

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Gabriel Luiz Silva Almeida

**MODELO DO LEADER BIDIRECIONAL DE FORMAÇÃO DO CANAL DE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: NOVA METODOLOGIA DE REPRESENTAÇÃO
DO RELEVO DO SOLO E DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE
ATRATIVIDADE DE DESCARGAS POR LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Belo Horizonte

2022

Gabriel Luiz Silva Almeida

**MODELO DO LEADER BIDIRECIONAL DE FORMAÇÃO DO CANAL DE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: NOVA METODOLOGIA DE REPRESENTAÇÃO
DO RELEVO DO SOLO E DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE
ATRATIVIDADE DE DESCARGAS POR LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia de Potência

Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Prof. Silvério Visacro Filho

Belo Horizonte

2022

A447m

Almeida, Gabriel Luiz Silva.

Modelo do leader bidirecional de formação do canal de descargas atmosféricas [recurso eletrônico] : nova metodologia de representação do relevo do solo e desenvolvimento de modelo de atratividade de descargas por linhas de transmissão / Gabriel Luiz Silva Almeida. - 2022.

1 recurso online (89 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Silvério Visacro Filho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 83-89.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Descargas elétricas - Teses.
3. Métodos de simulação - Teses. 4. Linhas de telecomunicação - Teses.
I. Visacro Filho, Silvério. II. Universidade Federal de Minas Gerais.
Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Modelo do Leader Bidirecional de Formação do Canal de Descargas Atmosféricas: Nova Metodologia de Representação do Relevo do Solo e Desenvolvimento de Modelo de Atratividade de Descargas por Linhas de Transmissão"

Gabriel Luiz Silva Almeida

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 25 de fevereiro de 2022.

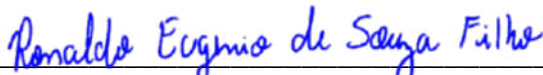
Por:



**Prof. Dr. Silvério Visacro Filho
DEE (UFMG) - Orientador**



**Prof. Dr. Fernando Henrique Silveira
DEE (UFMG)**



**Prof. Dr. Ronaldo Eugênio de Souza Filho
ICT (Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI - Campus de Itabira)**

Agradecimentos

Agradeço

À minha família, pelo esforço capaz de proporcionar a estrutura e tranquilidade necessárias para que eu me dedicasse aos estudos. Sou grato não só pelo apoio fornecido ao longo destes dois anos e meio de trabalho, mas também por todas as etapas que o precederam.

Ao Professor Silvério Visacro Filho pela orientação e por todos os conhecimentos compartilhados que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais professores do LRC: Maria Helena, Fernando Silveira e Alberto de Conti pelos conhecimentos transmitidos durante as disciplinas cursadas.

Aos amigos e colegas de outras épocas e aos que fiz durante o período do mestrado pelo compartilhamento de momentos e pelos incentivos.

Aos colegas Marcelo Arcanjo e Prof. Rosilene Nietzsche Dias pelo auxílio remoto para compreensão dos desenvolvimentos anteriores.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

Este trabalho dá continuidade à construção de um modelo avançado para simulação da formação do canal de descarga atmosférica que vem sendo desenvolvido ao longo dos últimos anos no *Lightning Research Center* (LRC). O modelo é baseado na aplicação da teoria do *leader* bidirecional e utiliza o Método de Simulação de Cargas (MSC) para cálculo das grandezas elétricas envolvidas no processo de formação do canal de descarga atmosférica. As contribuições deste trabalho podem ser divididas em duas etapas. Na primeira etapa é apresentado um novo modelo para a representação do solo por distribuições superficiais de carga posicionadas ao nível do solo e representadas por placas quadradas de espessura nula e dimensões laterais variáveis. Esta modelagem do solo confere maior consistência física aos resultados simulados. A segunda etapa do trabalho consiste na aplicação do modelo para análise de atratividade de linhas de transmissão posicionadas sobre um solo plano quando da incidência de uma descarga atmosférica nas suas proximidades. Uma geometria específica de linha de transmissão foi representada utilizando o MSC, mas o modelo pode ser facilmente replicado para diferentes geometrias e outros tipos de estrutura. Uma série de simulações foi realizada, variando o ponto de projeção do canal e a corrente da descarga. O campo elétrico foi avaliado em pontos de interesse para análise da atratividade da linha de transmissão (torres e cabos) e do solo plano, a partir da determinação do ponto de iniciação do canal ascendente em cada cenário, num processo concorrente.

Palavras-chave: Descargas Atmosféricas. Método de Simulação de Cargas. Modelo de Atratividade de Descargas. Modelo do *Leader* Bidirecional.

Abstract

This work continues the development of an advanced model for simulating the process of formation of a negative cloud-to-ground (CG) lightning leader that has been developed over the last few years at the Lightning Research Center (LRC). The model is based on the bidirectional leader theory and uses the Charge Simulation Method (MSC) to calculate the electrical quantities involved in the CG lightning formation process. The proposals of this work can be divided into two stages. The first one presents a new approach for modeling the relief in which chargers are no longer punctual, but surface charges distributed at flat and squared plates placed at the ground surface. Comparing to early developed works this new methodology is physically more consistent. The second stage presents the development of an attractiveness model for upward positive leader initiation from transmission lines placed over a flat ground when a negative CG lightning is occurring around. A specific transmission line geometry was chosen to be represented in this work, but it is possible to create other structures representations using the MSC. A range of scenarios was simulated varying the leader projection point and current intensity. The electric field was analyzed at some specific points to find the attractiveness of structures (towers and cables) and of the flat ground, allowing to conclude the exact point of upward leader initiation in each scenario.

Keywords: Cloud-to-ground Lightning. Charge Simulation Method. Lightning Attractivity Model. Bidirectional Leader Model.

Sumário

1	Introdução.....	10
1.1	Relevância.....	10
1.2	Objetivos.....	12
1.3	Metodologia.....	12
1.4	Estrutura do texto.....	13
2	Processo físico de formação da descarga negativa e sua modelagem.....	15
2.1	Considerações Iniciais.....	15
2.2	Modelos de formação do Canal de Descarga.....	15
2.2.1	Modelo Clássico de Schonland.....	16
2.2.2	Modelo do leader bidirecional de Kasemir.....	17
2.2.3	Comparação dos modelos de formação do canal.....	18
2.3	Aspectos físicos da descarga negativa nuvem-solo.....	19
2.3.1	O canal negativo descendente (DNL).....	19
2.3.2	Intervalo entre passos do canal descendente.....	21
2.3.3	O canal positivo ascendente (UPL).....	21
2.3.4	Evolução do DNL e do UPL em fase anterior ao attachment.....	22
2.3.5	Velocidade média do DNL e do UPL.....	24
2.4	Grandezas elétricas envolvidas no estudo das descargas atmosféricas.....	24
2.5	Modelo da Nuvem de Tempestade.....	26
2.5.1	Nuvem de tempestade – modelo tripolar.....	26
2.5.2	Nuvem de tempestade – modelo implementado.....	27
2.5.3	Posicionamento vertical da nuvem de tempestade.....	28
2.6	Modelos dos corpos condutores utilizados na simulação.....	29
2.6.1	Modelo do leader.....	29
2.6.2	Modelo de estruturas aterradas.....	30
2.7	Modelos de relevo do solo.....	30

2.8	Utilização do Método de Simulação de Cargas para determinação numérica das grandezas elétricas	31
2.9	Considerações Finais	32
3	Modelo de representação do relevo por distribuições superficiais de carga	33
3.1	Introdução	33
3.2	Construção do modelo de representação do solo por distribuições superficiais de carga.....	34
3.2.1	Levantamento da região de 2km de raio no entorno de MCS e construção das placas de distribuições superficiais de cargas.....	35
3.3	Incorporação do modelo de representação do solo por distribuições superficiais de carga na simulação.....	40
3.3.1	Sistema prévio: simulação da evolução de um canal de descarga atmosférica acima de estruturas representadas por cargas pontuais	41
3.3.2	Sistema modificado: simulação da evolução de um canal de descarga atmosférica acima de estruturas representadas por cargas pontuais e por distribuições superficiais de carga	42
3.3.3	Descrição da simulação computacional.....	43
3.3.4	Resultados: evolução vertical do leader	45
3.3.5	Resultados: propagação diagonal do leader em direção à torre.....	48
3.4	Análise dos resultados	51
3.4.1	Comparação entre os valores de striking distance obtidos pelo novo modelo de representação do solo por cargas superficiais e os resultados obtidos pelo modelo de cargas profundas	51
3.4.2	Considerações a respeito da tridimensionalidade do canal	54
3.4.3	Comparação entre os valores de striking distance obtidos pelo novo modelo e estimativas por equações conhecidas	56
3.5	Considerações Finais	58
4	Análise de Atratividade de Descargas por Linhas de Transmissão	59
4.1	Introdução	59

4.2	Representação da linha de transmissão pelo MSC	59
4.2.1	Representação da torre central.....	61
4.2.2	Representação das torres adjacentes.....	62
4.2.3	Representação dos cabos	63
4.2.4	Objeto auxiliar	65
4.3	Análise de Atratividade	66
4.3.1	Relação entre carga transferida e corrente de retorno	68
4.4	Resultados	72
4.4.1	Caso Base – Carga Transferida: 6,13 C.....	73
4.4.2	Carga Transferida: 1,28 C	74
4.4.3	Carga Transferida: 3,18 C	74
4.4.4	Carga Transferida: 10,58 C	75
4.4.5	Carga Transferida: 16,22 C	76
4.4.6	Carga Transferida: 21,02 C	77
4.5	Análise dos resultados	78
4.6	Considerações Finais	79
5	Conclusões	80
5.1	Considerações Iniciais	80
5.2	Conclusões Gerais.....	80
5.2.1	Modelo de representação do solo	80
5.2.2	Análise da atratividade	81
5.3	Propostas de continuidade.....	81
6	Referências Bibliográficas	83

1 Introdução

1.1 Relevância

De acordo com Visacro [1], a descarga atmosférica, popularmente conhecida como raio, é definida como uma intensa descarga elétrica que acontece na atmosfera. A manifestação da descarga atmosférica se dá na forma de uma corrente de alta intensidade e curta duração que flui através de um percurso da ordem de alguns quilômetros partindo da nuvem e, em alguns casos, atingindo a superfície da Terra. O fluxo da corrente pelo canal de descarga gera elevadas temperaturas na ordem de 3000 °C resultando em um efeito luminoso intenso (relâmpago) e o deslocamento de uma onda sonora devido à expansão da massa de ar circunvizinha ao canal (trovão).

Ainda de acordo com Visacro [1], os efeitos das descargas atmosféricas podem gerar destruição, incêndio e até mesmo morte. Os efeitos mais graves ocorrem quando da incidência direta da descarga em prédios, estruturas, sistemas elétricos e seres vivos e sua gravidade está associada à potência elétrica dissipada pelo percurso que a corrente realiza pela vítima.

Além da gravidade dos efeitos, as descargas atmosféricas guardam uma complexidade física. Visando soluções para problemas decorrentes da incidência de descargas, ainda na década de 1980 foi iniciada uma parceria entre equipes da UFMG e da Cemig para caracterizar descargas atmosféricas e a resposta transitória dos aterramentos elétricos. O trabalho de investigação iniciado na década de 1990 culminou na constituição do Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas, ou *Lightning Research Center* (LRC). Atualmente, o LRC conta com a Estação do Morro do Cachimbo (MCS), localizada nas proximidades de Belo Horizonte – MG, dedicada à medição de correntes de raios, campo elétrico, luminosidade e gravação de vídeos obtidos por câmeras de alta velocidade das descargas incidentes na torre

instrumentada. O resultado do projeto cooperativo entre UFMG e Cemig fez do LRC referência mundial na pesquisa teórica e aplicada sobre raios, seus efeitos e técnicas de proteção.

Os avanços tecnológicos permitiram a obtenção de registros simultâneos de corrente elétrica, campo elétrico e vídeos de alta velocidade obtidos por câmera ultrarrápida em diversas estações e centros de pesquisa no mundo e os avanços computacionais permitiram a realização de simulações que visam facilitar a compreensão e visualização do fenômeno físico. No entanto, as descargas atmosféricas são um fenômeno físico de alta complexidade e, apesar de todos os contínuos avanços ocorridos nas últimas décadas, ainda se caracterizam como um tema sem compreensão plena.

A constituição do LRC possibilitou o desenvolvimento de trabalhos relevantes associados ao tema de descargas atmosféricas. As primeiras análises referentes às medições obtidas na Estação Morro do Cachimbo foram publicadas por Visacro *et al.* [2] e posteriormente resultados consolidados foram publicados por Visacro *et al.* [3] e Visacro *et al.* [4] contendo registros de corrente das descargas negativas nuvem-solo. Os resultados mais recentes contendo estatísticas de 51 descargas medidas em MCS foram publicados por Silveira e Visacro [5].

Em uma etapa posterior, foi instalado um sistema de medição do campo elétrico em MCS, o que possibilitou novos desenvolvimentos no estudo das descargas. Pela primeira vez foram detectadas componentes M em primeiras correntes de retorno, conforme reportado por Visacro *et al.* [6]. Guimarães *et al.* [7] apresentaram os primeiros resultados de descargas ascendentes em regiões tropicais, contendo registros sincronizados de campo elétrico, corrente e vídeo gravado por câmera ultrarrápida.

A Estação Morro do Cachimbo foi modernizada ao longo dos anos o que possibilitou ampliar a taxa de gravação de vídeos de incidência de descargas na torre instrumentada e melhorar o sistema de medição do campo elétrico. Os trabalhos apresentados por Guimarães [8], Visacro *et al.* [9] e Visacro *et al.* [10] contribuem significativamente para a interpretação física dos processos associados ao evento. Resultados contendo os valores de campo elétrico nas proximidades da estrutura aterrada quando da iniciação do canal ascendente durante a ocorrência de uma descarga negativa nuvem-solo foram publicados por Guimarães *et al.* [11].

Uma ferramenta computacional para representar a formação de descargas atmosféricas utilizando o modelo do *leader* bidirecional e o Método de Simulação de Cargas foi desenvolvida por Louro [12]. O trabalho de Arcanjo [13] apresentou incrementos à esta ferramenta e analisou novos resultados obtidos. Esta dissertação dá continuidade à modelagem do processo, com correspondentes aprimoramentos da ferramenta computacional que a implementa.

1.2 Objetivos

O primeiro objetivo deste trabalho consiste no aprimoramento do modelo e respectiva ferramenta computacional desenvolvida para avaliação da evolução das grandezas elétricas associadas ao processo de formação do canal da descarga atmosférica. A ferramenta deve permitir a avaliação do campo elétrico ao nível do solo nas proximidades do ponto de incidência da descarga e nas proximidades da estrutura aterrada. No entanto, os trabalhos anteriores aplicaram uma representação simplificada do solo, que pode comprometer os resultados do modelo. Este trabalho visa desenvolver e apresentar uma nova metodologia para representação do solo com maior exatidão.

Um segundo objetivo consiste em aplicar a ferramenta computacional na análise de atratividade de descargas por linhas de transmissão.

1.3 Metodologia

Inicialmente realizou-se uma revisão da bibliografia disponível para o tema, tomando Mazur e Ruhnke [14] como referência básica e as dissertações de Arcanjo [13] e Louro [12] como ponto de partida para aprofundamento e novas implementações. Foi realizado também um estudo sobre os aspectos físicos envolvidos na formação do canal de descarga, de forma a subsidiar propostas de representação fiel dos componentes envolvidos na modelagem do processo de formação do canal, com consistência física. Complementarmente, foram analisados os desenvolvimentos computacionais de implementação do modelo já desenvolvidos em trabalhos anteriores da equipe de pesquisa do LRC.

Na sequência, foram desenvolvidos novos modelos de representação dos componentes e as correspondentes implementações computacionais foram agregadas aos programas existentes. A ferramenta computacional aprimorada foi aplicada

sistematicamente em testes de consistência, que consideraram resultados experimentais obtidos por medição no Morro do Cachimbo e resultados teóricos obtidos em trabalhos anteriores. Após ter sido atestada a consistência física do modelo computacional este foi aplicado às condições analisadas ao longo deste trabalho para gerar resultados de interesse prático.

1.4 Estrutura do texto

Esta dissertação está organizada em seis capítulos, incluindo esta introdução, que apresenta uma visão geral do trabalho desenvolvido.

No **Capítulo 2**, realiza-se uma revisão bibliográfica contendo os principais modelos de formação do canal de descarga atmosférica, as contribuições de trabalhos recentes para o assunto. É apresentada uma descrição dos processos físicos relativos à descarga nuvem-solo e a respeito da medição do campo elétrico ao nível do solo.

No **Capítulo 3**, é apresentada uma nova modelagem para descrever o relevo do solo na implementação computacional. O relevo do solo não é mais representado por cargas pontuais posicionadas a uma certa profundidade, mas sim por distribuições superficiais de carga posicionadas ao nível do solo. A nova modelagem confere maior robustez e exatidão aos resultados. São apresentadas as etapas para construção deste novo modelo de solo, a incorporação deste aos desenvolvimentos prévios utilizando o Método de Simulação de Cargas e os resultados obtidos. São apresentadas as análises para os resultados obtidos e as considerações finais.

No **Capítulo 4**, é apresentado um modelo para análise de atratividade de descargas atmosféricas por linhas de transmissão. Uma linha de transmissão é representada em solo plano com a utilização do Método de Simulação de Cargas e são apresentados resultados da simulação do campo elétrico em pontos de interesse quando da incidência do canal em uma série de locais nas proximidades da linha. Os dados obtidos permitem inferir o ponto no qual acontecerá a iniciação do canal ascendente. São apresentadas as análises para os resultados obtidos e as considerações finais.

As conclusões deste trabalho são apresentadas no **Capítulo 5** e consistem em uma revisão geral dos desenvolvimentos apresentados ao longo do trabalho, suas contribuições e propostas de continuidade.

As referências bibliográficas citadas ao longo do texto estão listadas em ordem alfabética ao final da dissertação.

2 Processo físico de formação da descarga negativa e sua modelagem

2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo visa descrever as contribuições que possibilitaram o desenvolvimento de uma simulação computacional capaz de representar o processo de formação de uma descarga negativa nuvem-solo. Estas contribuições teóricas, bem como as contribuições advindas de medições de campo elétrico e simulações computacionais previamente desenvolvidas são as premissas para os desenvolvimentos apresentados no decorrer deste trabalho.

2.2 Modelos de formação do Canal de Descarga

A literatura conta com diferentes modelos para a formação de um canal de descarga atmosférica. Esta seção apresenta os dois modelos atualmente mais difundidos: o chamado Modelo Clássico (Schonland) e o chamado Modelo do *Leader* Bidirecional (Kasemir).

Ambos os modelos discutem a evolução do chamado *leader*, que é o canal precursor da descarga. Trata-se de um caminho condutor formado entre a nuvem e a superfície do solo. A evolução do *leader* se dá por passos a partir de disrupções que ocorrem no ar. São acumuladas cargas elétricas neste corpo condutor e quando o *leader* se conecta com o solo (*attachment*), flui a corrente de retorno, uma vez que o potencial

nulo do solo é levado para o centro da nuvem de tempestade conforme descrevem Rakov e Uman [15] e Visacro [1].

2.2.1 Modelo Clássico de Schonland

O Modelo Clássico foi apresentado por Schonland [16], trabalho que sintetiza os resultados de três artigos escritos por Schonland e Collens [17], Schonland *et al.* [18] e por Malan e Collens [19].

O modelo assume que a propagação do *leader* ocorre de forma unipolar e unidirecional. De acordo com Schonland, na nuvem de tempestade encontram-se regiões chamadas centros de carga, que consistem em acúmulos de cargas elétricas que transferem as cargas que são acumuladas no canal. Admitiu-se que o processo de formação da descarga é semelhante às descargas geradas por eletrodos, utilizando a teoria da ionização dos gases para explicar o desenvolvimento do canal a partir de um cátodo (polo negativo) ou ânodo (polo positivo).

Schonland identificou em suas observações que durante a descarga ocorre uma transferência de cargas negativas para o solo, responsável pela mudança do sinal do campo elétrico ao nível do solo. Foi observado também que o evento completo da descarga atmosférica compreende duas etapas: a chamada fase do desenvolvimento do *leader* nuvem-solo é o conjunto de sucessivas descargas parciais, com o acúmulo de cargas negativas no corpo do *leader* e suas ramificações e carga positiva induzida no solo; e a chamada fase da descarga de retorno solo-nuvem, que ocorre após a conexão do canal da descarga com o solo e consiste na transferência de cargas negativas da nuvem para o solo.

