi: 10.1029/2006JD007341, 2007.

BRUCE, C. E. R.; GOLDE, R. M. **The lightning discharge**. *J. Inst. Electr. Eng.*, 88, p. 487-520, 1941.

BUCK, T. L.; NAG, A.; MURPHY M. J. **Improved Cloud-to-Ground and Intracloud Lightning Detection with the LS7002 Advanced Total Lightning Sensor**. WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation, Saint Petersburg, Russian Federation, 07-09 July, 2014.

CARDOSO, I.; PINTO JR, O.; PINTO, I. R. C. A.; HOLLE, R. **Lightning casualty demographics in Brazil and its implications to safety rules**. *Atmospheric Research*, p. 135-136, p. 374-379, 2014.

CASPER, P. W.; BENT, R. B. **Results from the LPATS U.S.A. National Lightning Detection and Tracking System for the 1991 lightning season**. In: International

Conference on Lightning Protection, 21., Berlin, 1992. Proceedings. Berlin: Association of German Electrical Engineers, p. 339-342, 1992.

Centro de Ciência do Sistema Terrestre/INPE. **BrasilDAT**. Disponível em: <<http://www.ccst.inpe.br/projetos/brasildat/>>. Acesso em: 15 outubro 2016.

CHRONIS, T. G.; ANAGNOSTOU, E. N. **Evaluation of a Long-Range Lightning Detection Network With Receivers in Europe and Africa**. IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, v. 44, p. 1504-1510, 2006.

Cola da Web. **Ondas Eletromagnéticas**. Disponível em: <<http://www.coladaweb.com/fisica/ondas/ondas-eletromagneticas>>. Acesso em: 17 outubro 2016.

COORAY, V. **Effects of propagation on the return stroke radiation fields**. Radio Science, v. 22, n. 5, p. 757-768, Sept. 1987.

COORAY, V. **On the concepts used in the return stroke models applied in the engineering practice**. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, vol. 45, nº 1, p. 101-108, February, 2003.

CUMMINS, K. L.; HISCOX W. L.; PIFER A. E.; MAIER, M. W. **Performance analysis of the U.S. National Lightning Detection Network**. International Conference on Atmospheric Electricity, 9., St. Petersburg, 1992. International Commission on Atmospheric Electricity.

CUMMINS, K. L.; BURNETT, R. O.; HISCOX, W. L.; PIFER, A. E. **Line reliability and fault analysis using the National Lightning Detection Network**. Precise Measurements in Power Conference, Arlington, 1993. National Science Foundation and Center for Power Engineering at Virginia Tech.

CUMMINS, K. L.; BARDO, E. A.; HISCOX, W. L., PYLE, R. B.; PIFER, A. E. **NLDN'95: A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network**. International Aerospace & Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Williamsburg, 1995. National Interagency Coordination Group.

CUMMINS, K. L.; MURPHY, M. J.; BARDO, E. A.; HISCOX, W. L., PYLE, R. B.; PIFER, A. E. **A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network**. Journal of Geophysical Research, v. 103, D8, p. 9035-9044, Apr. 1998.

CUMMINS, K. L. et al. **The U.S National Lightning Detection Network: Post-Upgrade Status**. Second Conference on Meteorological Applications of Lightning Data, January, 2006.

CUMMINS, K. L.; MURPHY, M. J. **An Overview of Lightning Locating Systems: History, Techniques, and Data Uses, With an In-Depth Look at the U.S. NLDN**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 51, n. 3, p. 499-518, 2009.

DEFER, E., PINTY, J.-P., COQUILLAT, S., MARTIN, J.-M., PRIEUR, S., SOULA, S., RICHARD, E., RISON, W., KREHBIEL, P., THOMAS, R., RODEHEFFER, D., VERGEINER, C., MALATERRE, F., PEDEBOY, S., SCHULZ, W., FARGES, T., GALLIN, L.-J., ORTÉGA, P., RIBAUD, J.-F., ANDERSON, G., BETZ, H.-D., MENEUX, B., KOTRONI, V., LAGOUVARDOS, K., ROOS, S., DUCROCQ, V., ROUSSOT, O., LABATUT, L.; MOLINIÉ, G. **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, Atmos. Meas. Tech., 8, 649–669, doi: 10.5194/amt-8-649-2015, 2015.

DENTEL, L. M. **Modelagem de Sistemas de Detecção de Descargas Atmosféricas na Amazônia**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Dezembro, 2013.

DIENDORFER, G.; UMAN, M. A. **An improved return stroke model with specified channel-base current**. Journal of Geophysical Research, vol. 95, p. 13,621-44, 1990.

DUARTE, C. C.; COSTA, R. P.; TIVERON, R. B. **Plano Diretor de Tecnologia da Informação e Comunicações**. Biênio 2014/2015, Versão 1.1, 30/07/2014. Disponível em: <<http://www.sipam.gov.br/noticias-planejamento/plano-diretor-de-tecnologia-da-informacao-e-comunicacoes-2014>>. Acesso em: 23 de dezembro 2016.

ENNO, S. E. **A climatology of cloud-to-ground lightning over Estonia**. 2005-2009, Atmos. Res., 100, 310-317, 2011.

European Cooperation for Lightning Detection. **BLIDS network**. Disponível em: <<http://www.euclid.org/blids.html/>>. Acesso em: 14 outubro 2016.

FINKE, U.; KREYER, O. **Review of existing lightning location systems**. [S.l.]. 2002.

FISHER, F. A.; PLUMER, J. A. **Lightning Protection of Aircraft**. Washington, DC: NASA, 1977 (NASA RP-1080).

G1. **Em temporal, raio mata 36 animais em cidade assolada por seca no RN**. 01/04/2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/rn/rio-grande-do-norte/noticia/2016/04/em-temporal-raio-mata-36-animais-em-cidade-assolada-por-seca-no-rn.html>>. Acesso em: 10 outubro 2016.

GILAT, A.; SUBRAMANIAM, V. **Numerical Methods for Engineers and Scientists: An Introduction with Applications Using MATLAB**. 1ST Editon, Bookman, 2008.

Global Atmospheric (GAI). **Advanced Lightning Direction Finder - Model 141-T ALDF: installation, operation, and maintenance manual**. Tucson, 1994.

Global Atmospheric, Incorporation. **LP2000 – Lightning Processor 2000 User’s Guide**. Document number: 40116 REV 9704, version 1.1, manual revision date: April 7, 1997.

Global Atmospheric, Incorporation. **LPATS IV Installation, Operation and Maintenance Manual**. Document number: 40176 REV 9810, version 1.1, manual revision date: October 13, 1998.

Global Atmospheric (GAI). **LP2000 - Lightning Processor user’s guide**. Tucson, pp. 7-22 – 7-25, 1999.

GOMES, C.; COORAY, V. **Concepts of Lightning Return Stroke Models**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility; Vol. 42, N^o 1, February 2000.

Grupo de Eletricidade Atmosférica. **Melhor Foto Maio**. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/noticias/foto.do.mes.php>>. Acesso em: 12 outubro 2016.

HEIDLER, F. **Traveling current source model for LEMP calculation**. Proceedings of 6th Symposium on Electromagnetic Compatibility, edited by T. Dvorak, p. 157-162, ETH-Zentrum, Zurich, Switzerland, 1985.

HEMBURY, N.; HOLLE, R. **Flash of Inspiration: Latest innovations in worldwide lightning detection**. Meteorological Technology International, Lightning technology, p. 48-50, May, 2011.

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 2016.

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 2016.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/ELAT. **Circuito Elétrico Atmosférico Global**. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/eletricidade.atmosferica/circuito_eletrico.atmosferico.global.php>. Acesso em: 16 outubro 2016.