Conforme apresentado por Arcanjo [13] e Louro [12], o processo introduzido por Schonland [16] é resumido pela Figura 2.1. O passo 1 representa a fase do *leader*, a carga negativa é distribuída do centro de cargas da nuvem para as extremidades do canal e suas ramificações. O passo 2 apresenta a concentração de cargas positivas induzidas no solo devido à presença de um campo elétrico mais intenso, o canal ascendente é iniciado na direção solo-nuvem. O passo 3 representa a transferência de cargas negativas para o solo, que acontece após a conexão dos canais ascendente e descendente (*attachement*).

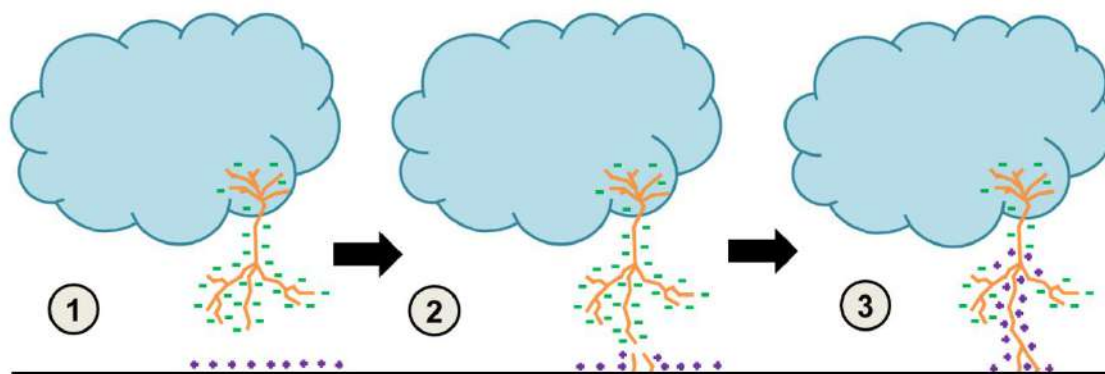


Figura 2.1- Evolução do canal de descarga segundo o modelo clássico. Adaptado de Louro [12].

2.2.2 Modelo do leader bidirecional de Kasemir

O principal referencial teórico para os desenvolvimentos e aplicações apresentados ao longo deste trabalho é o Modelo do *Leader* Bidirecional, introduzido por Kasemir [20] e [21] e respaldado pela teoria eletrostática.

O canal tem sua origem em uma disrupção na região de maior intensidade de campo elétrico no interior da nuvem de tempestade. Essa disrupção constitui um *leader* bipolar, bidirecional com carga líquida total nula. A distribuição de cargas no *leader* é governada pelo potencial elétrico do ambiente ao seu redor. As cargas liberadas pelos processos disruptivos tendem a ser depositadas nas extremidades do *leader*, sendo as cargas positivas depositadas na extremidade superior e as negativas na extremidade inferior. O campo elétrico é intensificado com a deposição destas novas cargas e sua sobreposição ao campo elétrico de fundo determina, ou não, a extensão do *leader* em ambas as direções. A propagação da parte superior (positiva) do *leader* é contínua, enquanto a parte inferior (negativa) propaga-se por passos.

Posteriormente, Kasemir [22] verificou a incompatibilidade entre os tempos de deslocamento dos íons na nuvem em direção ao *leader* em evolução com os tempos muito mais curtos envolvidos na formação do canal de descarga e isto desqualificou a abordagem de Schonland [16].

O modelo do *leader* bidirecional não coleta cargas da nuvem, as cargas positivas (íons positivos) e as cargas negativas (elétrons) são produzidas por ionização a partir dos processos disruptivos que ocorrem nas extremidades do canal, conforme apontado por Mazur e Ruhnke [23]. A Figura 2.2 apresenta graficamente as condições apresentadas por Kasemir [22]. As partes (a) e (b) correspondem a uma descarga negativa nuvem-solo,

respectivamente enquanto do desenvolvimento do canal bidirecional e no instante antecessor ao *attachment*. As partes (c) e (d) correspondem a uma descarga intranuvem, respectivamente no início e no final de sua propagação.

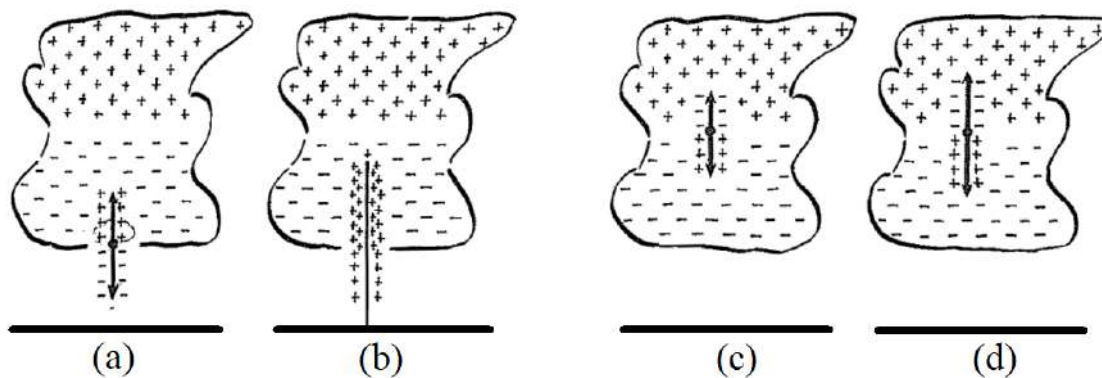


Figura 2.2 - Distribuições de cargas: (a) e (b) em uma descarga negativa nuvem-solo; (c) e (d) em uma descarga intranuvem. Adaptado de Kasemir [22].

Estudos mais recentes corroboram a validade do modelo do *leader* bidirecional. Canais bidirecionais foram observados próximos a um canal previamente estabelecido em análises de câmeras de vídeo de alta velocidade publicadas por Warner *et al.* [24] e pôde-se perceber as diferenças de propagação das extremidades positiva e negativa do canal. Outros trabalhos recentes mostram a natureza bidirecional da evolução do *leader*: Velde e Montanya [25]; Tran e Rakov [26].

2.2.3 Comparação dos modelos de formação do canal

Foi apresentada por Louro [12] uma comparação entre o modelo clássico e o modelo do *leader* bidirecional a fim de resumir as principais ideias de cada modelo. A Tabela 2.1 apresenta os pontos mais relevantes para as etapas de formação e evolução do canal.

A diferença na distribuição de cargas em um *leader* no seu estágio inicial pode ser observada pela Figura 2.3. Em (a) observa-se o modelo do *leader* bidirecional, no qual a distribuição de cargas é nula em seu ponto de origem e aumenta em direção às extremidades do volume condutor, sendo a parte superior positiva e a parte inferior negativa. Neste modelo o canal é eletricamente neutro. Em (b) observa-se a distribuição unipolar de carga líquida diferente de zero, conforme proposto pelo modelo clássico.

Tabela 2.1 - Resumo comparativo das principais ideias propostas pelos modelos originais de formação e evolução do canal da descarga atmosférica. Adaptada de Louro [12].

Modelo Clássico (Modelo de Schonland)	Modelo do <i>leader</i> bidirecional (Modelo de Kasemir)
Descarga com início unidirecional e no interior do centro de cargas e similar à formada por eletrodos	Descarga com origem bidirecional, cujo início se dá no ponto de maior intensidade de campo elétrico no ambiente e com formação do tipo “sem eletrodos”
Canal com distribuição unipolar de cargas	Canal com distribuição bipolar de cargas
Desenvolvimento do canal a partir do contínuo depósito de cargas da fonte (centro de cargas) para o canal	A diferença de potencial do canal com o ambiente define a distribuição de cargas do canal e se este progredirá
Soma líquida das cargas no canal diferente de zero	Soma líquida nula de todas as cargas no canal

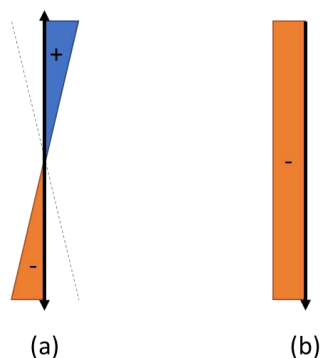


Figura 2.3 – Representação das distribuições de cargas conforme descrito: (a) pelo modelo do *leader* bidirecional [20]; (b) pelo modelo clássico, unidirecional [16].

2.3 Aspectos físicos da descarga negativa nuvem-solo

Esta seção discute os aspectos físicos relativos à propagação de canais de uma descarga atmosférica nuvem-solo. É apresentada uma revisão teórica em trabalhos recentemente desenvolvidos no tema e são apresentadas definições e siglas utilizadas posteriormente neste trabalho.

2.3.1 O canal negativo descendente (DNL)

É denominada como *Downward Negative Leader* (DNL) a porção inferior do *leader* bipolar flutuante. O canal negativamente carregado é responsável por determinar a macrorregião de incidência da descarga e por intensificar o campo elétrico ao nível do solo e das estruturas aterradas. A elevação do campo elétrico pode ser tal que é iniciado

um canal ascendente positivo, ou *Upward Positive Leader* (UPL), que determina o ponto exato de incidência da descarga. Eventualmente a evolução dos canais culminará na conexão de ambos conforme apontado por Visacro [1].

Em um momento anterior ao desenvolvimento do DNL são verificadas a formação de corpos de plasma flutuantes, denominados *stems*, à frente da região de corona já existente do canal negativo conforme apresentado por Biagi [27] e Hill *et al.* [28]. Estas observações corroboram com resultados de experimentos laboratoriais apresentados por Bazelyan e Raizer [29] sobre a extensão de canais negativos. Tais observações permitiram Hill *et al.* [28] apresentar um modelo de propagação do DNL nas descargas atmosféricas, tal modelo encontra-se representado na Figura 2.4.

De acordo com o esquema apresentado pela Figura 2.4 pode-se observar a formação de segmentos luminosos flutuantes, cujos comprimentos variam entre 1 m e 4 m, cerca de 1 m a 10 m à frente da região de corona previamente existente no canal negativo já estabelecido, conforme reportado por Biagi *et al.* [30]. Dentro de uma janela de 1 μ s observa-se: (1) o canal negativo previamente em desenvolvimento; (2) um canal flutuante, precedido por *stems* é estabelecido à frente do DNL; (3) o estabelecimento de uma região de corona entre o canal flutuante e o DNL; (4) a conexão entre o canal flutuante e o DNL; e (5) a propagação de uma onda luminosa na parte inferior do canal com a consolidação da conexão entre os canais.

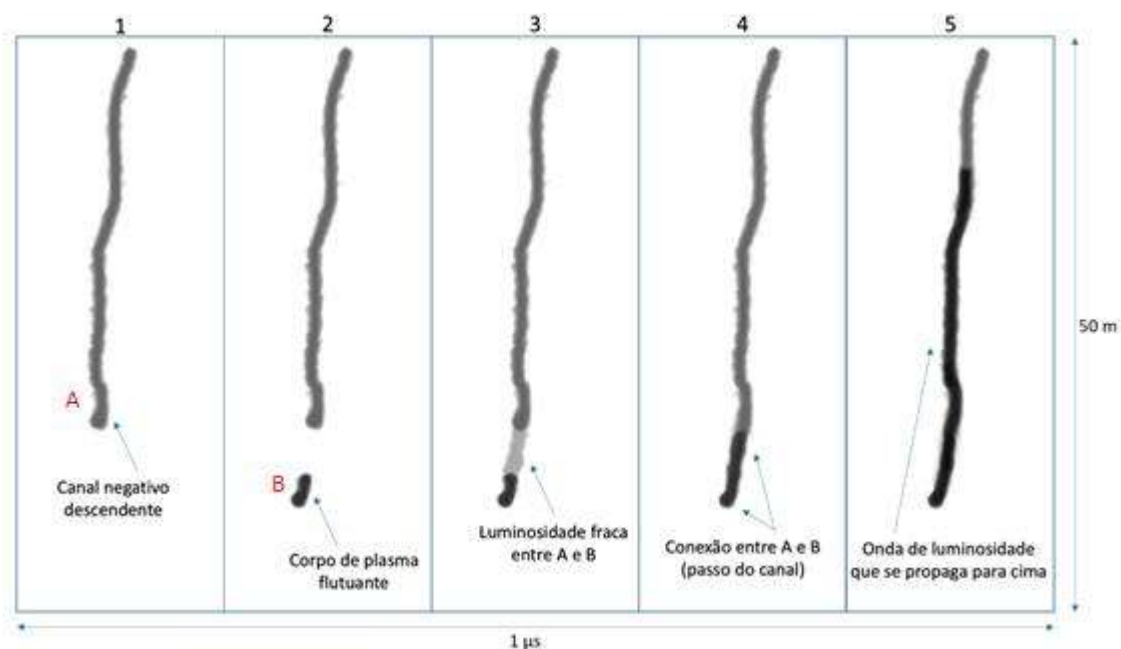


Figura 2.4 - Modelo de propagação por passos do canal negativo. Adaptado de Hill *et al.* [28].

2.3.2 *Intervalo entre passos do canal descendente*

Conforme previamente apresentado, o canal negativo descendente expande-se por disrupções abruptas. O intervalo entre estes passos pode ser definido como o tempo médio transcorrido entre cada expansão do canal. A evolução tecnológica proporcionou melhores resoluções e taxas de aquisição nas câmeras ultrarrápidas utilizadas para registro de raios e os registros visuais adquiriram maior qualidade de imagem e menores intervalos entre frames, atingindo a ordem de dezenas de microssegundos.

Alguns trabalhos como os de Hill *et al.* [28], Biagi *et al.* [31] e Qi *et al.* [32] contribuíram com registros de vídeo da propagação do canal descendente e pôde-se avaliar o intervalo médio entre passos variando entre $13 \mu s$ e $18 \mu s$. Em MSC observou-se os pulsos de corrente induzidos na torre quando da formação do canal descendente e verificou-se um intervalo entre passos variando de $40 \mu s$ a $50 \mu s$. Posteriormente Arcanjo *et al.* [33] realizou uma descontaminação nos dados de corrente e obteve um intervalo médio de $39 \mu s$ entre os passos.

Tendo em vista a discussão apresentada, Arcanjo [13] adotou o intervalo de tempo aproximado entre passos do DNL o valor de $50 \mu s$, e sua velocidade igual a $0,2 m/\mu s$. Esta definição será mantida nas simulações apresentadas ao longo deste trabalho.

2.3.3 *O canal positivo ascendente (UPL)*

Alguns pesquisadores verificaram que, diferentemente do desenvolvimento do DNL, a propagação do *upward positive leader* (UPL), ou canal positivo ascendente, se dá de forma contínua e sem variações abruptas de geometria. O desenvolvimento contínuo do canal ascendente se dá pelo aumento da temperatura na ponta do canal devido ao confinamento das bases de diversos *streamers* neste espaço. Esta interpretação é pautada por uma série de trabalhos recentes: Bazelyan e Raizer [34]; Rakov e Uman [15]; Mazur [35]. No entanto, alguns pesquisadores clamam que a propagação do UPL seja também por passos, embora não haja evidências consistentes para tal hipótese.

De acordo com Visacro *et al.* [9], a elevação do campo elétrico nas extremidades das estruturas aterradas pode gerar o efeito Corona: liberação de íons positivos nas extremidades da estrutura. Esta camada de cargas tenderá a reduzir a intensidade do campo elétrico no entorno da estrutura. No entanto, com a continuidade da evolução do canal descendente o campo elétrico continua sofrendo variações à medida que este se

aproxima, fornecendo energia adicional suficiente para que este efeito seja superado e ocorra a iniciação do canal ascendente positivo.

Quando observados os perfis de corrente durante a fase inicial de um canal ascendente observa-se a existência de pulsos unipolares de corrente superpostos a uma corrente contínua medida. Alguns autores defendem que estes pulsos se devem a uma suposta propagação por passos do canal ascendente. Por outro lado, quando o canal ascendente não é induzido por eventos próximos, não são detectados tais pulsos de corrente. Desta maneira, pode-se interpretar que os pulsos de corrente devem ser relacionados aos efeitos induzidos que os canais descendentes negativos causam nas estruturas aterradas conforme apontado por Arcanjo [13].

Caso a existência dos pulsos induzidos de corrente fosse atribuída aos canais ascendentes positivos, as mesmas características de propagação por passos deveriam ser notadas, conforme observado por Visacro *et al.* [9]. No entanto observa-se propagação de forma contínua. As variações de luminosidade ao longo do canal ascendente e a detecção de pulsos magnéticos e pulsos irradiados de campo elétrico também não sustentam a hipótese de evolução por passos, uma vez que podem ser originários tanto da corrente induzida no canal ascendente quanto da corrente que flui no canal descendente quando do surgimento de novos passos.

Pulsos de campo elétrico foram observados por Saba *et al.* [36] em registros correspondentes à incidência de descargas positivas, na fase precedente ao *attachment*. Registros sincronizados de vídeo apontaram que tais pulsos tem sua origem no canal ascendente negativo iniciado da estrutura aterrada.

2.3.4 Evolução do DNL e do UPL em fase anterior ao attachment

Os registros visuais e elétricos obtidos em MCS e as análises anteriormente reportadas na literatura permitiram que Visacro *et al.* [9] produzisse um modelo esquemático para representação da evolução dos canais descendente negativo e ascendente positivo em fase anterior ao *attachment*. Conforme ilustrado pela Figura 2.5.

A Figura 2.5 permite compreender o desenvolvimento dos canais de descarga. O estágio inicial (a) é percebido apenas pela existência de pulsos de corrente induzidos na estrutura aterrada. Em (b), quando a extremidade da estrutura atinge um valor crítico de campo elétrico flui uma corrente de baixa intensidade sinalizando o desenvolvimento de

filamentos de corona na estrutura. Em (c) quando surgem pulsos de corrente e a componente contínua excede o limiar de 4 A ocorre a formação inicial do canal ascendente. O canal ascendente é imperceptível até que os pulsos de corrente superem o limiar de 50 A, conforme apresentado em (e). O canal ascendente continua se desenvolvendo (f-j) até que a componente contínua seja suficiente para que este se mantenha visível sem a necessidade dos pulsos induzidos pelo canal descendente (m).

A variação em degraus do campo elétrico lento ilustra a propagação por degraus do canal descendente, enquanto o campo elétrico rápido apresenta pulsos a cada variação detectada.

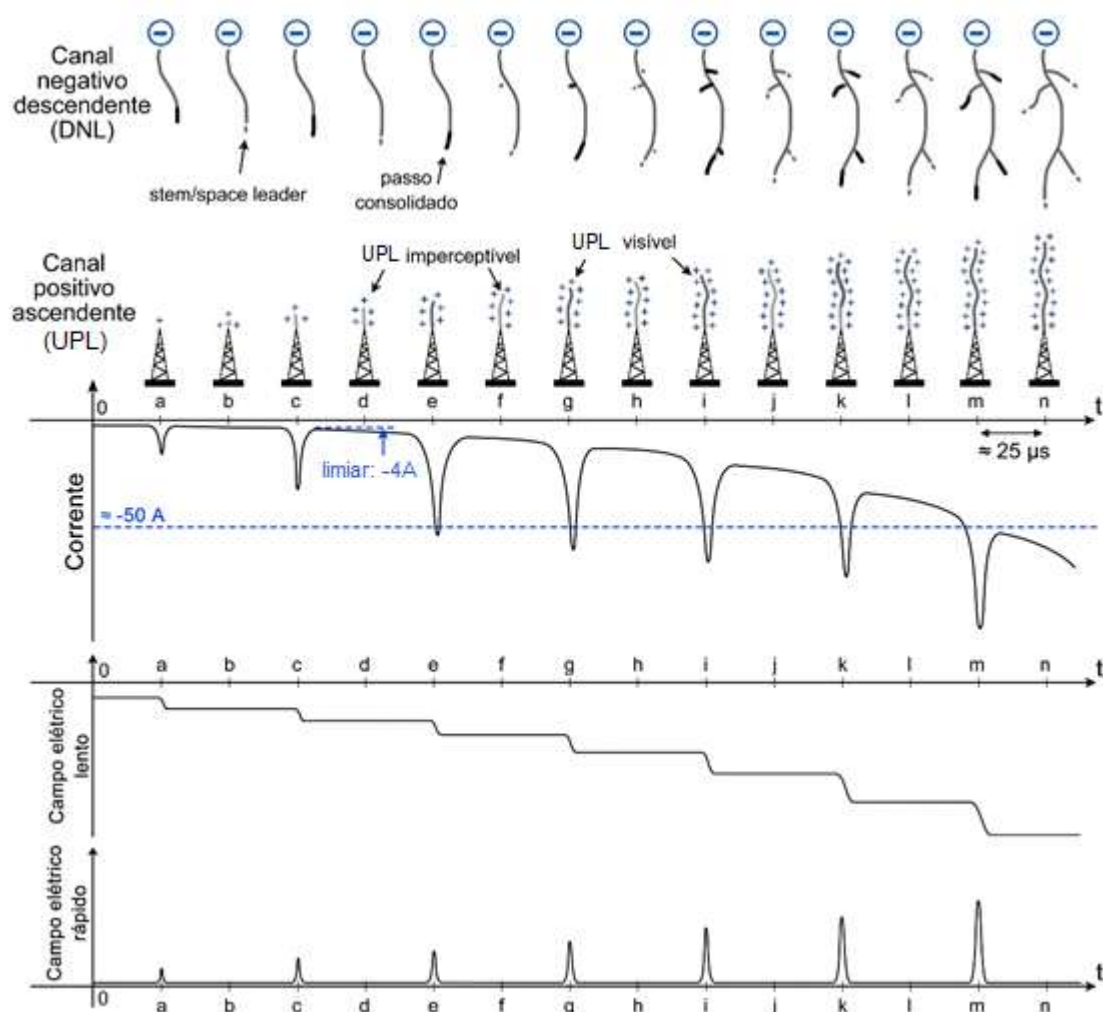


Figura 2.5 - Propagação dos canais negativo e positivo da descarga – representação esquemática. Adaptado de Visacro *et al.* [9].