IRIBARNE, J. V.; CHO, H. R. **Atmospheric Physics**. Dordrecht, D. Reidel, 1980.

JACOBSON, A. R., HOLZWORTH, R., HARLIN, J., DOWDEN, R.; LAY, E. **Performance assessment of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN), using the Los Alamos Sferic Array (LASA) as ground truth**. J. Atmos. Ocean. Tech., 23, 1082–1092, 2006.

JERAULD, J.; RAKOV, V. A.; UMAN, M. A.; RAMBO, K. J.; JORDAN, D. M. **An evaluation of the performance characteristics of the U.S. National Lightning**

Detection Network in Florida using rocket-triggered lightning. Journal of Geophysical Research, v. 110, D19106, doi: 10.1029/2005JD005924, 2005.

KEOGH, S. J., HIBBETT, E., NASH, J.; EYRE, J. **The Met Office Arrival Time Difference (ATD) system for thunderstorms detection and lightning location.** Forecasting Research Tech. Rep. 488, Numerical Weather Prediction, Met Office, UK, 22 pp., 2006.

KRIDER, E. P.; NOGGLE, R. C.; UMAN, M. A. **A gated, wide-band magnetic direction finder for lightning return strokes.** Journal of Applied Meteorology, v. 15, n. 3, p. 301-306, Mar. 1976.

KRIDER, E. P.; PIFER, A. E.; VANCE, D. L. **Lightning direction finding system for forest fire detection.** Bulletin of American Meteorological Society, v. 61, n. 9, p. 980-986, Sept. 1980.

KRIDER, E. P. **The Earth's Electrical Environment.** *National Academy Press Washington, D. C* – 1986, Studies in Geophysics.

KRIDER, E. P. **75 years of research on the physics of a lightning discharge.** In: Fleming, J. R. ed. Historical essays on meteorology 1919-1995. Boston: American Meteorological Society, Cap. 11, p. 321-350, 1996.

LE VINE, D. M. **Review of measurements of the RF spectrum of radiation from lightning.** Meteorol. Atmos. Phys, v 37, p. 195-204, 1987.

LEE, A. C. L. **Ground truth confirmation and theoretical limits of an experimental VLF arrival time difference lightning flash locating system.** Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 115, n. 489, Part B, p. 1147-1166, July 1989.

LETEINTURIER, C.; WEIDMAN, C.; HAMELIN, J. **Current and electric field derivatives in triggered lightning return strokes.** Journal of Geophysical Research, 95, 811-828 p., 1990.

LEWIS, E. A.; HARVEY, R. B.; RASMUSSEN, J. E. **Hyperbolic direction finding with sferics of transatlantic origin.** Journal of Geophysical Research, v. 65, n. 7, p. 1879-1905, July 1960.

LIN, Y. T.; UMAN, M. A.; TILLER, J. A.; BRANTLEY, R. D.; BEASLEY, W. H.; KRIDER, E. P.; WEIDMAN, C. D. **Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurements.** Journal of Geophysics, 84, p. 6307-6314, 1979.

MÄKELÄ, A., ENNO, S. E.; HAAPALAINEN, J. **Nordic lightning information system: thunderstorm climate of northern Europe for the period 2002-2011.** Atmos. Res., 139, 46-61, 2014.

MALLICK, S., RAKOV, V. A., HILL, J. D., NGIN, T., GAMEROTA, W. R., PILKEY, J. T., BIAGI, C. J., JORDAN, D. M., UMAN, M. A., CRAMER, J. A., and NAG, A.

Performance characteristics of the NLDN for return strokes and pulses superimposed on steady currents, based on rocket-triggered lightning data acquired in Florida in 2004–2012. J. Geophys. Res.-Atmos., 119, 3825-3856, doi: 10.1002/2013JD021401, 2014.

MASTER, M. J.; UMAN, M. A. **Transient electric and magnetic fields associated with establishing a finite electrostatic dipole.** Am. Journal of Physics., vol. 51, nº 2, February, 1983.

Mega Curioso. **Raio mais mortal da História mata 323 renas na Noruega.** 29/08/2016. Disponível em: <<http://www.megacurioso.com.br/fenomenos-da-natureza/100150-raio-mais-mortal-da-historia-mata-323-renas-na-noruega.htm>>. Acesso em: 10 outubro 2016.

MESQUITA, C. R. **Investigação de Sistemas de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Junho de 2001.

MESQUITA, C. R. **Nova metodologia para calibração de sistemas de localização de descargas atmosféricas.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dezembro, 2006.

Minha Paixão é Avião e Aviação. **Cumulus Nimbus... O que isso???** 29/08/2015. Disponível em: <<http://minhapaixaoeaviaoeaviacao.blogspot.com.br/2015/08/cumulus-nimbus-oque-isso.html>>. Acesso em: 15 outubro 2016.

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](http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/344944/Sudeste_registra_maior_numero_de_mortes_por_raios.html)>. Acesso em: 10 outubro 2016.

MORALES, C. A. **Continuous thunderstorm monitoring: Retrieval of precipitation parameters from lightning observations.** USA. 2001.

NACCARATO, K. P. **Estudo de relâmpagos no Brasil com base na análise de desempenho do sistema de localização de tempestades.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Maio, 2001.

NACCARATO, K. P. **Análise das Características dos Relâmpagos na Região Sudeste do Brasil.** Tese de Doutorado, Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Julho, 2005.

NACCARATO, K. P.; SARAIVA, A. C. V.; SABA, M. M. F.; SCHUMANN, C. **First performance analysis of BrasilDAT total lightning network In southeastern Brazil.** In: GROUND 2012 INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING

AND EARTHING & 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS, Bonito - MS, 2012.

NACCARATO, K. P. et al. **Total Lightning Flash Detection from Space A CubeSat Approach**. 24th International Lightning Detection Conference & 6th International Lightning Meteorology Conference, 18-21 April, San Diego, California, USA, 2016.

NAG, A., MALLICK, S., RAKOV, V. A., HOWARD, J., BIAGI, C. J., HILL, D., UMAN, M. A., JORDAN, D. M., RAMBO, K. J., JERAULD, J., DECARLO, B. A., CUMMINS, K. L.; CRAMER, J. A. **Evaluation of U.S. National Lightning Detection Network performance characteristics using rocket-triggered lightning data acquired in 2004-2009**. J. Geophys. Res., 116, D02123, doi: 10.1029/2010JD014929, 2011.

NASCIMENTO, J. **Telecomunicações**. 2^a ed. São Paulo: Makron Books, 2000. 341 p.

NORINDER, H.; DAHLE, O. **Measurements by frame aeriels ofm current variations in lightning discharges**. Akiv for maths etc., 32A, N^o 5, 1945.

NUCCI, C. A.; MAZETTI, C.; RACHIDI, F.; IANOZ, M. **On lightning return stroke models for LEMP calculations**. 19th International Conference on Lightning Protection, Verband der Elektrizitatswerk Osterrichs, Graz, Austria, 1988.

NUCCI, C. A.; DIENDORFER, G., UMAN, M.A., RACHIDI, F., Ianoz, M.; MAZZETTI, C. **Lightning return stroke current models with specified channel-base current: review and comparison**. Journal of Geophysical Research, v. 95, n. D12, p. 20.395-20.408, Nov. 1990.

ORVILLE, R. E. et al. **Cloud-to-ground lightning flash characteristics from June 1984 through May 1985**. Journal of Geophysical Research, v. 92, n. D5, p. 5640-5644, May 1987.

ORVILLE, R. E. et al. **The North American Lightning Detection Network (NALDN) – Analysis of Flash Data: 2001-09**. American Meteorological Society, Monthly Weather Review, Vol. 139, May 2011.