2.3.5 Velocidade média do DNL e do UPL

As implementações realizadas por Arcanjo [13] utilizadas ao longo deste trabalho levam em conta não só o modo de propagação dos canais, mas também a velocidade média de cada um. Foram consideradas observações de três eventos na Estação Morro do Cachimbo e analisadas de forma bidimensional por Guimarães [8] e um quarto evento reportado por Visacro *et al.* [37].

A velocidade média do canal é obtida aproximadamente 500 μs antes da ocorrência do *attachment*, quando o canal já se encontra relativamente próximo da torre instrumentada. Conforme valores apresentados na Tabela 2.2 os quatro eventos apresentam uma média de 0,24 $\text{m}/\mu\text{s}$ para o canal descendente e 0,12 $\text{m}/\mu\text{s}$ para o canal ascendente. Os valores reportados são compatíveis com outros disponíveis na literatura, como Campos [38] e Saba *et al.* [39] que observaram velocidades média de 0,22 $\text{m}/\mu\text{s}$ para o DNL e velocidades variando entre 0,05 $\text{m}/\mu\text{s}$ e 0,07 $\text{m}/\mu\text{s}$ para o canal ascendente.

Tabela 2.2 – Velocidades médias bidimensionais de propagação dos canais obtidas a partir de observações de vídeo em MCS. Adaptado de Arcanjo [13].

Evento ¹	Velocidade média do canal descendente (DNL) ($\text{m}/\mu\text{s}$)	Velocidade média do canal ascendente (UPL) ($\text{m}/\mu\text{s}$)
<i>Flash</i> 16 - 08/05/2015	0,24	0,06
<i>Flash</i> 17 - 25/02/2016	0,24	0,10
<i>Flash</i> 18 - 25/02/2016	0,23	0,16
<i>Flash</i> 20 - 03/02/2018	0,29	0,14

¹O *Flash* 19 não apresenta registro de vídeo

2.4 Grandezas elétricas envolvidas no estudo das descargas

atmosféricas

O campo elétrico ao nível do solo é o principal parâmetro de observação para medição e detecção de atividade atmosférica. O perfil de evolução deste campo reflete os processos de formação de descargas.

O campo elétrico pode ser facilmente medido ao nível do solo com a utilização de equipamentos como o *field mill*, capaz de monitorar os valores absolutos de campo

elétrico no ambiente. Pode-se utilizar também antenas do tipo *whip* ou *plate*, capazes de medir variações rápidas de campo elétrico. As variações rápidas do campo elétrico são tipicamente associadas à ocorrência de descargas atmosféricas conforme descrito por Guimarães [8]. Pode-se utilizar também balões instrumentados e aviões para medição do campo elétrico no interior das nuvens, no entanto esta é uma tarefa mais complexa conforme apontado por Rakov e Uman [15].

Uma caracterização do campo elétrico de descargas negativas nuvem-solo foi apresentada por Uman [40]. O processo foi dividido em três fases de campo elétrico observáveis nos momentos anteriores ao desenvolvimento da descarga. Cada fase é associada a uma etapa de formação do *leader*. As fases podem ser observadas pela Figura 2.6 e o perfil de campo elétrico é denominado BIL. A **fase B** (*breakdown*) diz respeito à disrupção inicial no interior da nuvem de tempestade que proporciona o início da propagação do canal; a **fase I** (*intermediate*) refere-se à etapa intermediária na qual observa-se uma lenta variação do campo elétrico durante a propagação do canal no interior da nuvem; e a **fase L** (*leader*) designa a propagação do canal na região externa à nuvem e pode-se observar maiores alterações no campo elétrico. A interpretação da figura considera a convenção atmosférica, portanto, um campo que aponta para cima é considerado negativo.

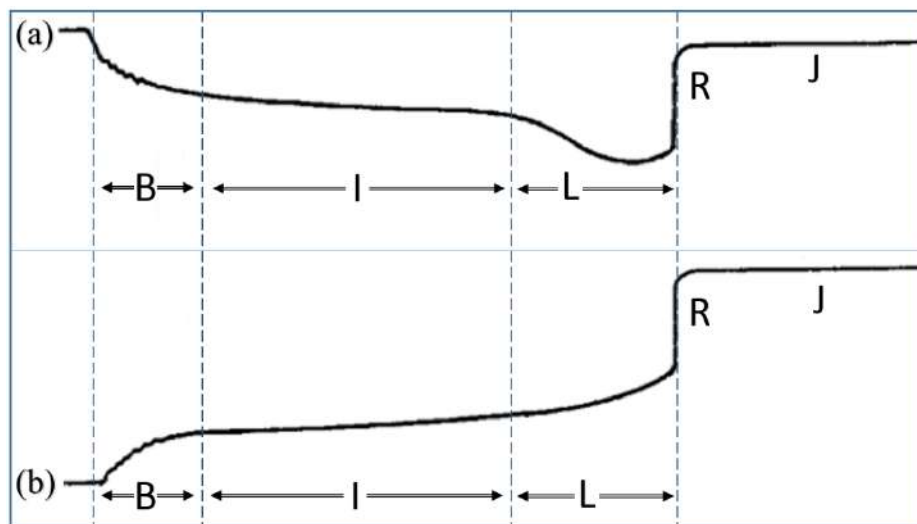


Figura 2.6 - Perfil de campo elétrico ilustrando as fases típicas BIL de uma descarga negativa descendente a uma distância representativa de (a) 2 km e (b) 5 km, segundo a convenção atmosférica. Adaptado de Uman [40].

Posteriormente à etapa de formação do canal, a **fase R** (*return stroke*) corresponde ao período no qual ocorre a corrente de retorno e a **fase J** corresponde à variação lenta do campo elétrico após o fluxo da corrente de retorno. O comportamento do campo elétrico

pode sofrer uma inversão a partir de uma certa distância, conforme observado entre as partes (a) e (b) da Figura 2.6.

2.5 Modelo da Nuvem de Tempestade

Um modelo robusto para uma nuvem de tempestade deve ser capaz de reproduzir com fidelidade os valores de campo elétrico na atmosfera que possibilitam a iniciação e o desenvolvimento do canal de descarga. A nuvem é modelada basicamente pela distribuição espacial e intensidade das cargas. Os modelos disponíveis, em sua maioria, foram elaborados a partir da determinação de valores de campo elétrico por meio de sondagens realizadas com balões. Dentre os modelos disponíveis na literatura técnica observa-se um significativo desvio entre os resultados das medições dentro das nuvens de tempestades como os resultados apresentados por Stolzenburg e Marshall [41] e por Karunarathna *et al.* [42], no entanto há uma característica comum: a natureza tripolar da estrutura de cargas da nuvem de tempestade conforme apresentado por Mazur e Ruhnke [23].

A Equação (3.1) descreve o campo elétrico produzido a uma distância r da carga elementar Q presente no interior da nuvem de tempestade. A constante ε é a permissividade do meio e, no caso do ar, vale $8,85 \times 10^{-12} F/m$.

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi \varepsilon r^2} \hat{r} \quad [V/m] \quad (3.1)$$

2.5.1 Nuvem de tempestade – modelo tripolar

O modelo desenvolvido por Rakov e Uman [15] representa três centros de carga (Q_P, Q_N e Q_{LP}) posicionados com uma separação vertical e horizontalmente alinhados, conforme as alturas H_P, H_N e H_{LP} . A polaridade de cada centro de carga é representada pela Figura 2.7.

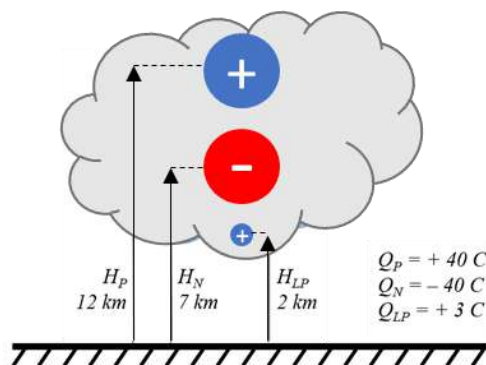


Figura 2.7 – Modelo tripolar de nuvem. Adaptado de Rakov e Uman [15].

2.5.2 Nuvem de tempestade – modelo implementado

O modelo de nuvem de tempestade utilizado neste trabalho foi implementado por Louro [12] e utiliza do modelo final de nuvem de tempestade apresentado por Mazur e Ruhnke [14] no qual a nuvem é representada por distribuições cilíndricas e uniformes de carga. A estrutura foi implementada conforme ilustração da Figura 2.8, observa-se simetria axial, o diâmetro e a extensão vertical são iguais a 10 km.

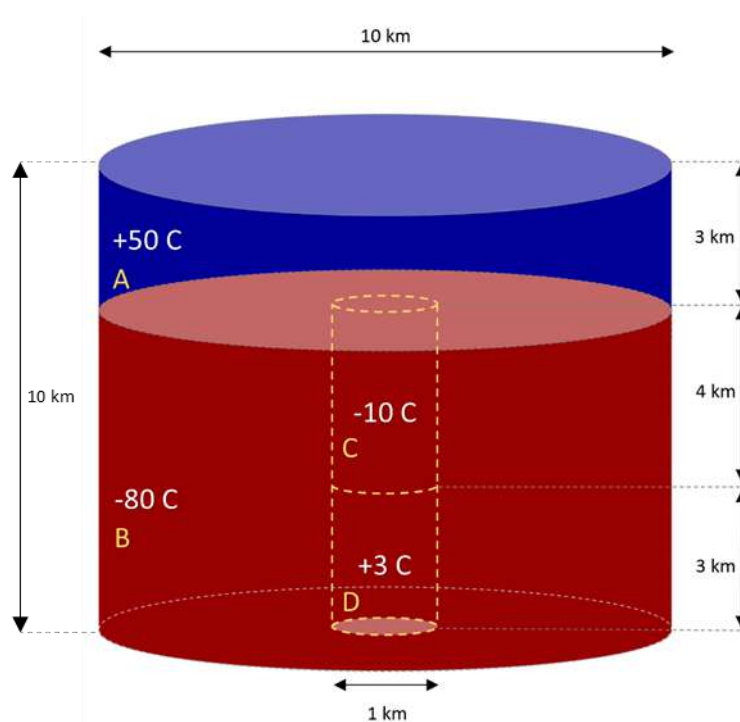


Figura 2.8 – Representação esquemática da estrutura cilíndrica da nuvem de tempestade. O desenho está fora de escala. Adaptado de Mazur e Ruhnke [14].

A Tabela 2.3 resume a implementação da nuvem de tempestade, conforme a descrição anterior e detalhando a distribuição, densidade e espaçamento entre as cargas. As estruturas foram modeladas como cargas pontuais igualmente espaçadas entre si. São

duas camadas principais, sendo a região A carregada com 50 C e densidade de carga de $0,212 \text{ nC/m}^3$; e a região B carregada com - 80 C e densidade de carga de $-0,147 \text{ nC/m}^3$. Duas camadas secundárias, de forte eletrificação, são posicionadas no interior da nuvem para formar a célula de tempestade descrita por Kuettner [43]. A região da célula recebe fortes correntes de ar ascendentes, responsáveis pela maior parte da geração de cargas na nuvem e possui diâmetro de 1 km. A região C é carregada com -10 C e densidade de carga de $-3,18 \text{ nC/m}^3$ e a região D é carregada com 3 C e densidade de carga de $1,27 \text{ nC/m}^3$. A posição de cada região está esquematicamente representada na Figura 2.8.

Esta distribuição é capaz de reproduzir campos elétricos ao nível do solo condizentes com as condições e assinaturas percebidas durante a formação de uma descarga nuvem-solo. Também é possível notar que esta estrutura produz perfis adequados para o potencial elétrico e campo elétrico na atmosfera ao longo do eixo do cilindro. Em seções posteriores deste trabalho serão utilizadas variações deste modelo a fim de se obter outras condições de corrente de retorno e carga transferida pela descarga nuvem-solo.

Tabela 2.3 – Parâmetros do modelo de nuvem representado. Adaptado de Louro [12].

Região	Carga total (C)	Densidade de Cargas (nC/m^3)	Número de pontos	Espaçamento entre cargas pontuais (m)
A	+50	0,212	31360	200
B	-80	-0,147	69840	200
C	-10	-3,180	25596	50
D	+3	1,270	19276	50

2.5.3 Posicionamento vertical da nuvem de tempestade

A base da nuvem de tempestade é posicionada a 2 km de altitude em relação ao solo plano, conforme a simulação realizada por Mazur e Ruhnke [23]. De acordo com a avaliação de Proctor [44] os valores máximos de campo elétrico acontecem nas fronteiras das regiões positivas e negativas da nuvem de tempestade, que, para o modelo adotado, corresponderia às altitudes de 5 km e 9 km. A primeira correspondendo às rupturas que originam descargas nuvem-solo e a segunda responsável por descargas intranuvem. A

consistência do modelo foi verificada por Arcanjo [13] e, de fato, os valores máximos de campo elétrico foram verificados nas altitudes esperadas.

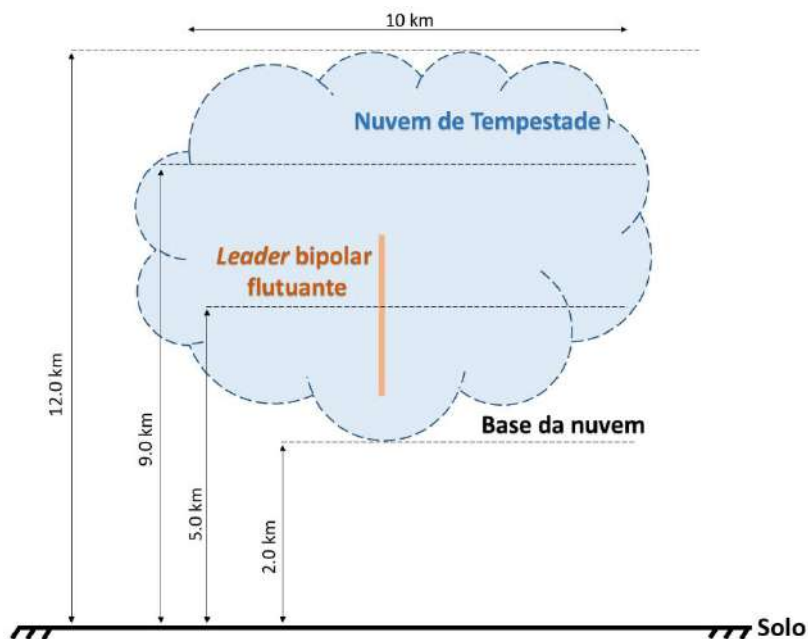


Figura 2.9 – Posicionamento vertical da nuvem de tempestade. Adaptado de Mazur e Ruhnke [23].

2.6 Modelos dos corpos condutores utilizados na simulação

Este trabalho utiliza os modelos de corpos condutores introduzidos por Louro [12] e Arcanjo [13] para representação do canal de descarga (*leader* bidirecional) e de estruturas aterradas. Os arranjos de carga são alterados conforme as geometrias pretendidas, o que é abordado ao longo dos capítulos 3 e 4.

2.6.1 Modelo do *leader*

O canal de descarga é uma estrutura de cargas com raio r e comprimento variável ao longo da simulação. Trata-se de um objeto bipolar cuja parte positiva (*leader* positivo) propaga-se para cima e a parte negativa (*leader* negativo descendente – DNL) propaga-se na direção do solo.

A representação computacional se dá por uma estrutura de cargas pontuais de valor e polaridade desconhecidas. Estas cargas estão separadas a uma distância d e o valor de cada carga é calculado a cada iteração baseado no potencial do *leader*. O perfil vertical do potencial é calculado a uma distância r utilizando os valores das cargas da nuvem. O valor da carga será tal que obedeça às condições desejadas. A Figura 2.10 apresenta um arranjo de corpo condutor conforme a descrição realizada.



Figura 2.10 - Estrutura de cargas pontuais para representação do corpo condutor [13].

2.6.2 Modelo de estruturas aterradas

O modelo de estrutura aterrada pode representar diferentes objetos na simulação, por exemplo, uma torre instrumentada, uma linha de transmissão ou um poste de rua. O modelo inicialmente implementado por Louro [12] e posteriormente incrementado por Arcanjo [13] utiliza geometria cilíndrica e um arranjo linear de cargas induzidas ao longo do corpo condutor. Estas cargas são responsáveis por manter o potencial nulo na superfície de raio r para qualquer condição eletrostática. Pode-se determinar o valor médio de corrente que flui por estas estruturas pela variação total da carga armazenada na estrutura entre dois passos de simulação.

2.7 Modelos de relevo do solo

Em trabalhos anteriores [13], a representação do relevo real no software de simulação da evolução de canais de descargas utilizava de um recurso capaz de eliminar a necessidade de utilização do método das imagens. O recurso consistia na alocação de cargas pontuais a uma determinada profundidade de forma que a contribuição destas cargas para o potencial na superfície do solo somada às contribuições de todas as outras cargas do sistema resulte em um potencial nulo. A distribuição das cargas pontuais induzidas abaixo da superfície do solo se dava de forma a reduzir a variação do potencial na superfície, a densidade de pontos é maior na região próxima à torre.

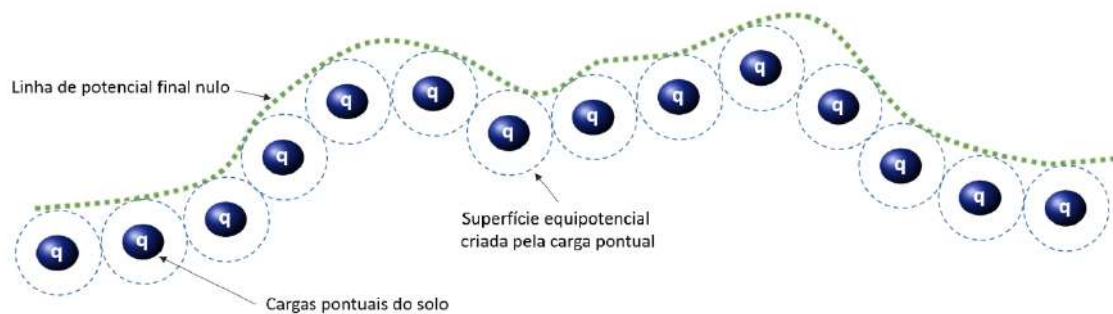


Figura 2.11 - Representação do relevo por cargas pontuais distribuídas abaixo do solo [13]

Uma das contribuições deste trabalho, apresentada no Capítulo 3 consiste em uma nova representação do relevo utilizando distribuições superficiais de carga.

2.8 Utilização do Método de Simulação de Cargas para determinação numérica das grandezas elétricas

A determinação numérica das grandezas elétricas envolvidas no processo de formação da descarga negativa nuvem-solo é feita a partir no Método de Simulação de Cargas (MSC) considerando o modelo do *leader* bidirecional. As contribuições apontadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho foram implementadas de forma a incrementar as rotinas computacionais inicialmente desenvolvidas e apresentadas por Louro [12] e Arcaño [13].