PEREIRA, C. S. **Elementos de Sensores de Eletricidade Atmosférica**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Maio, 2010.

PINTO JR. O.; PINTO, I. R. C. A.; GIN, R. B. B.; MENDES JR., O. **A coordinated study of a storm system over the south american continente 1. Weather information and quasi-dc stratospheric electric field data**. Journal of Geophysical Research, v. 97, n. D16, p. 18195-18204, Nov.1992.

PINTO JR., O.; PINTO, I. R. C. A.; LACERDA, M.; CARVALHO, A. M.; DINIZ, J. H.; CHERCHIGLIA, L. C. L. **Are equatorial negative lightning flashes more intense than those at higher latitude?** Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v. 59, n. 15, p. 1881-1883, March 1997.

PINTO JR. O.; PINTO, I. R. C. A. **Tempestades e Relâmpagos no Brasil** – São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.

PINTO, JR. O.; GARCIA, S. A. M. **The Brazilian Integrated Lightning Detection Network – RINDAT the third largest network in the world**. II Workshop RINDAT – GROUND, 2004.

PINTO, JR. O.; GARCIA, S. A. M. **The Brazilian Integrated Lightning Detection Network – RINDAT: The Third Largest Network in the World**. National Institute of Space Research – INPE – Brazil. Furnas Centrais Elétricas – Brazil, 2005.

PINTO, JR. O. **A Arte da Guerra Contra os Raios**, Editora, Oficina de textos, 2005.

PINTO, JR. O. et al. **Climatology of large peak current cloud-to-ground lightning flashes in southeastern Brazil**. Journal of Geophysical Research, Vol. 114, D16105, doi:10.1029/2009JD012029, 2009.

POELMAN, D. R. et al. **The European lightning location system EUCLID – Part 2: Observations**. Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 16, p. 607-616, March 2016.

Portal Brasil. **Brasil é líder mundial na incidência de raios por ano**. Meio Ambiente, 31/10/2016. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2016/10/brasil-e-lider-mundial-na-incidencia-de-raios-por-ano>>. Acesso em: 15 novembro 2016.

Pozzera. **Relação entre Frequência e Comprimento de Onda – Espectro Eletromagnético**. Disponível em: <http://www.pozzera.xpg.com.br/nova_pagina_5.htm>. Acesso em: 17 outubro 2016.

RAKOV, V. A.; DULZON, A. A. **Calculated electromagnetic fields of lightning return stroke**. Tekh. Elektrodinam., vol. 1, p. 87-89, 1987.

RAKOV, V. A.; DULZON, A. A. **A modified transmission line model for lightning return stroke field calculations**. Proceedings of 9th International Symposium on EMC, ETH Zentrum-IKT, p. 229-235, Zurich, Switzerland, 1991.

RAKOV, V.A; UMAN, M. A. **Review and Evaluation of Lightning Return Stroke Models Including Some Aspects of Their Application**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility; Vol. 40, N^o 4, November 1998.

RAKOV, V. A. **Lightning Electric and Magnetic Fields**. in *Proc. of the 13th Int. Zurich Symp. on EMC*, Zurich, Switzerland, pp 561-566, February 16-18, 1999.

RAKOV, V. A. **Characterization of lightning electromagnetic fields and their modeling**. Proceedings of the 14th Int. Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, p. 3-16, Zurich, Switzerland, February, 2001.

RAKOV, V. A.; HUFFINES, G. R. **Return-stroke Multiplicity of Negative Cloud-to-Ground Lightning Flashes**. Journal of Applied Meteorology, Vol. 42, October, 2003.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: Physics and Effects**. New York: Cambridge University Press, 2003.

RAKOV, V. A. **Engineering models of the return stroke**. International Symposium on Lightning Protection, VII. pp. 511-530, Curitiba, Brazil, November, 2003.

RICHARD, P. **Propositions of Methods of Validation of Lightning Localization Systems Performances**. In: Proc. of 24th International Conference on Lightning Protection, p. 156-160, Birmingham, September, 1998.

RISON, W., THOMAS, R. J., KREHBIEL, P. R., HAMLIN, T., and HARLIN, J. **A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: initial observations in central New Mexico**. Geophys. Res. Lett., 26, 3573–3576, 1999.

ROCHA, B. R. P.; SOUZA, J. R. S.; COSTA, M. J. **Electric and Magnetic Fields from Lightning in Belem**. Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo. Ouro Preto: [s.n.], p. 55-58, 1996.

ROMERO, F. **Avaliação do Comportamento dos Campos Eletromagnéticos Gerados por Descargas Atmosféricas Nuvem-Terra**. Dissertação de Mestrado, Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, Fevereiro de 2007.

SÁ, J. A. S.; ROCHA, B. R. P.; PISSOLATO FILHO, J.; MONTEIRO, J. H. A., FROTA, W. M., ALMEIDA, A. C.; SOUZA, J. R. S. **On Cloud-to-Ground Lightning Peak Currents for the Amazon Region Energy Planning**. Proceedings of the International Lightning Protection Association Symposium, 24th-25th November, Valencia, Spain, 2011.

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**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Dezembro, 2011.

SAID, R. K., INAN, U. S.; CUMMINS, K. L. **Long-range lightning geolocation using a VLF radio atmospheric waveform bank**. J. Geophys. Res., 115, D23108, doi:10.1029/2010JD013863, 2010.

SAID, R. K., COHEN, M. B.; INAN, U. S. **Highly intense lightning over the oceans: Estimated peak currents from global GLD360 observations**. J. Geophys. Res.-Atmos., 118, 6905- 6915, doi:10.1002/jgrd.50508, 2013.

SALES, A. B. **Climatologia de dias de tempestades nas principais cidades da região equatorial brasileira e projeções para o futuro**. Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Maio, 2014.

SCHULZ, W., CUMMINS, K., DIENDORFER, G.; DORNINGER, M. **Cloud-to-ground lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning**

location system. J. Geophys. Res., 110, D09101, doi: 10.1029/2004JD005332, 2005.

SCHULZ, W. et al. **The European lightning location system EUCLID – Part 1: Performance analysis and validation.** Natural Hazards and Earth System Sciences, v. 16, p. 595-605, March 2016.

SHINKAI, R. A.; SÁ, J. A. S.; ROCHA, B. R. P. **Deteção Indireta de Descargas Atmosféricas: Um Simulador para Características Regionais.** XIV Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (ISSN 2178-8308), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 03 a 08 de Outubro de 2016. Disponível em: <<http://www.ceel.eletrica.ufu.br/>>.

SOUZA, J. R. S.; ROCHA, B. R. P.; COSTA, J. M.; DUTRA, S. L. G. **Características dos Eventos de Raios Nuvem-Solo e sua Distribuição em Área no Leste do Pará.** Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica. São Paulo: [s.n.], p. 1152-1155, 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 Lightning Protection. São Paulo: [s.n.], p. 17-21, 1999.

SOUZA, W. A. P. **Análise de Desempenho da Rede de Detecção de Raios do SIPAM.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Dezembro, 2009.

STANSFIELD, R. G. **Statistical Theory of DF Fixing.** Journal of the Institute of Electrical Engineers, Part III-A, v. 94, p. 762-770, 1947.

THOMAS, R. J., KREHBIEL, P. R., RISON, W., HUNYADY, S. J., WINN, W. P., HAMLIN, T.; HARLIN, J. **Accuracy of the lightning mapping array.** J. Geophys. Res., 109, D14207, doi:10.1029/2004JD004549, 2004.

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, v. 102, p. 6887-7006, 1997.

Tudo sobre Geoprocessamento. **Espectro Eletromagnético.** 29/06/2011. Disponível em: <http://tudosobregeoprocessamento.blogspot.com.br/2011/06/espectro-eletromagnetico_29.html>. Acesso em: 17 outubro 2016.