O MSC permite obter os valores das cargas elétricas e das distribuições superficiais induzidas em cada uma das estruturas anteriormente apresentadas. A partir dos valores destas cargas é possível calcular valores de interesse, tais como: campo elétrico em um determinado ponto; *striking distance*; Carga transferida pela descarga. Estes resultados são comparados com medições reais e análises são apresentadas no decorrer deste trabalho.

É importante registrar que, conforme apresentado por Becerra *et al.* [45] há uma camada de cargas espaciais acima do solo, provenientes do efeito corona durante a ocorrência de tempestades. O efeito corona atua no sentido de redução do campo elétrico de fundo produzido pelas nuvens ao nível do solo e sua influência pode se estender até poucas centenas de metros acima do solo, de acordo com Bazelyan *et al.* [46]. Desta

forma, a simulação não considera a camada de corona, apenas assume que, ao nível do solo, este efeito praticamente anula o campo de fundo concluiu Arcanjo *et al.* [47].

2.9 Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma revisão bibliográfica sobre a formação dos canais de descarga atmosférica. O modelo clássico e o modelo do *leader* bidirecional foram apresentados, sendo o último adotado como referência teórica para construção das simulações apresentadas neste trabalho. Constam também nesta revisão alguns conceitos recentemente estabelecidos que fundamentam etapas da simulação.

A segunda parte do capítulo descreveu as estruturas computacionais que foram desenvolvidas em trabalhos anteriores para representar a nuvem de tempestade, o canal de descarga, o solo e a estrutura aterrada. Estes desenvolvimentos são o ponto de partida deste trabalho e o entendimento destas etapas é fundamental para que haja coesão das contribuições posteriormente apresentadas de forma que a simulação seja compreendida como um conjunto único.

3 Modelo de representação do relevo por distribuições superficiais de carga

3.1 Introdução

Este trabalho propõe um novo modelo para representação do relevo do solo no qual a superfície não mais é representada por cargas pontuais (Figura 3.1), mas sim por placas finas e quadradas localizadas exatamente na superfície do solo (Figura 3.2). A densidade superficial de carga é uniforme no interior de cada placa, mas varia entre placas. Assim como no modelo anterior, a densidade de pontos também é maior na região próxima à torre, portanto a dimensão das placas é menor na região próxima à torre.

A utilização do modelo de representação do relevo do solo por distribuições superficiais de carga confere ao sistema uma maior robustez e exatidão de resultados se comparado ao modelo anterior. Isto se deve ao fato de que o campo elétrico pode ser obtido diretamente pela densidade superficial de carga em cada placa utilizando a constante de permissividade elétrica, conforme as equações (3.1) e (3.2) conforma apresentado por Almeida e Visacro [48].

$$\vec{D}_n = \rho_s \quad (3.1)$$

$$\vec{E}_n = \frac{\vec{D}_n}{\varepsilon} \quad [V/m] \quad (3.2)$$

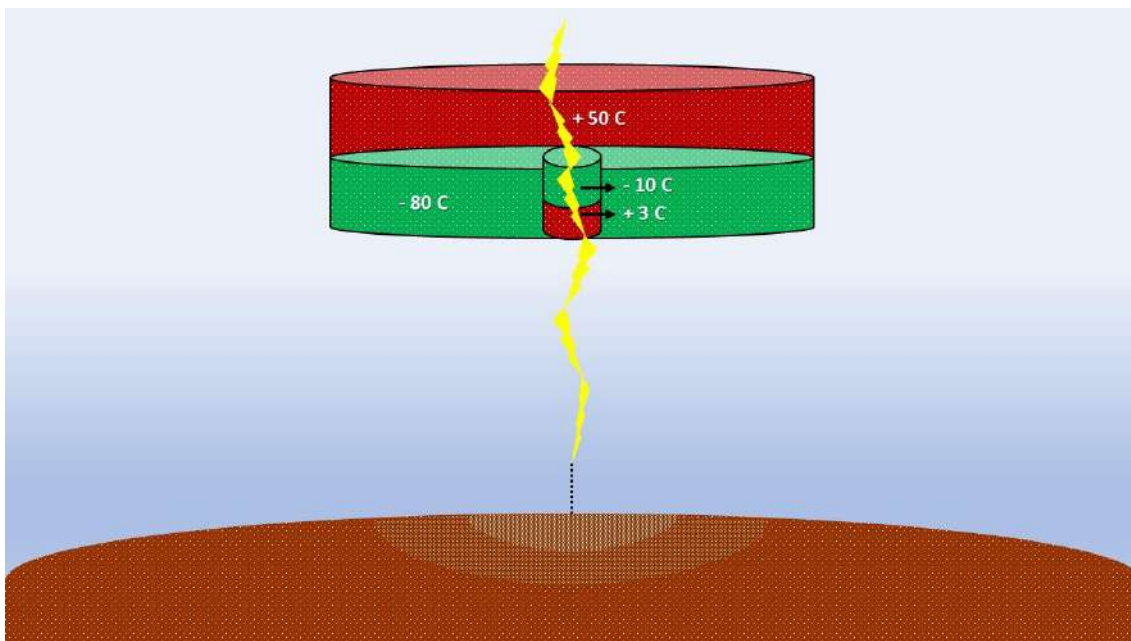


Figura 3.1 - Representação esquemática do sistema físico simulado contendo: nuvem de tempestade; canal de descarga; torre e solo representado por cargas pontuais posicionadas a uma determinada profundidade.

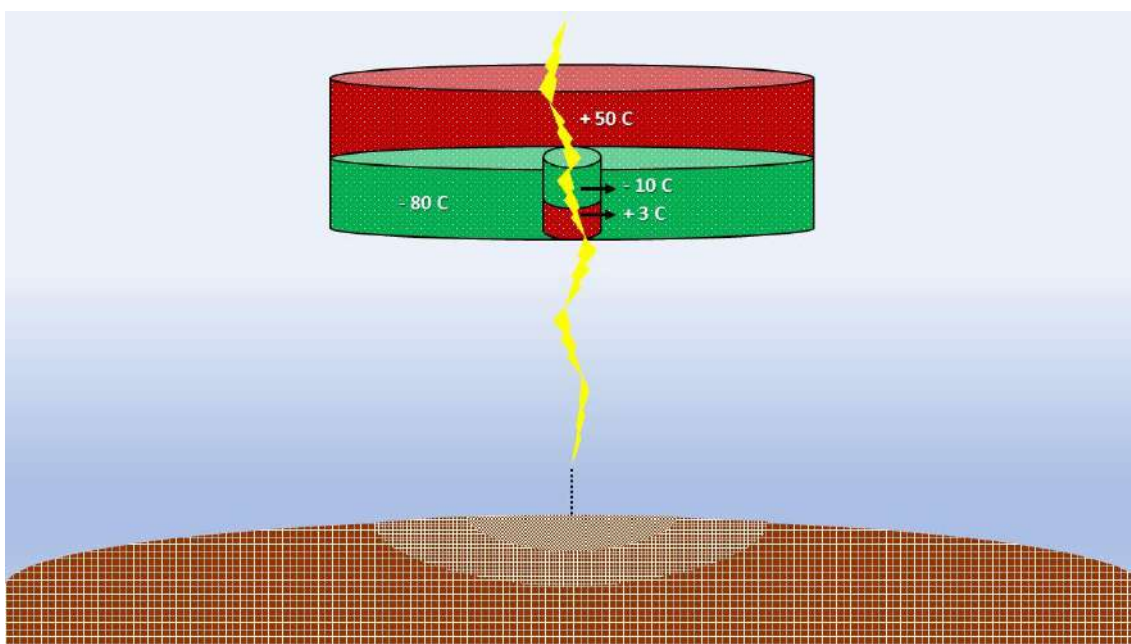


Figura 3.2 - Representação esquemática do sistema físico simulado contendo: nuvem de tempestade; canal de descarga; torre e solo representado por distribuições superficiais de carga.

3.2 Construção do modelo de representação do solo por distribuições superficiais de carga

Os procedimentos descritos nesta seção detalham o processo de construção da estrutura de dados que descreve as placas que representarão o relevo na simulação da evolução dos canais de uma descarga atmosférica. O procedimento foi implementado para

a região no entorno do Morro do Cachimbo, no entanto pode ser reproduzido em qualquer outro relevo que se tenha um levantamento de coordenadas e altitudes.

O fluxograma da Figura 3.3 representa o processo de construção da estrutura de dados. A descrição de cada etapa será detalhada posteriormente com o exemplo da região no entorno de MCS.

3.2.1 Levantamento da região de 2km de raio no entorno de MCS e construção das placas de distribuições superficiais de cargas

A construção de uma representação do relevo do entorno de MCS por meio de placas planas se dá a partir de um levantamento de altitudes adquiridos durante a missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) no ano 2000, uma parceria entre a agência espacial alemã (DLR), a agência espacial italiana e a NASA.

O arquivo de entrada de dados é uma tabela contendo 28368 pontos de medição com um espaçamento aproximado de 30 m. Cada linha da tabela é composta por 4 informações:

- POINTID – identificação do ponto;
- Altitude – altitude em relação ao nível do mar;
- Long – longitude em graus;
- Lat – latitude em graus.

A Tabela 3.1 exemplifica a organização dos dados de entrada.

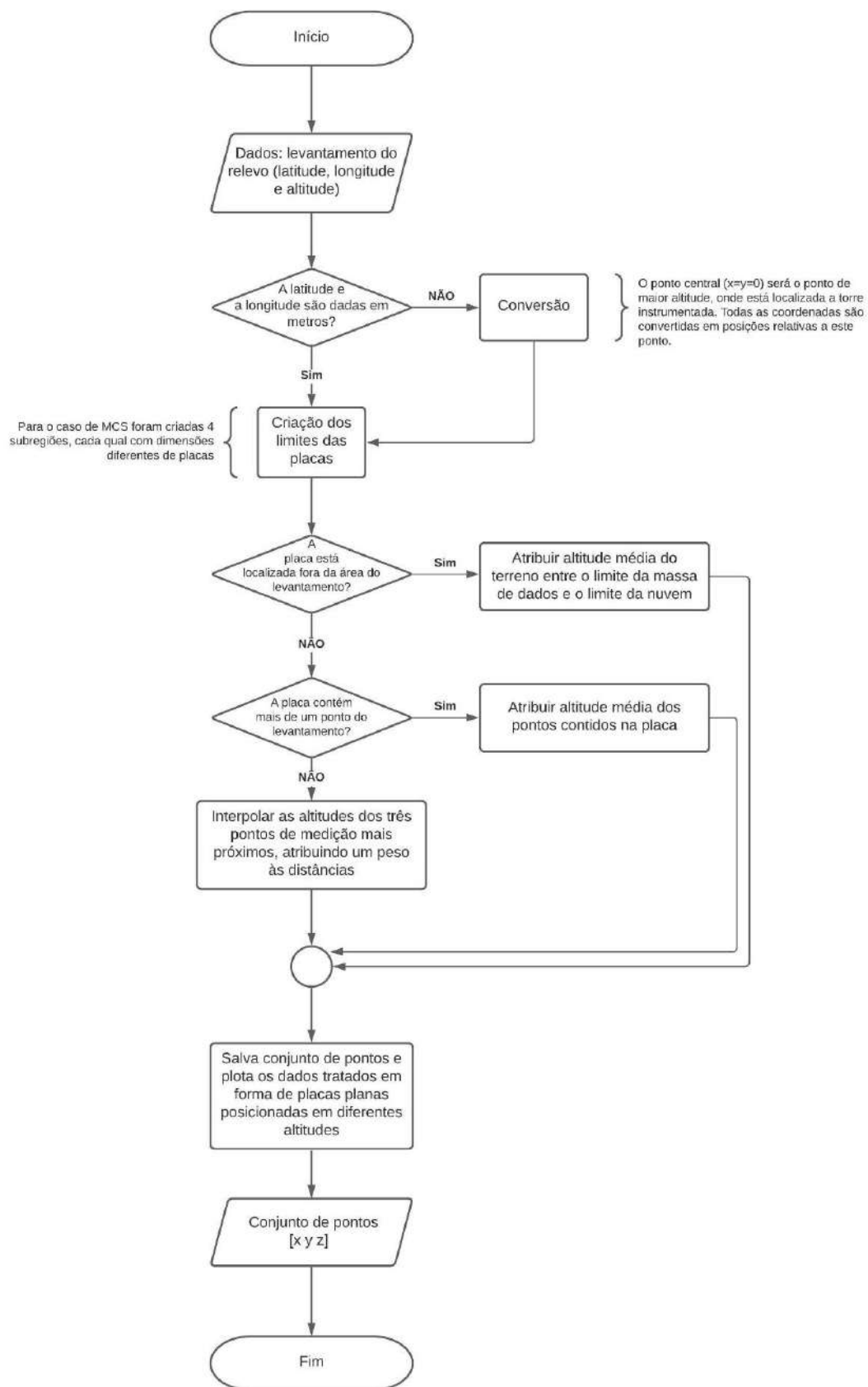


Figura 3.3 - Fluxograma de construção das placas

Tabela 3.1 – Entrada de dados do levantamento de altitudes do entorno de MCS

Ponto	Altitude (m)	Longitude (graus)	Latitude (graus)
1	984	-44	-20.0001
2	986	-43.9997	-20.0001
⋮	⋮	⋮	⋮
28368	984	-43.9999	-20

Para uma maior conveniência na manipulação destes dados, os pontos passam por um processo de conversão no qual as coordenadas expressas num sistema de latitude, longitude e altitude passam a ser dadas em um sistema cartesiano no qual o plano x-y está centrado na torre instrumentada, conforme apresentado na Figura 3.4. É utilizada uma rotina computacional elaborada por Palacios [49] para a conversão dos vetores de latitude e longitude para vetores de coordenadas no padrão UTM.

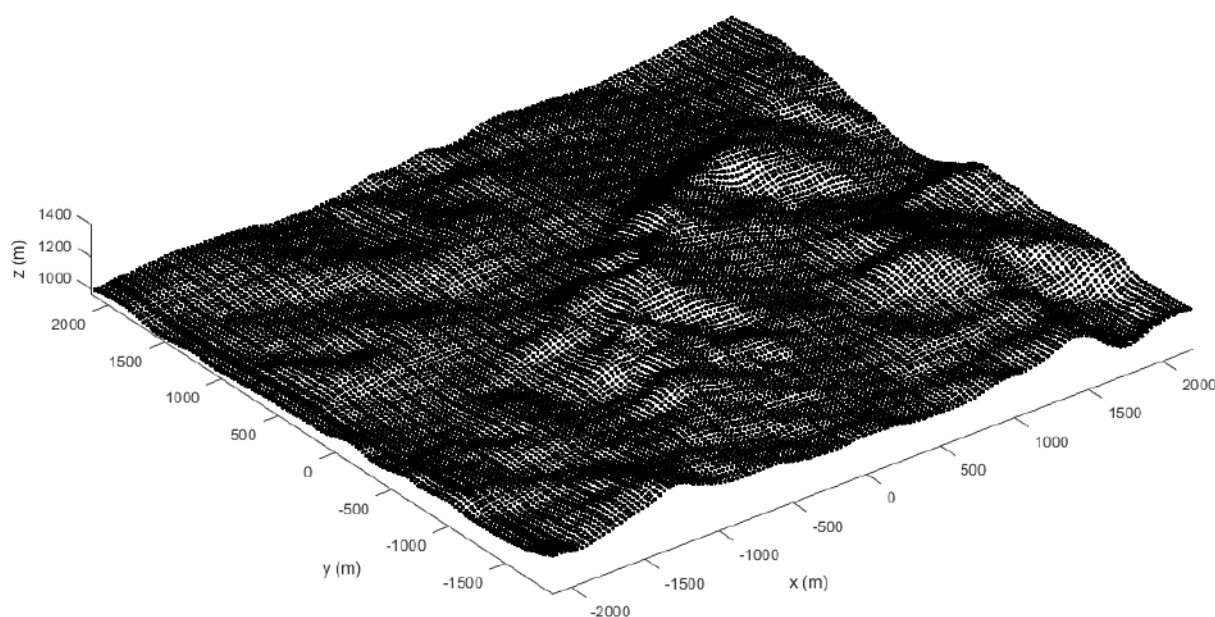


Figura 3.4 - Pontos de medição de altitudes

De posse dos dados tratados, são criados os limites das placas as quais seriam atribuídas as altitudes do levantamento e distribuições superficiais de carga com o andamento da simulação. O entorno de MCS é dividido em 4 sub-regiões, de forma a se

trabalhar com um maior nível de detalhamento no entorno da torre instrumentada, região de interesse para medição de campo elétrico.

A região mais interna, chamada região 1, é uma área quadrada com 400 m de lado centrada na torre de MCS. Essa região é subdividida em quadrados menores com 13,58 m de lado. A região 2 é uma área quadrada com 2.250 m de lado centrada na torre de MCS, com exceção da área correspondente à região 1, esta região é subdividida em quadrados menores com 34,11 m de lado. A região 3 é uma área quadrada com 4.050 m de lado centrada na torre de MCS, com exceção da área correspondente às regiões 1 e 2. Essa região é subdividida em quadrados menores com 82,84 m de lado. A região 4 é uma área circular com 10.530 m de diâmetro centrada na torre de MCS, com exceção da área correspondente às regiões 1, 2 e 3, esta região é subdividida em quadrados menores com 204,08 m de lado.

É atribuída uma altitude z para cada subdivisão das regiões, de acordo com o levantamento de altitudes da missão SRTM. Para as regiões 1 e 2 faz-se uma interpolação das altitudes z_1 , z_2 e z_3 dos pontos do levantamento mais próximos à respectiva placa, atribuindo um peso de acordo com as distâncias d_1 , d_2 e d_3 dos pontos de medição para o centro da placa, conforme as equações (3.3) e (3.4).

$$m = \min (d_1, d_2, d_3) \quad (3.3)$$

$$z = \frac{z_1 \cdot \frac{m}{d_1} + z_2 \cdot \frac{m}{d_2} + z_3 \cdot \frac{m}{d_3}}{\frac{m}{d_1} + \frac{m}{d_2} + \frac{m}{d_3}} \quad (3.4)$$

Para a região 3 é calculada a média das altitudes de todos os pontos contidos em cada subdivisão, conforme a equação (3.5). Para a região 4 é atribuída a altitude de 1.140 m para todas as subdivisões, esta é a altitude média do terreno.

$$z = \text{med} (z_1, z_2, \dots, z_n) \quad (3.5)$$

Desta forma, o tratamento dos dados de entrada é finalizado e obtém-se o conjunto de placas que será utilizado na simulação da evolução dos canais de uma descarga atmosférica. Cada placa é definida por um conjunto de pontos x_1 , x_2 , y_1 e y_2 relativos ao centro da região (torre instrumentada de MCS) e por um ponto z de altitude relativa ao

nível do mar. O resultado obtido a partir deste tratamento é apresentado na Figura 3.5 e na Figura 3.6.

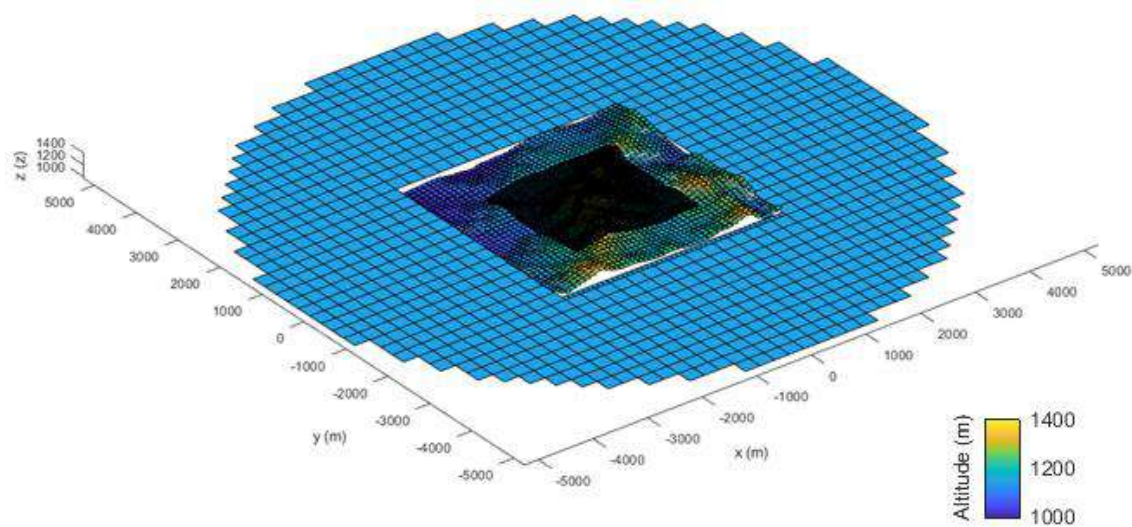


Figura 3.5 - Representação do relevo de MCS por placas planas

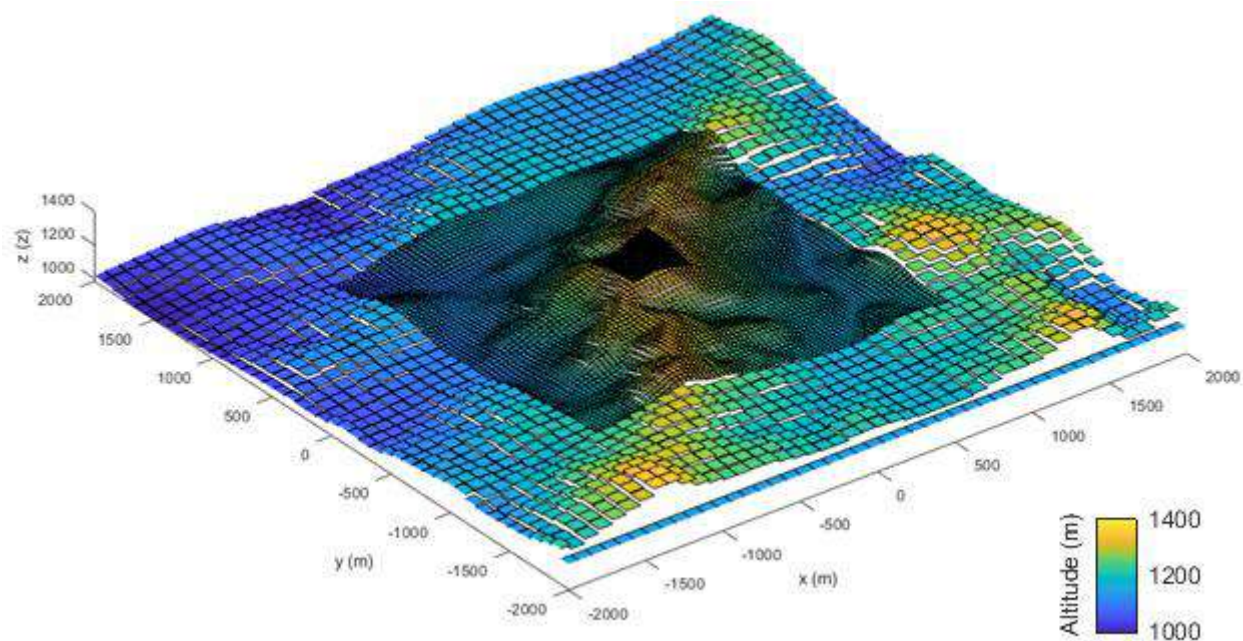


Figura 3.6 - Representação do relevo de MCS por placas planas. Área coincidente com os pontos de medição.

3.3 Incorporação do modelo de representação do solo por distribuições superficiais de carga na simulação

O Método de Simulação de Cargas (MSC), apresentado por Singer *et al.* [50] e utilizado por Louro [12] e Arcanjo [13], consiste na alocação de cargas discretas a uma determinada distância de onde deseja-se obter os valores de potencial ou de campo elétrico. Tais valores são obtidos por superposição, de forma que as condições de contorno sejam satisfeitas pelos valores das cargas discretas.

Conhecendo-se os valores e as coordenadas das cargas para uma determinada iteração pode-se determinar o potencial e o campo elétrico em qualquer ponto. O potencial é obtido pela Equação de Poisson (3.6)

$$\nabla^2 \phi = -\frac{q}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

Na qual ϕ é o potencial elétrico [V], q é a carga elétrica [C] e ε é a permissividade elétrica do meio [F/m]. O campo elétrico \vec{E} [kV/m] em uma direção arbitrária pode ser obtido pelo gradiente do potencial, conforme a Equação (3.6).

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \phi \quad (3.7)$$

Aplicando o Método de Simulação de Cargas para resolver a Equação (3.7), temos:

$$\phi_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} q_j \quad (3.8)$$

Na qual P_{ij} são parâmetros geométricos que dependem da distância da carga pontual até o ponto onde se deseja calcular o potencial (ponto de medição), chamados coeficientes de potencial. A Figura 3.7 ilustra um esquema utilizado para o cálculo do potencial no ponto M , devido à presença de n cargas.

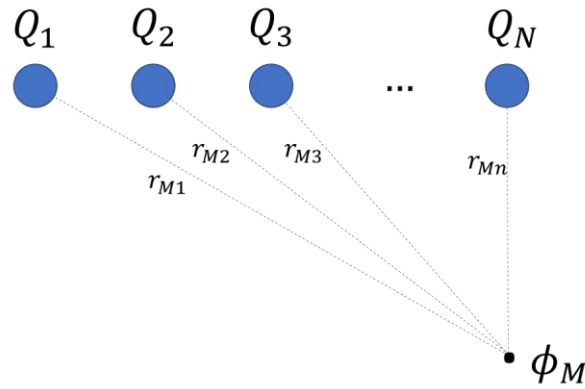


Figura 3.7 - Cálculo do potencial em um ponto utilizando o MSC.

A Equação (3.8) pode ser expandida para a relação matricial mostrada na Equação (3.9) de forma a atender situações nas quais existem diversos pontos de medição de potencial.

$$\phi = PQ \rightarrow \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{M1} & P_{M2} & \cdots & P_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_M \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

3.3.1 Sistema prévio: simulação da evolução de um canal de descarga atmosférica acima de estruturas representadas por cargas pontuais

Na equação (3.9), P é a matriz de coeficientes do potencial e Q é o vetor contendo os valores das cargas conhecidas e ϕ é o vetor de potenciais elétricos que se busca determinar.

A simulação apresentada por Arcanjo [13] considera que todas as cargas que representam o sistema são pontuais, portanto os coeficientes de potencial são calculados pela distância d_{MN} entre a carga e um ponto de medição qualquer, conforme a equação (3.10).

$$P_{MN} = \frac{1}{4\pi\epsilon d_{MN}} \quad (3.10)$$

No entanto, o problema a ser solucionado é a determinação da carga induzida nas estruturas observadas (*leader*, torre instrumentada e solo). Para tanto deve-se obter a

inversa da matriz P e multiplicá-la pelo vetor de potenciais conhecidos ϕ , conforme a equação (3.11).

$$Q = P^{-1}\phi \rightarrow \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{M1} & P_{M2} & \cdots & P_{MN} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_M \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.3.2 Sistema modificado: simulação da evolução de um canal de descarga atmosférica acima de estruturas representadas por cargas pontuais e por distribuições superficiais de carga

A solução do problema eletrostático se dá de forma semelhante ao processo anteriormente descrito. No entanto, passa a incluir distribuições superficiais de carga e cargas pontuais no sistema. Desta forma, o sistema representado pela equação (3.11) é subdividido de acordo com as três contribuições existentes: *leader*, solo e torre conforme apresentado na equação (3.12).

$$Q = P^{-1}\phi \rightarrow \begin{bmatrix} Q_L \\ \rho_{SS} \\ Q_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{LL} & P_{LS} & P_{LT} \\ P_{SL} & P_{SS} & P_{ST} \\ P_{TL} & P_{TS} & P_{TT} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \phi_L \\ \phi_S \\ \phi_T \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

A matriz de coeficientes é dada pelas contribuições próprias e mútuas entre torre, solo e *leader*. A contribuição de uma placa de distribuição superficial de carga para o potencial em um determinado ponto é dada pela solução da integral apresentada pela equação (3.13). Neste novo sistema os coeficientes das submatrizes P_{LS} , P_{SS} e P_{TS} não são mais dados pela equação (3.10) mas sim pela equação (3.14) que é resultado da equação (3.13). O termo $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ dá a distância entre um ponto i e qualquer ponto (x_j, y_j, z_j) na superfície da placa j . Assim, x , y e z correspondem respectivamente a $x_i - x_j$, $y_i - y_j$ e $z_i - z_j$. Na integração, os limites x_j e y_j da placa variam nos respectivos limites das bordas da placa: de x_{j1} até x_{j2} e de y_{j1} até y_{j2} , enquanto z_j , que representa a altitude da placa, permanece constante.

$$V_{ij} = \iint_{y_1 x_1}^{y_2 x_2} \frac{\rho_{SSj}}{4\pi\epsilon\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} dx dy \quad (3.13)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot$$

$$\begin{aligned} & \left[x_2 \ln \frac{\sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z^2} + y_2}{\sqrt{x_2^2 + y_1^2 + z^2} + y_1} + x_1 \ln \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z^2} + y_1}{\sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z^2} + y_2} \right. \\ & + y_2 \ln \frac{\sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z^2} + x_2}{\sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z^2} + x_1} + y_1 \ln \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z^2} + x_1}{\sqrt{x_2^2 + y_1^2 + z^2} + x_2} \\ & - z \tan^{-1} \left(\frac{x_2 y_2}{z \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z^2}} \right) - z \tan^{-1} \left(\frac{x_1 y_2}{z \sqrt{x_1^2 + y_2^2 + z^2}} \right) \\ & \left. + z \tan^{-1} \left(\frac{x_2 y_1}{z \sqrt{x_2^2 + y_1^2 + z^2}} \right) + z \tan^{-1} \left(\frac{x_1 y_1}{z \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z^2}} \right) \right] \quad (3.14) \end{aligned}$$

O vetor \mathbf{Q} abriga os valores das cargas pontuais que compõe o *leader* (Q_L), das distribuições superficiais de carga que compõe o solo (ρ_{SS}) e das cargas pontuais que compõe a torre (Q_T). É possível obter a componente vertical da densidade de fluxo elétrico D_N na superfície do solo a partir do sub-vetor de distribuições superficiais de carga, tal grandeza relaciona-se com o campo elétrico pela constante de permissividade elétrica, conforme apresentado pelas equações (3.15) e (3.16).

$$\rho_{SS} = D_N \quad (3.15)$$

$$E_N = \frac{D_N}{\epsilon_0} \quad (3.16)$$

3.3.3 Descrição da simulação computacional

A rotina de simulação encontra-se ilustrada na Figura 3.8 por meio de um fluxograma simplificado. De acordo com o que foi apresentado por Arcanjo [13] a simulação pode ser dividida em três macro etapas: sendo a primeira a leitura dos dados de entrada e inicialização das estruturas que são utilizadas pela simulação; a segunda e a terceira etapa consistem na resolução do problema de potencial, respectivamente

conforme a evolução do canal bipolar e do canal ascendente. As alterações relatadas neste capítulo não interferem na organização estrutural da simulação.

Os dados gerados pela rotina descrita na Seção 3.2 deste trabalho resultam em uma representação do relevo de MCS constituída por um conjunto de distribuições superficiais de cargas em superfícies planas e quadradas e são inseridos na etapa de “Leitura dos parâmetros de entrada” da rotina computacional utilizada para cálculo das grandezas elétricas quando da evolução do canal bipolar. Nesta etapa devem ser informados também outros parâmetros de entrada, conforme detalhado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros de entrada da simulação

Nome	Descrição	Valor típico
altitude	Altitude da base inferior da estrutura aterrada.	1401 m
raio	Raio do canal bipolar de descarga.	1,00 m
raio_asc	Raio do canal ascendente.	0,20 m
raio_torre	Raio da estrutura aterrada.	0,20 m
altura_central	Altitude de início do <i>leader</i> .	5401 m
comp	Comprimento total do <i>leader</i>	8000 m
np	Número de pontos da estrutura auxiliar de medição de potencial	801
test	Valor de indicação do tipo de solo. Para solo plano (0) ou solo de MCS (1)	0 (solo plano) 1 (solo de MCS)

Neste capítulo do trabalho não foram feitas alterações na representação do canal bipolar, canal ascendente e estrutura aterrada em relação ao que já estava disponibilizado por trabalhos anteriores. A implementação do novo modelo de representação do relevo por distribuições superficiais de carga interage, portanto, com estas estruturas de maneira semelhante, uma vez que todas elas são cargas pontuais distribuídas no espaço. Desta, forma, a Etapa 3 da simulação, correspondente à evolução do canal ascendente não foi considerada neste trabalho. A avaliação do campo elétrico em um ponto localizado a 50 m da base da torre foi realizada observando-se o critério para início do canal ascendente, a simulação é terminada quando o campo elétrico atinge este limiar, indicando o *striking distance* obtido para aquela configuração geométrica.

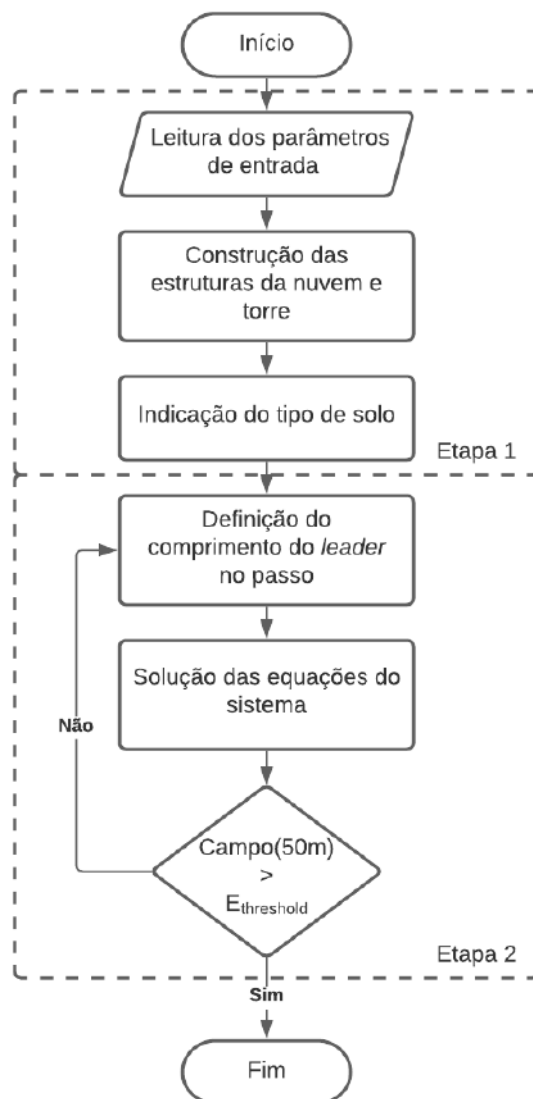


Figura 3.8 - Fluxograma simplificado da rotina de simulação. Adaptado de Arcanjo [13].

3.3.4 Resultados: evolução vertical do leader

A Figura 3.9 apresenta diferentes casos simulados para a evolução de um canal totalmente vertical em direção ao solo, são eles: *leader* projetado em perfeito alinhamento com a torre; e *leader* projetado a uma certa distância ortogonal em relação ao ponto de medição (200 m, 300 m e 400 m). A Figura 3.9 é uma representação esquemática e apresenta somente parte do *leader*, com os casos superpostos em uma mesma imagem; a torre e o ponto de medição. As representações da nuvem e do solo foram omitidas nesta ilustração, mas são partes integrantes da simulação conforme detalhado neste capítulo.

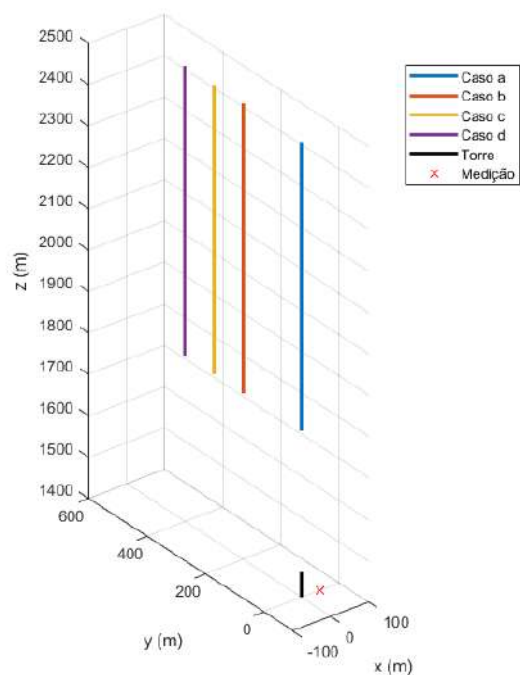


Figura 3.9 - Esquemático de projeção do *leader* em direção ao solo

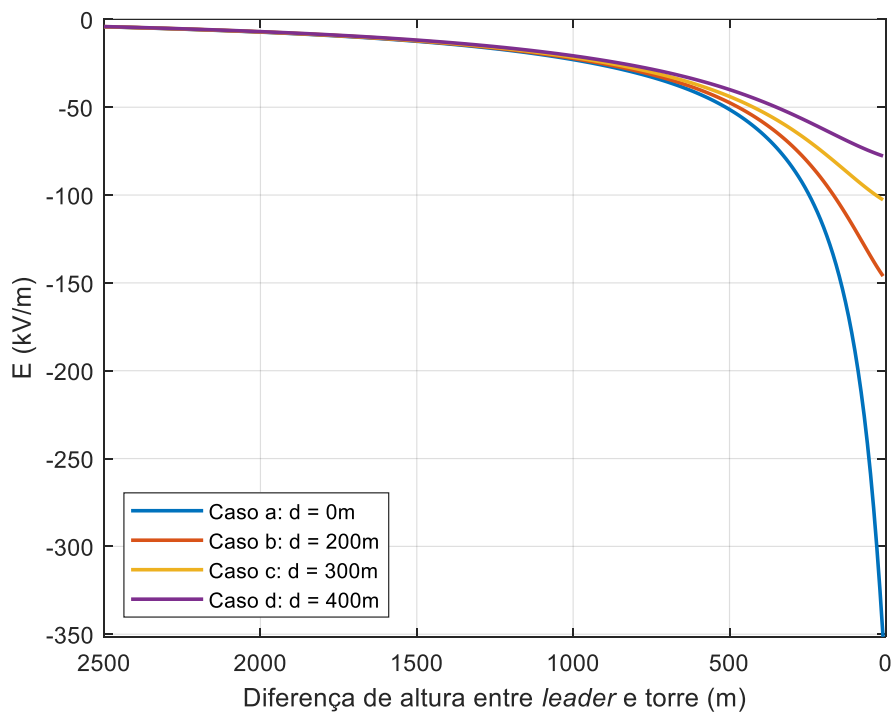


Figura 3.10 - Evolução do campo elétrico, ao nível do solo, 50 m distante da torre, para diferentes distâncias de projeção do *leader*. Todos os casos consideram propagação vertical do *leader* em direção à torre.

O resultado apresentado na Figura 3.10 mostra a evolução do campo elétrico, medido ao nível do solo a 50 m de distância da torre enquanto o *leader* se aproxima do solo.

A Figura 3.11 contém uma visão aproximada quando o campo elétrico atinge o limiar de $64,2 \text{ kV/m}$ definido por Guimarães *et al.* [11] como condição para surgimento do canal ascendente. Estas informações encontram-se resumidas na Tabela 3.3. É importante notar que a diferença de altura apresentada na abscissa não permite uma leitura direta do *striking distance*, deve-se considerar a distância de projeção horizontal para cálculo do SD.

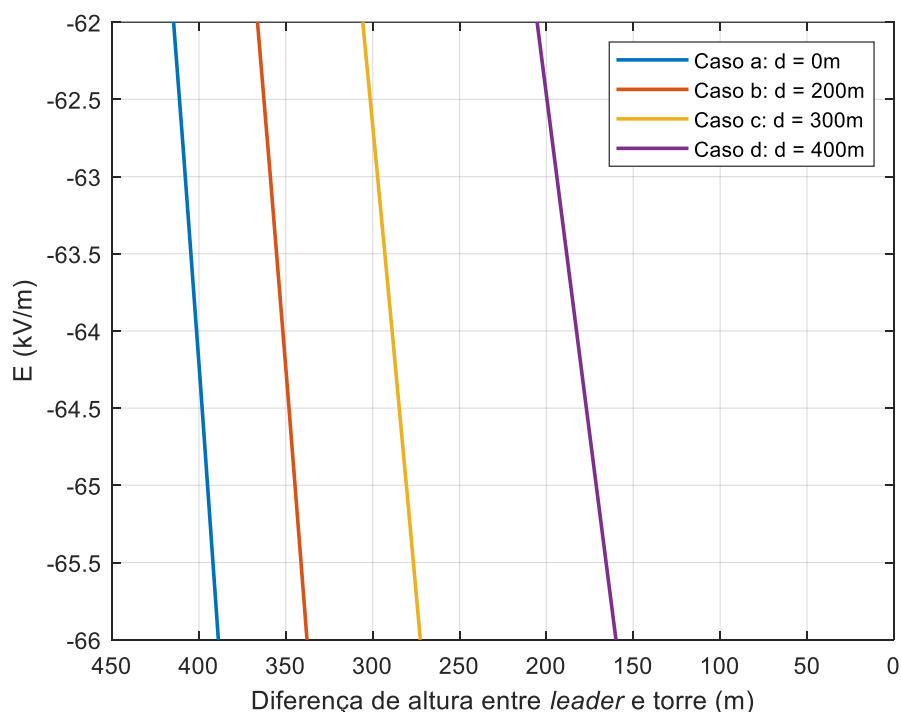


Figura 3.11 - Evolução do campo elétrico, ao nível do solo, 50 m distante da torre, para os mesmos casos apresentados na Figura 3.10. Visão aproximada do gráfico no limiar de campo elétrico que condiciona o surgimento de canal ascendente.