UMAN, M. A.; McLAIN, D. K. **Magnetic field of lightning return stroke.** Journal of Geophysical Research, vol. 74, nº 28, p. 6899-6910, 1969.

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

UMAN, M.A. **Lightning.** Dover Publications, Inc., New York – 1984.

UMAN, M. A. **The lightning discharge**. In: Academic Press, Orlando, Florida, 1987.

UMAN, M. A.; KRIDER, E. P. **Natural and Artificially Initiated Lightning**. Science, Vol. 246, p.457-464, 1989.

VAISALA. **The French Air and Space Academy: Awards the “Grand Prix” to the SAFIR System Team**. VAISALA News, v. 156, 2001.

VAN DER VELDE, O.; MONTANYA, J. **Asymmetries in bidirectional leader development of lightning flashes**. J. Geophys. Res.- Atmos., 118, 13504–13519, doi:10.1002/2013JD020257, 2013.

VISACRO, S. **Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem em Engenharia**. 1^a ed. São Paulo: Artiliber Editora Ltda, 2005. 268 p.

VOLLAND, H. **Atmospheric Electrodynamics**. New York, N.Y. Springer-Verlag, 1984.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric Science an Introductory Survey**. Academic Press, 1977, 239p.

WANG, C.; SONG, T. X. **Two numerical methods for calculating electromagnetic fields radiated from nature lightning**. Journal of Electromagnetic Waves and Appl., vol. 19, n^o 4, p. 513-528, 2005.

WILLIAMS, E. R. **The Eletrification of Thunderstorms**. Scientific American, v. 259, n. 5, p. 48-65, Nov. 1988.

WILSON, C.T.R. **Investigation on Lightning Discharges and on the Electric Field of Thunderstorms**. Philosophic Transactions of Royal Society of London, 1920. n^o 221.

APÊNDICE A - Trabalhos utilizando os dados da rede STARNET

- 1) *Lightning Observations During CAPE Experiment BARCA, in Santarem-PA, Brazil. Pompeu, M. M.; Souza, J. R. S.; Mota, M. A. S.; Ribeiro, W. M. N.; Almeida A. C. XIV International Conference on Atmospheric Electricity, August 08-12, 2011, Rio de Janeiro, Brazil;*
- 2) *Lightning Forecast Based on the Hourly Evolution of the Convective Available Potential Energy (CAPE). Sá, J. A. S.; Almeida A. C.; Rocha, B. R. P.; Mota, M. A. S.; Souza, J. R. S. XIV International Conference on Atmospheric Electricity, August 08-12, 2011, Rio de Janeiro, Brazil;*
- 3) *A Case Study of Lightning Occurrences Associated to an Intense Rainstorm Near Belém, PA, Brazil. Pompeu, M. M.; Souza, J. R. S.; Ribeiro, W. M. N., XI International Symposium on Lightning Protection, Fortaleza, Brazil, 03-07 October, 2011;*
- 4) *Lightning Forecast Using Data Mining Techniques on Hourly Evolution of the Convective Available Potential Energy. Sá, J. A. S. et al. 10th Brazilian Congress on Computational Intelligence (CBIC'2011), November 8 to 11, 2011, Fortaleza, Ceará, Brazil;*
- 5) *Evaluation of STARNET lightning detection performance in the Amazon region. Dentel, L. M.; Rocha, B. R. P.; Souza, J. R. S. International Journal of Remote Sensing, Vol. 35, No. 1, p. 115-126, <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2013.862604>, 2013;*
- 6) *Estimativas de Precipitação através das ocorrências de raios na bacia do rio Tocantins. Pompeu, M. M.; Souza, J. R. S.; Ribeiro, W. M. N., Revista Brasileira de Geografia Física, v. 09, n. 04, p. 1007-1016, Agosto, 2016.*