Tabela 3.3 - *Striking distance* para diferentes distâncias de projeção do *leader*

Caso	Distância de projeção [d (m)]	Diferença de altura [dif (m)]	<i>Striking Distance</i> $SD = \sqrt{d^2 + dif^2}$
a	0	399	399
b	200	349	402
c	300	289	417
d	400	179	438

3.3.5 Resultados: propagação diagonal do leader em direção à torre

Assim como na seção anterior, a Figura 3.12 também apresenta diferentes casos simulados para a evolução do *leader* em direção ao solo. Esta também é uma representação esquemática e apresenta somente parte do *leader*, com os casos superpostos em uma mesma imagem; a torre e o ponto de medição. As representações da nuvem e do solo foram omitidas nesta ilustração, mas são partes integrantes da simulação conforme detalhado neste capítulo. No entanto, o canal não mais apresenta trajetória totalmente vertical. A simulação se inicia com o canal deslocado a uma distância inicial de projeção (d_i) e quando este atinge uma altura determinada (h) adquire trajetória diagonal em direção ao topo da torre. A evolução do campo elétrico vista do ponto de medição localizado a 50 m da torre consta na Figura 3.13.

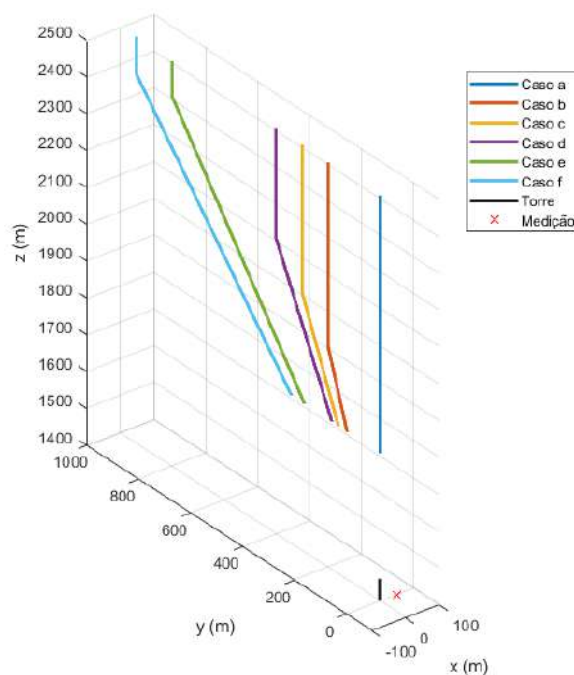


Figura 3.12 - Esquemático de projeção do *leader* em direção ao topo da torre

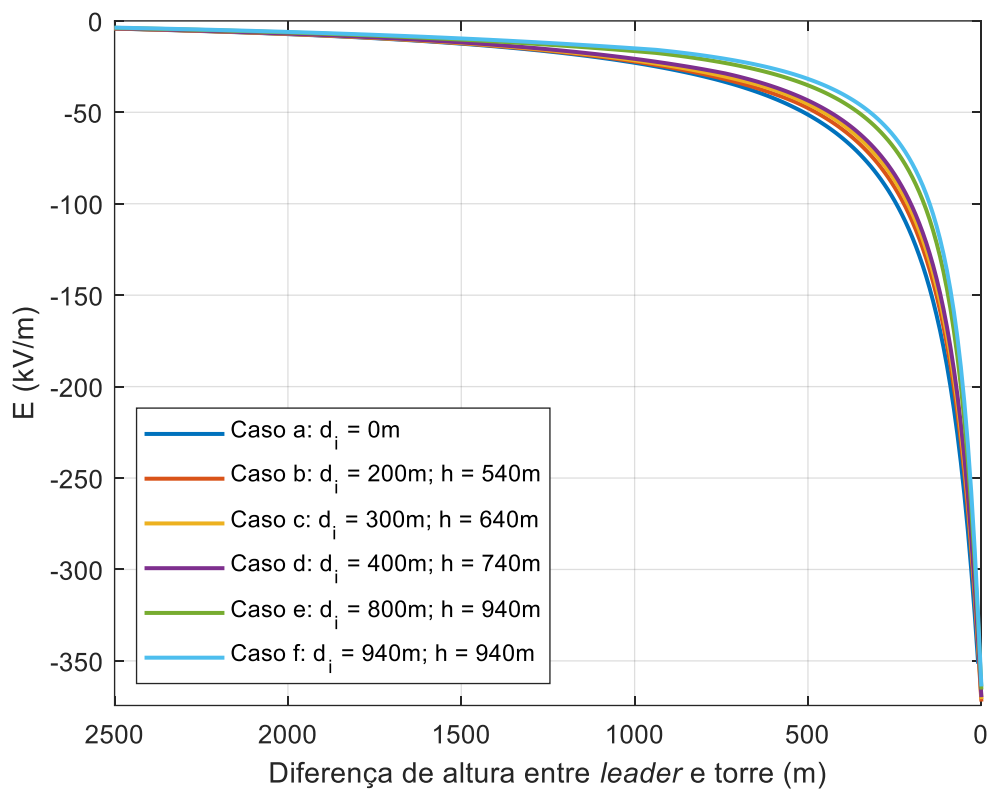


Figura 3.13 - Evolução do campo elétrico, ao nível do solo, 50 m distante da torre, para diferentes distâncias de projeção do *leader* (d_i). Evolução vertical do *leader* em direção à torre. Inicialmente o *leader* apresenta evolução vertical em direção ao solo, mas a partir de uma altura h o canal assume uma direção diagonal apontando para o topo da torre.

O cálculo do *striking distance* está apresentado na Tabela 3.4. O SD é obtido a partir da distância de projeção (d) e pela diferença de altura entre as extremidades do canal e torre (dif) quando o campo elétrico no ponto de medição atinge o limiar definido de $64,2 \text{ kV/m}$ [11]. A Figura 3.14 apresenta o detalhamento do instante no qual o campo elétrico atinge o referido limiar.

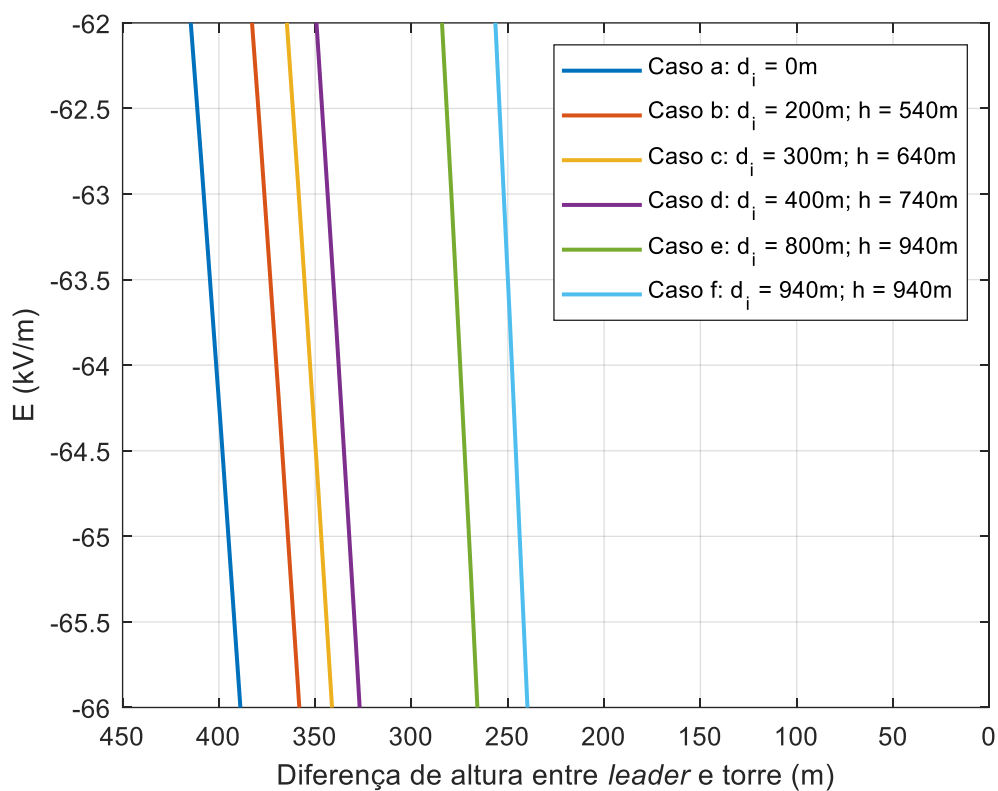


Figura 3.14 - Evolução do campo elétrico, ao nível do solo, 50 m distante da torre, para os mesmos casos apresentados na Figura 3.13. Visão aproximada do gráfico no limiar de campo elétrico que condiciona o surgimento de canal ascendente.

Tabela 3.4 - *Striking distance* para diferentes distâncias de projeção e diagonais

Caso	Distância de projeção inicial [d_i (m)]	Distância de projeção no instante do <i>striking distance</i> [d (m)]	Diferença de altura [dif (m)]	<i>Striking Distance</i> $SD = \sqrt{d^2 + dif^2}$
a	0	0	399	399
b	200	137	371	396
c	300	164	351	387
d	400	181	336	382
e	800	230	271	355
f	940	245	246	347

3.4 Análise dos resultados

Nesta seção são apresentadas análises acerca dos resultados apresentados ao longo deste capítulo. As análises visam evidenciar a consistência dos processos e resultados apresentados, bem como colocar em discussão questões pertinentes.

3.4.1 Comparação entre os valores de striking distance obtidos pelo novo modelo de representação do solo por cargas superficiais e os resultados obtidos pelo modelo de cargas profundas

Os resultados obtidos pelo modelo de representação do solo por distribuições superficiais de carga divergem numericamente com os resultados anteriormente obtidos pelo modelo de representação do solo por cargas pontuais posicionadas a uma certa profundidade. Os resultados apresentados abaixo referem-se a uma descarga constituída por um canal completamente vertical e projetado exatamente sobre a estrutura aterrada, similar ao caso a da Figura 3.9.

A Figura 3.15 permite verificar que os campos elétricos ao nível do solo são maiores quando utilizada a representação do solo pelo modelo de cargas superficiais. A mesma interpretação é válida para os campos elétricos obtidos 1 m acima da torre, conforme pode ser verificado na Figura 3.16.

Os campos elétricos obtidos respectivamente: quando a diferença de altura entre o *leader* e a torre vale 200 m para o modelo de representação do solo por cargas profundas e 400 m para o modelo de representação do solo por cargas superficiais são idênticos na interpretação da Figura 3.15 quando medidos ao nível do solo e a uma distância de 50 m da torre. No entanto, os valores do campo elétrico apresentam uma pequena diferença quando medidos 1 m acima da torre, conforme verificado na Figura 3.16. Percebe-se pela Figura 3.17 que a o quociente entre estes os campos elétricos referentes a estes dois pontos de medição atinge um mesmo valor para ambos os modelos quando a diferença de altura entre o *leader* a torre está próxima dos 400 m, mas surge uma pequena discordância quando a diferença de altura está próxima dos 200 m.

Embora os resultados não tenham se mostrado coincidentes ao modelo anteriormente utilizado, cabe ressaltar que a representação do solo por distribuições

superficiais de carga posicionadas exatamente sobre a superfície do relevo proporciona um modelo fisicamente mais consistente.

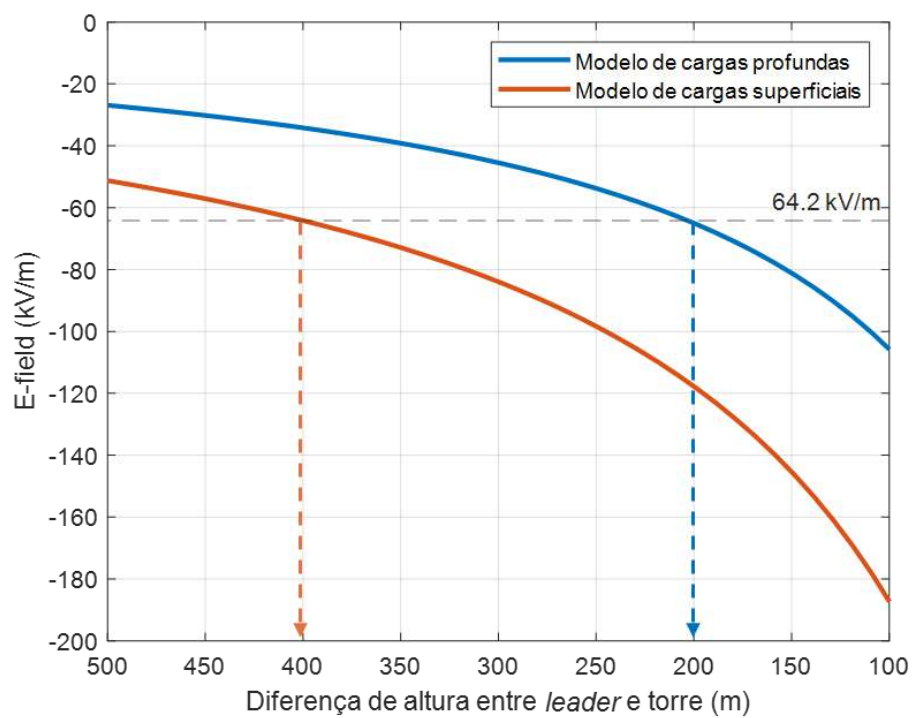


Figura 3.15 – Comparação da evolução do campo elétrico obtido ao nível do solo a 50 m da base da torre: pelo modelo de cargas profundas e pelo modelo de cargas superficiais.

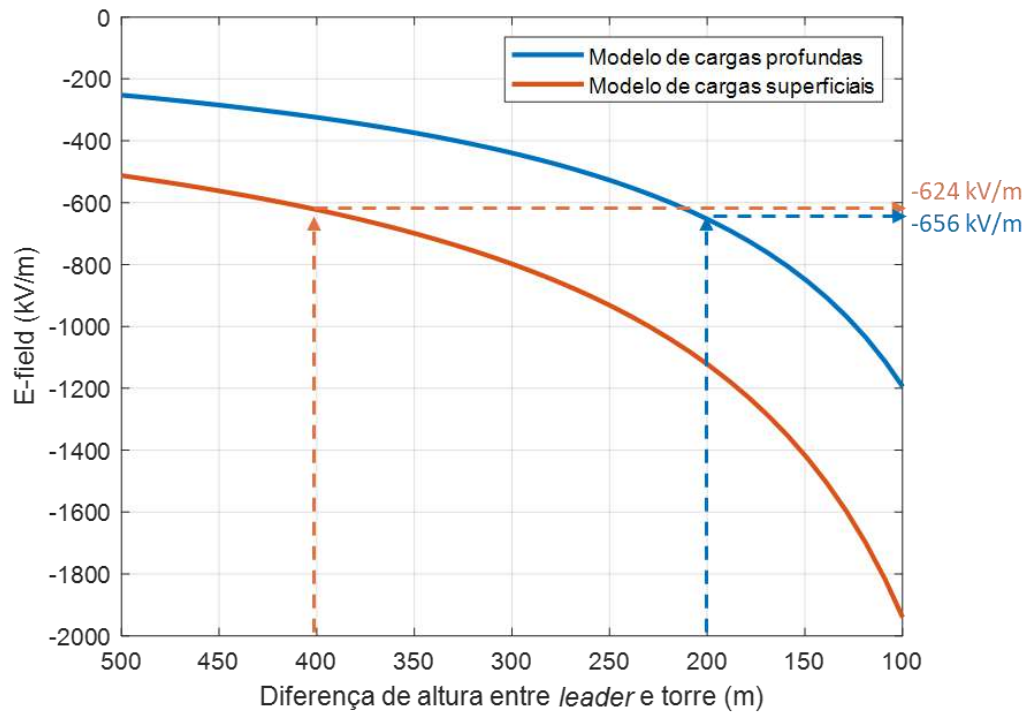


Figura 3.16 - Comparação da evolução do campo elétrico obtido 1 m acima da torre: pelo modelo de cargas profundas e pelo modelo de cargas superficiais.

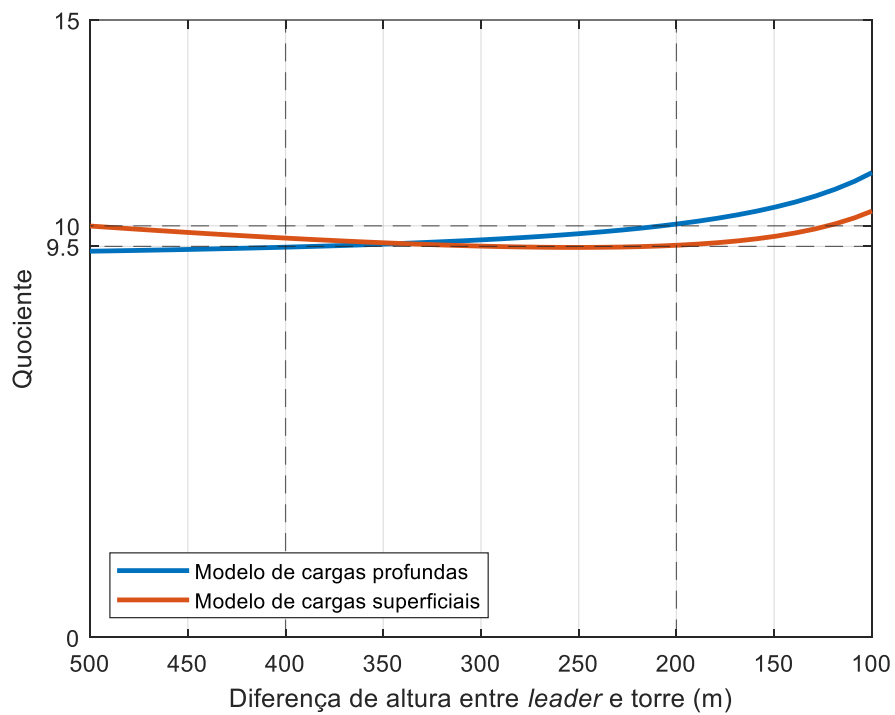


Figura 3.17 - Comparação do quociente entre o campo elétrico obtido 1 m acima da torre e o campo elétrico obtido ao nível do solo a 50 m da base da torre: pelo modelo de cargas profundas e pelo modelo de cargas superficiais.

3.4.2 Considerações a respeito da tridimensionalidade do canal

Em uma primeira análise dos resultados apresentados percebe-se que trabalhos anteriores, como o apresentado por Visacro *et al.* [51] apresentam menores valores de *striking distance* (SD) que os obtidos neste trabalho. Considerando a definição do *striking distance* e a tridimensionalidade da propagação do *leader*, o SD pode ser matematicamente expresso pela equação (3.17), na qual $x_{DNL-torre}$, $y_{DNL-torre}$ e $z_{DNL-torre}$ representam a diferença entre a extremidade inferior do DNL e o topo da estrutura aterrada na qual se inicia o UPL (torre).

$$SD = \sqrt{x_{DNL-torre}^2 + y_{DNL-torre}^2 + z_{DNL-torre}^2} \quad (3.17)$$

Percebe-se que os valores de SD apresentados por Visacro *et al.* [51] e outros trabalhos semelhantes referem-se a uma visão bidimensional, tendo em conta que foram obtidos por uma única câmera estaticamente posicionada. É estatisticamente possível que a descarga forje um caminho no qual o verdadeiro SD seja maior que o percebido pela câmera. A Figura 3.19 ilustra esta discussão, tomando como exemplo o caso f apresentado na seção 3.3.5. Este caso foi escolhido porque, conforme observado nos diversos registros de vídeo presentes na literatura, é improvável que o canal percorra um caminho perfeitamente retilíneo entre o centro da nuvem e a estrutura aterrada. Neste caso, o canal apresenta uma inclinação de 45° no trecho entre a base da nuvem e o topo da torre.

A variação do plano de observação muda a percepção das componentes horizontais. Desta forma, o *striking distance* bidimensional é uma função do ângulo de observação e as componentes horizontais são traduzidas em uma projeção no plano de observação (x'), conforme descrito pelas equações (3.18) e (3.19).

$$projeção = \sqrt{x_{DNL-torre}^2 + y_{DNL-torre}^2} \cos \theta \quad (3.18)$$

$$SD_{bidimensional} = \sqrt{projeção^2 + z_{DNL-torre}^2} \quad (3.19)$$

A Figura 3.18 ilustra um plano de observação hipoteticamente localizado a 45° do plano de incidência do DNL.

Conforme mostrado na Figura 3.19, para o caso escolhido e considerando as equações apresentadas acima, o valor do SD bidimensional varia de 347 m conforme

mostrado na curva (a), passando por 301 m conforme mostrado na curva (b), atingindo o mínimo de 246 m conforme mostrado na curva (c).

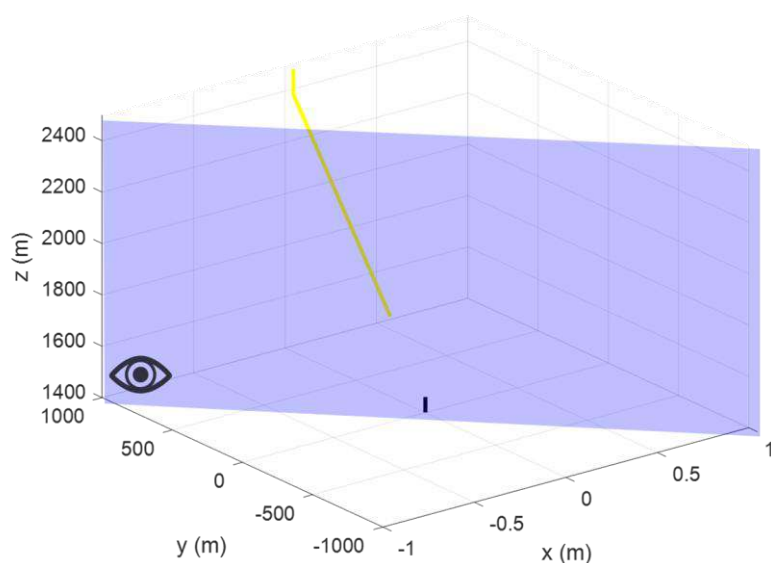


Figura 3.18 – Representação esquemática do plano de observação posicionado a 45° do plano de incidência do DNL

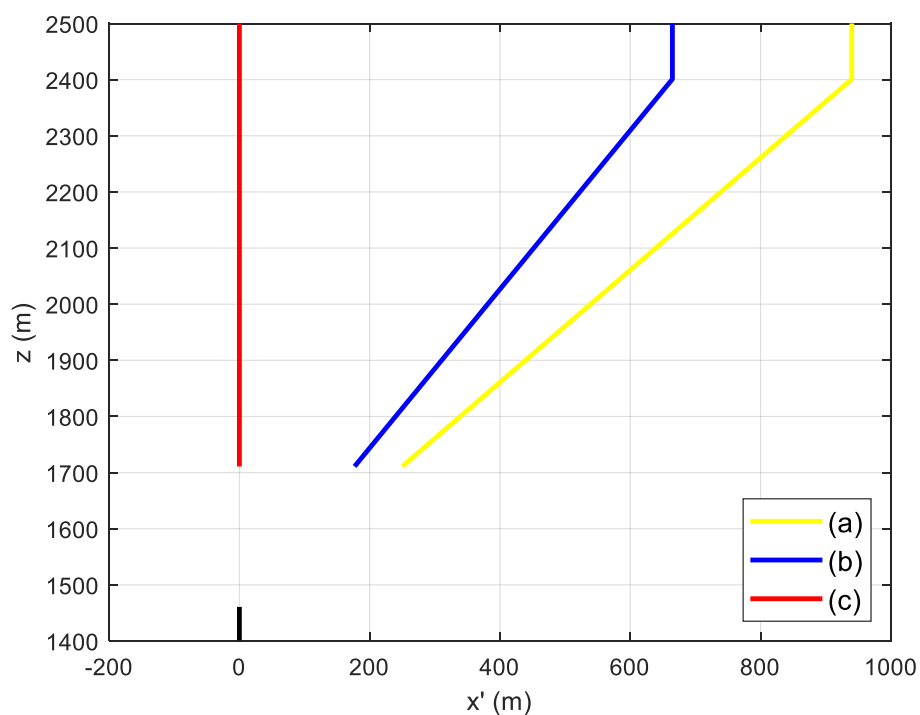


Figura 3.19 – Propagação do DNL observada a partir de diferentes planos. (a) apresenta a observação e a propagação pelo mesmo plano; (b) apresenta a observação em um plano hipoteticamente localizado a 45° do plano de propagação; (c) apresenta a observação em um plano hipoteticamente ortogonal ao plano de propagação.

3.4.3 Comparação entre os valores de *striking distance* obtidos pelo novo modelo e estimativas por equações conhecidas

O valor do *striking distance* (SD) pode ser estimado utilizando equações conhecidas, conforme discutido por Visacro *et al.* [51]. As equações de Tran e Rakov (3.20) e de MSC (3.21) fornecem um SD bidimensional, uma vez que foram obtidas a partir da observação de vídeos gravados por câmeras de alta velocidade e medições de corrente. Já a equação de Love (3.22) fornece um SD tridimensional.

$$SD = 13 \cdot I_p^{0.76} \quad (3.20)$$

$$SD = 34 \cdot I_p^{0.45} \quad (3.21)$$

$$SD = 10 \cdot I_p^{0.65} \quad (3.22)$$

A utilização das equações anteriores requer o valor da corrente de pico da descarga. A estimativa da corrente de pico a partir da carga transferida será obtida por meio da equação (4.5), uma vez que esta simulação considera o relevo de MCS e a equação foi obtida a partir de dados de medição da mesma estação, conforme mencionado por Almeida e Visacro [48]. A Figura 3.20 apresenta a diferença entre a carga contida no canal nos momentos imediatamente anterior e posterior ao *attachment*, para o caso a da seção 3.3.5 (canal totalmente vertical), resultando em uma carga transferida $Q = 7,71 C$. Já a Figura 3.21 apresenta a mesma análise para o caso f da seção 3.3.5 (canal com diretividade de 45° a partir da base da nuvem), resultando em uma carga transferida $Q = 8,15 C$. O aumento da carga transferida é justificado pelo fato de o canal com tortuosidade percorrer um maior percurso, acumulando mais cargas.

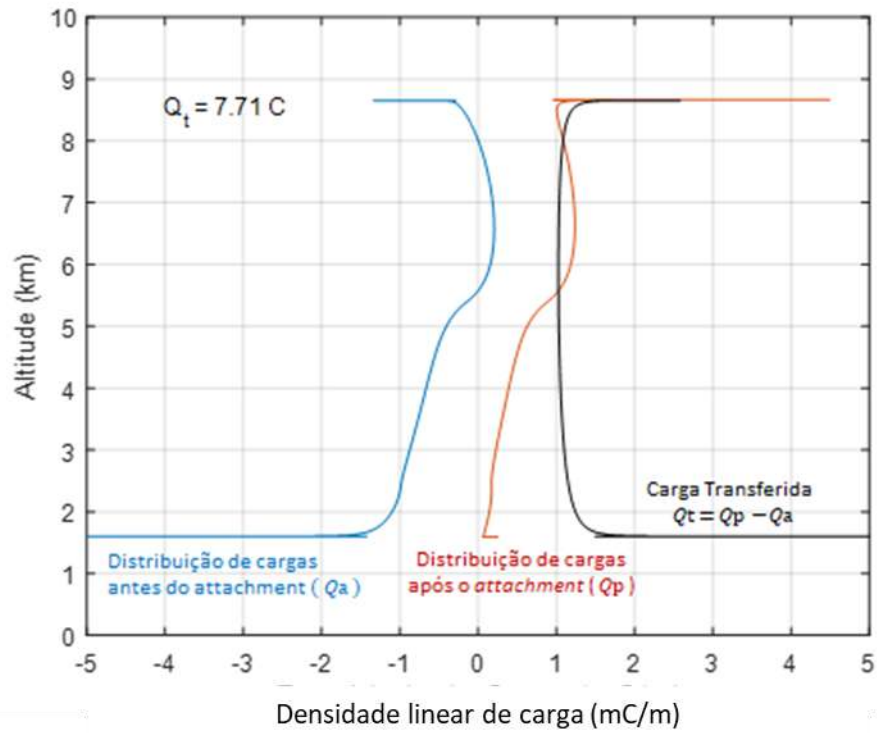


Figura 3.20 – Densidade linear de carga para os passos imediatamente antes e após o *attachment* e sua respectiva carga transferida para o caso a da seção 3.3.5 (canal sem diretividade)

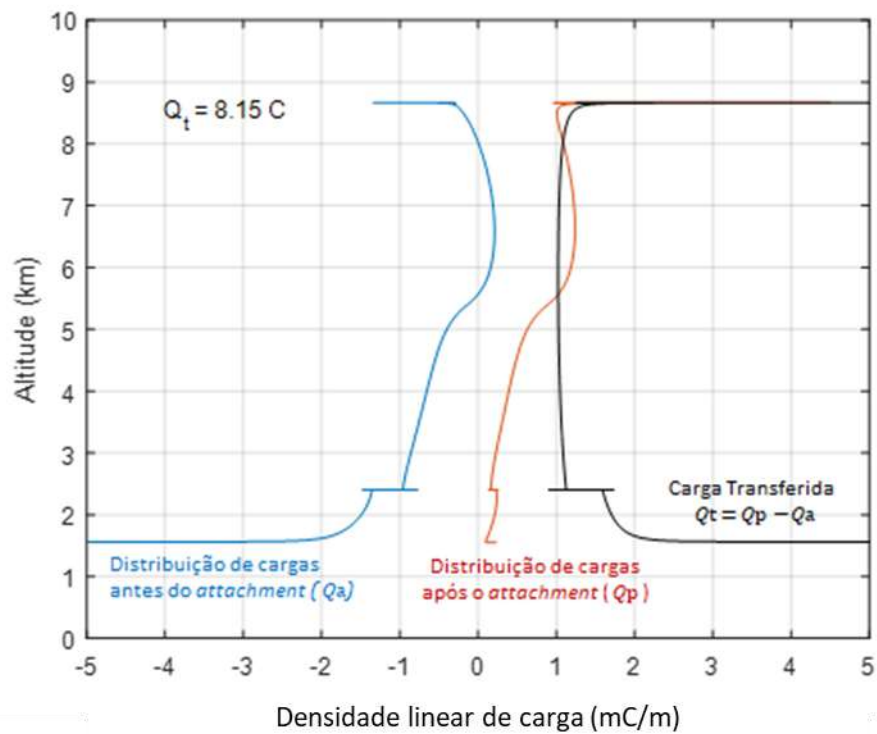


Figura 3.21 - Densidade linear de carga para os passos imediatamente antes e após o *attachment* e sua respectiva carga transferida para o caso f da seção 3.3.5 (canal com diretividade de 45°)

A Tabela 3.5 resume os valores de *striking distance* encontrados para o caso f da seção 3.3.5: SD obtido pela simulação; SD calculado pelas equações de Tran e Rakov (3.20), de MSC (3.21) e de Love (3.22) para uma corrente de 63,5 kA, correspondente a uma descarga de 8,15 C segundo a equação (4.5).

Tabela 3.5 - Resumo dos valores de SD obtidos pela simulação deste trabalho e por equações conhecidas para uma descarga de 8,15 C / 63,5 kA

Metodologia	Striking Distance
Simulação deste trabalho	347 m
Equação de Tran e Rakov (3.20)	305 m
Equação de MCS (3.21)	220 m
Equação de Love (3.22)	149 m

Em uma primeira interpretação, os resultados podem parecer discrepantes, no entanto, após fazer as considerações de bidimensionalidade citadas na seção anterior, nota-se que os resultados simulados se aproximam daqueles obtidos pelas equações.

3.5 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada uma nova metodologia para representação do relevo em uma simulação da evolução das grandezas elétricas quando da aproximação de um canal de descarga atmosférica. Esta metodologia consiste em representar o relevo não mais por cargas pontuais, mas sim por meio de placas de distribuição superficial de cargas.

Foram apresentados os passos computacionais para construção da representação do entorno da Estação Morro do Cachimbo (MSC) segundo a metodologia proposta. Cabe destacar que o procedimento pode ser replicado para outros relevos, desde que o levantamento de altitudes do terreno seja conhecido.

Por fim, foram apresentados os resultados de cenários de simulação da evolução do campo elétrico em um ponto de medição localizado a uma distância de 50 m da base da torre para diferentes cenários de geometria e posição do *leader* e as análises destes resultados.

4 Análise de Atratividade de Descargas por Linhas de Transmissão

4.1 Introdução

A contribuição apresentada no Capítulo 3 foi desenvolvida para a simulação de uma descarga atmosférica incidente no relevo do solo no entorno de MCS. No entanto, a simulação inicialmente desenvolvida por Louro [12] e Arcanjo [13] permite também visualizar a evolução das grandezas elétricas quando do surgimento de uma descarga sobre o solo plano. Este capítulo explora esta possibilidade com a realização de uma análise da atratividade de descargas atmosféricas por linhas de transmissão.

4.2 Representação da linha de transmissão pelo MSC

A Figura 4.1 ilustra esquematicamente o modelo para linha de transmissão implementado utilizando o método de simulação de cargas, conforme descrito pela equação (4.1). É possível representar qualquer configuração de linha utilizando passos análogos.

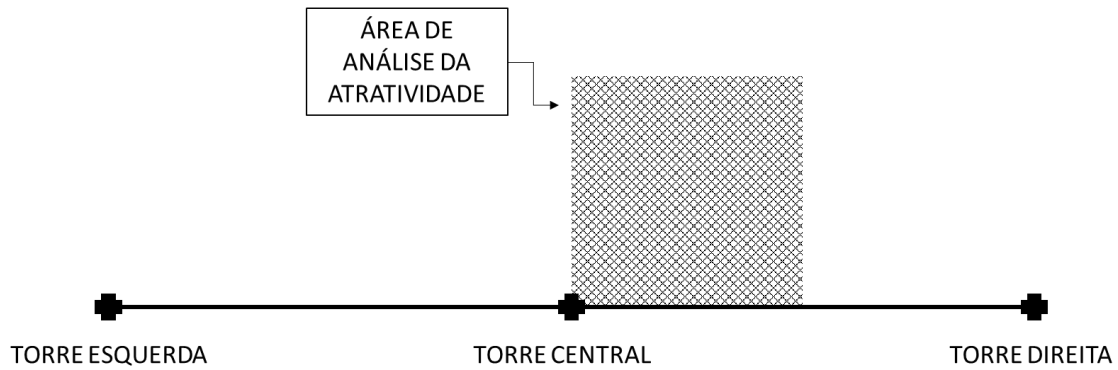


Figura 4.1 - Representação esquemática da região cuja atratividade de descargas atmosféricas por linhas de transmissão foi avaliada (visão superior).

$$Q = P^{-1}\phi \rightarrow \begin{bmatrix} Q_L \\ \rho_{IC} \\ Q_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{LL} & P_{LC} & P_{LT} \\ P_{CL} & P_{CC} & P_{CT} \\ P_{TL} & P_{TC} & P_{TT} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \phi_L \\ \phi_C \\ \phi_T \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

A matriz de coeficientes é dada pelas contribuições próprias e mútuas entre torres, cabos e *leader*. A contribuição de um segmento de distribuição linear de carga para o potencial elétrico em um determinado ponto é dada conforme a equação (4.3) detalhada em uma seção abaixo. As contribuições das cargas pontuais das torres e *leader* para o potencial elétrico em um determinado ponto são dadas em função da distância entre estas conforme a equação (3.10).

Para os cenários simulados, cujos resultados são apresentados ao longo deste capítulo, é considerada uma linha de transmissão contendo 2 vãos de 400 m cada, a torre central é representada de forma detalhada e as torres laterais são representadas de forma simplificada. O posicionamento dos cabos é determinado pelo modelo adotado para a torre central. A implementação da linha de transmissão conforme as características descritas é ilustrada pela Figura 4.2.

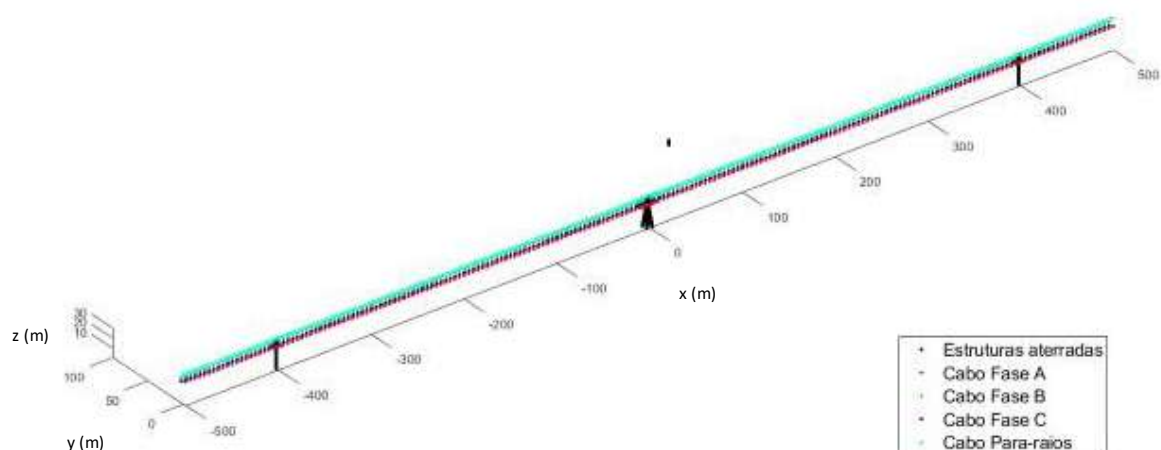


Figura 4.2 – Visão da linha de transmissão implementada no software utilizando o Método de Simulação de Cargas.

4.2.1 Representação da torre central

Os parâmetros geométricos para a torre central são uma reprodução do modelo de torre para linha de transmissão de 138 kV descrito por Visacro *et al.* [52] e apresentado pela Figura 4.3.

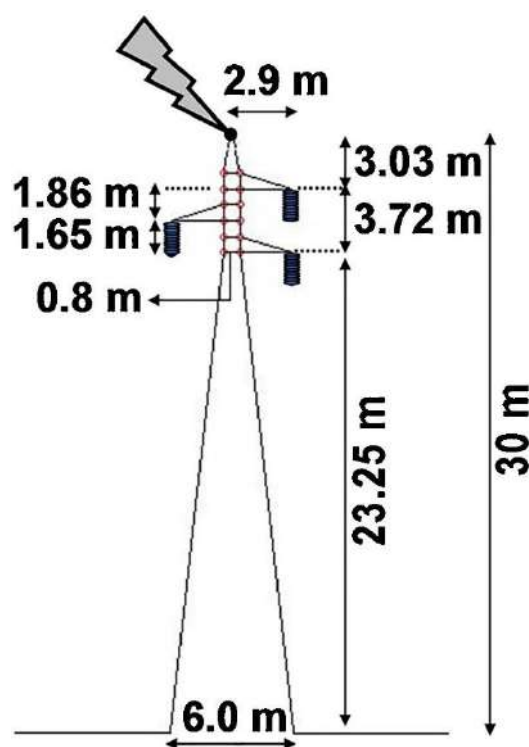


Figura 4.3 - Modelo de torre para linha de transmissão de 138 kV. Adaptado de Visacro *et al.* [52].

O referido modelo de torre é implementado utilizando o método de simulação de cargas. Para a construção da torre é considerado um raio de 3 cm para cada carga pontual e um espaçamento vertical de 25 cm entre cada carga. Para a construção das mísulas é

considerado um raio de 3 cm para cada carga pontual e um espaçamento horizontal de 25 cm entre cada carga, o espaçamento vertical adotado entre as cargas das mísulas é de 9,3 cm. A torre é uma estrutura aterrada, portanto, as cargas induzidas ao longo do corpo da torre são tais que o potencial calculado nas posições da superfície da estrutura correspondente às cargas seja igual a zero, em qualquer que seja a condição eletrostática à qual o sistema está submetido, conforme elucidado por Arcanjo [13]. A Figura 4.4 ilustra a distribuição espacial de cargas do modelo de torre implementado conforme a descrição acima.

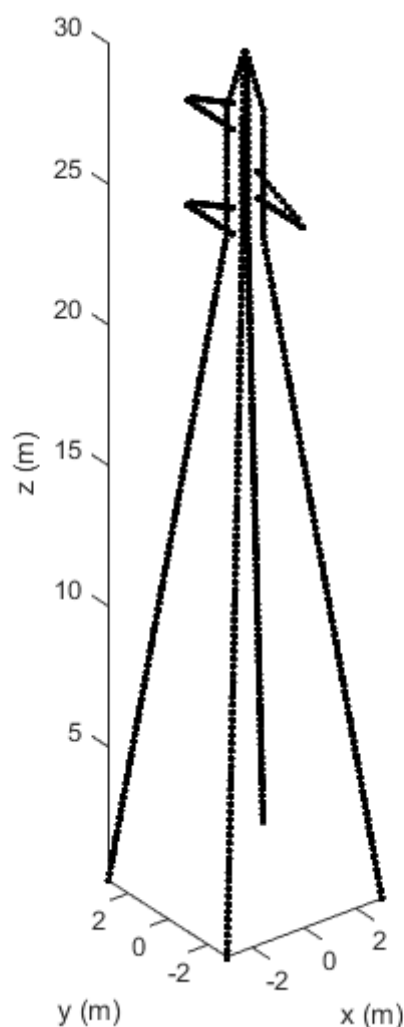


Figura 4.4 - Distribuição espacial das cargas pontuais para o modelo de torre para uma linha de transmissão de 138 kV construído com o MSC.

4.2.2 Representação das torres adjacentes

As torres adjacentes, localizadas nas extremidades da linha de transmissão, são representadas de forma simplificada. Optou-se por representá-las como postes de altura

idêntica à altura da torre central. Assim como a torre central, as torres adjacentes são estruturas aterradas, representadas por um arranjo de cargas pontuais distribuídas em uma geometria cilíndrica, com raio de 3 *cm* para cada carga pontual e um espaçamento vertical de 25 *cm* entre cada carga, conforme a Figura 2.10. Estas cargas são tais que o potencial calculado na superfície do raio *r* seja zero para qualquer condição eletrostática, assim como ocorre na torre central.

4.2.3 Representação dos cabos

Os quatro cabos existentes no modelo escolhido de linha de transmissão: fase A, fase B, fase C e cabo para-raios são representados por segmentos de tamanhos pré-definidos nos quais existe uma densidade linear de carga. Todos os cabos são representados no MSC considerando potencial nulo. Os segmentos são inseridos nas matrizes do Método de Simulação de Cargas por meio da alteração dos coeficientes de potencial, em um processo análogo ao que foi apresentado na seção 3.3.2, o coeficiente de potencial é obtido a partir da equação (4.2) para cálculo do potencial elétrico devido a um elemento de comprimento infinitesimal dx .

$$V = \frac{\rho_l}{4\pi\epsilon_0} \int_{x_1}^{x_2} \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} dx \quad (4.2)$$

Após uma série de análises físicas optou-se por utilizar dois tamanhos de segmentos na representação dos cabos para a configuração de linha de transmissão adotada neste trabalho. Os segmentos localizados nas imediações das torres contam com 50 *cm* de comprimento, todos os demais contam com 5 *m* de comprimento. A Figura 4.5 ilustra os cabos nas proximidades da torre central, cada ponto representa o centro de um segmento, desta forma é possível notar que os segmentos posicionados entre $-7,5$ *m* e 7,5 *m* no eixo *x* contam com 50 *cm* de comprimento, enquanto os demais contam com 5 *m* de comprimento. Já a Figura 4.6 ilustra os cabos nas proximidades da torre adjacente, os segmentos de dimensões reduzidas encontram-se entre $-2,5$ *m* e 2,5 *m* da torre ao longo do eixo *x*.

A integração da equação (4.2) ao longo dos limites de cada segmento possibilita obter o coeficiente de potencial apresentado pela equação (4.3).

$$P_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left\{ \frac{1}{2} \left[\ln \left(\frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + y^2 + z^2}} + 1 \right) - \ln \left(1 - \frac{x_2}{\sqrt{x_2^2 + y^2 + z^2}} \right) \right] - \frac{1}{2} \left[\ln \left(\frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + y^2 + z^2}} + 1 \right) - \ln \left(1 - \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 + y^2 + z^2}} \right) \right] \right\} \quad (4.3)$$

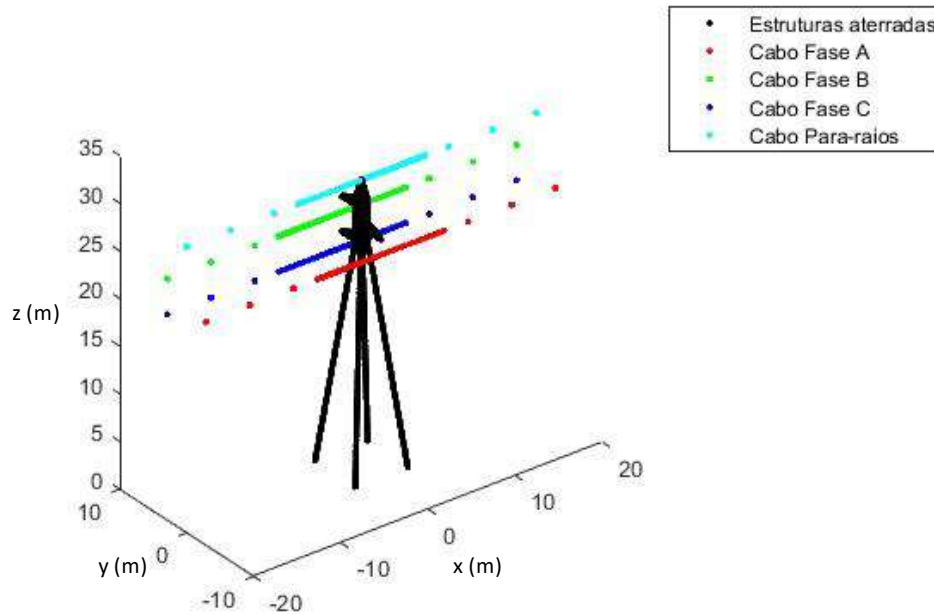


Figura 4.5 - Cabos nas proximidades da torre central.

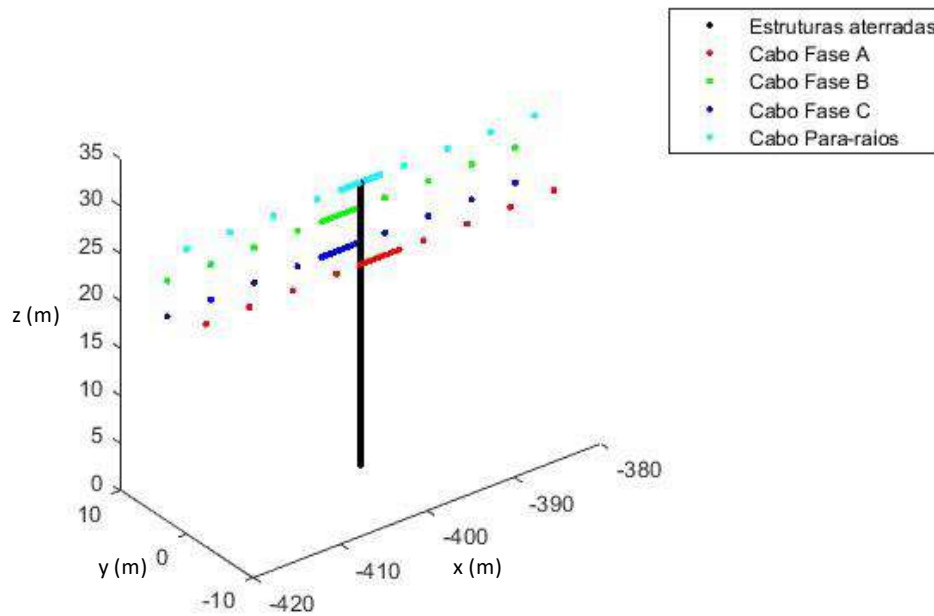


Figura 4.6 - Cabos nas proximidades da torre adjacente.

4.2.4 Objeto auxiliar

No modelo construído, há um objeto auxiliar inserido imediatamente acima do solo no ponto em que o DNL é projetado. Este objeto representa genericamente uma condição comumente encontrada nas proximidades do solo em um campo aberto, como uma árvore ou uma elevação.

O objeto auxiliar é necessário para que surjam cargas induzidas e conseqüentemente seja possível medir o campo elétrico nas proximidades do solo, principalmente quando o ponto de projeção do DNL encontra-se distante da linha de transmissão. O objeto é representado por uma série de cargas pontuais distribuídas ao longo de uma reta vertical de 4 m de altura. Os pontos de medição do potencial são variáveis, sendo que, encontram-se a um raio maior para as cargas mais próximas do solo, conforme representado pela Figura 4.7. O ponto de medição da carga posicionada na maior altitude é localizado 25 cm acima desta e não ao lado, como nas demais. A medição do campo elétrico é tomada a 1 m do topo do objeto, portanto a 5,25 m do solo.

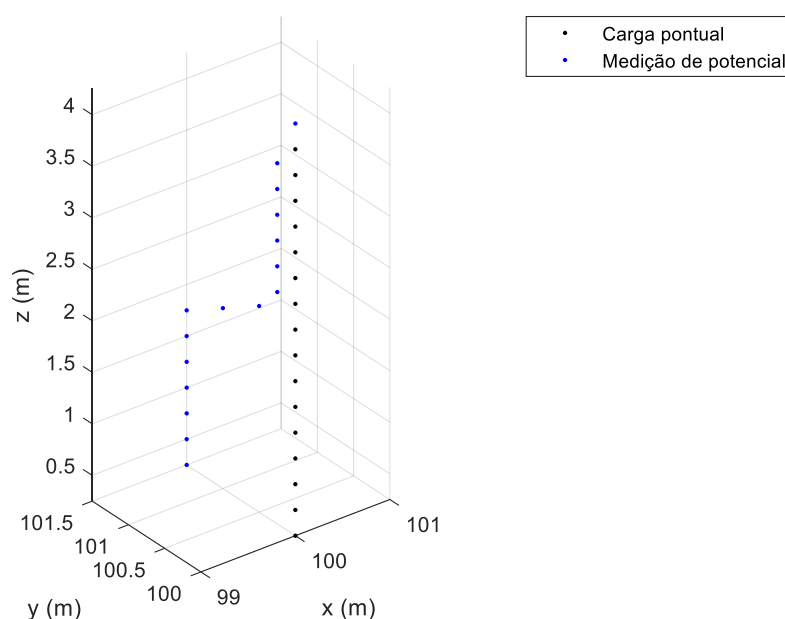


Figura 4.7 - Objeto auxiliar para medição do campo elétrico ao nível do solo.

4.3 Análise de Atratividade

O modelo para análise de atratividade de descargas atmosféricas por linhas de transmissão consiste no monitoramento da evolução do campo elétrico em pontos chave na região em que a linha está posicionada. Neste trabalho são comparados os campos elétricos nos pontos críticos correspondentes: 1 m acima da torre central; 1 m acima do cabo para-raios na posição mais próxima da projeção do DNL no solo; 1 m acima do objeto auxiliar posicionado ao nível do solo na projeção do DNL, conforme representação esquemática apresentada na Figura 4.8.

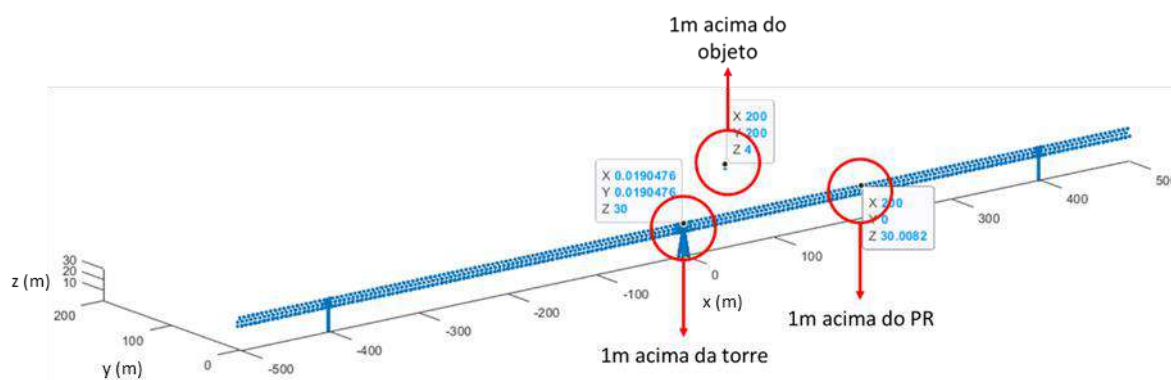


Figura 4.8 - Representação esquemática dos pontos chave para monitoramento da evolução do campo elétrico.

O *leader* é projetado sobre 55 pontos localizados no interior de uma área quadrada cuja lateral é correspondente a metade do vão da linha de transmissão avaliada. Os pontos são posicionados conforme representado pela Figura 4.9. Cada ponto recebe também uma coordenada alfanumérica, conforme representado pelos eixos secundários da Figura 4.9, esta é uma forma de facilitar a o armazenamento e a identificação dos arquivos gerados.

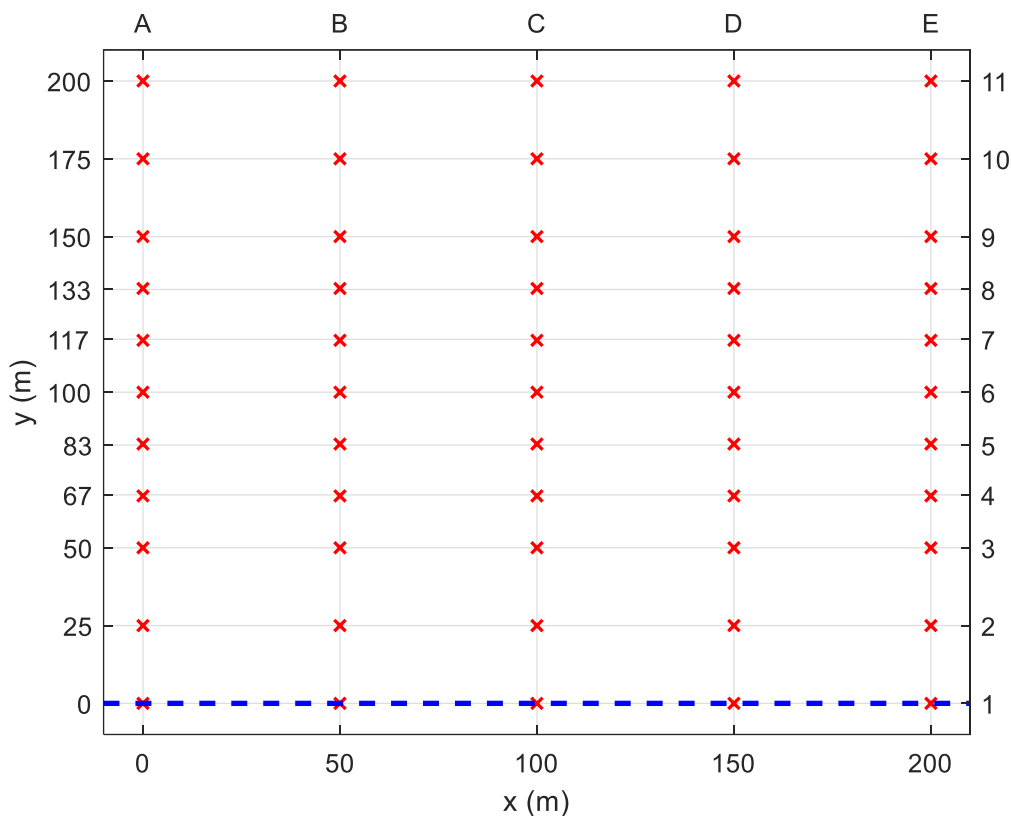


Figura 4.9 - Pontos de projeção do DNL para análise de atratividade de descargas atmosféricas por uma linha de transmissão com vãos de 400 m.

Sabe-se a partir dos resultados apresentados por Guimarães *et al.* [11] que o limiar do campo elétrico para iniciação do canal ascendente na torre instrumentada da Estação Morro do Cachimbo é $64,2 \text{ kV/m}$ quando a medição é realizada ao nível do solo a 50 m da base da torre. No entanto, a construção do modelo para análise da atratividade guarda diferenças para com a situação na qual se obteve o limiar do campo elétrico: a geometria do relevo abordada nesta seção é o solo plano e a estrutura considerada é uma linha de transmissão. Torna-se necessário traduzir o campo elétrico crítico obtido ao nível do solo (E_{50m}) para um valor localizado 1m acima da torre de MCS (E_{1m}) no mesmo instante de desenvolvimento do DNL. O campo elétrico E_{1m} verificado quando o limiar é atingido em E_{50m} será tomado como o critério para iniciação do canal ascendente acima de qualquer estrutura aterrada. Não há equipamentos de medição de campo elétrico posicionados em E_{1m} , portanto, recorre-se à simulação apresentada no Capítulo 3 e verifica-se $E_{1m} = 624 \text{ kV/m}$ quando $E_{50m} = 64,2 \text{ kV/m}$.

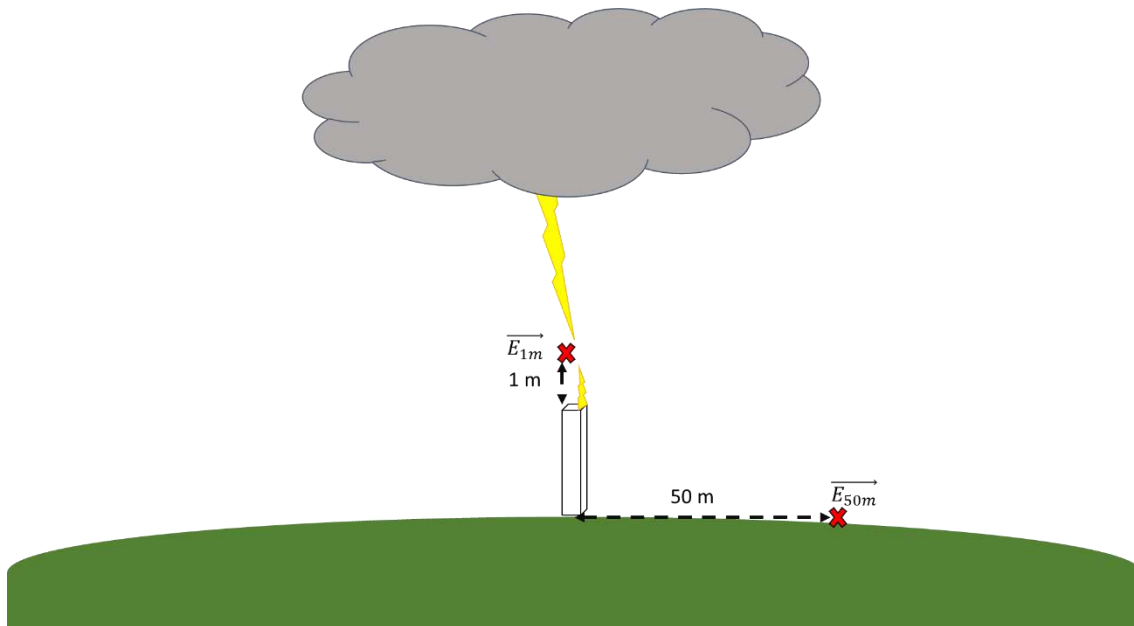


Figura 4.10 - Representação esquemática do ponto de medição do campo elétrico localizado a 50 m da base da torre e do ponto de medição do campo elétrico simulado a 1 m acima da torre.

4.3.1 Relação entre carga transferida e corrente de retorno

A carga transferida (Q_t) pode ser relacionada com a corrente de retorno (I_p) por meio de algumas expressões disponíveis na literatura. A equação (4.4) apresentada por Cooray *et al.* [53] foi obtida pela integração das correntes de retorno correspondentes aos primeiros 100 μs para descargas medidas no Monte San-Salvatore. Observou-se forte correlação linear entre carga e corrente de retorno e observou-se que os 100 μs abrangem toda a carga neutralizada durante o primeiro pico de corrente. A equação (4.5) foi obtida pelos dados de carga transferida e corrente de pico para descargas medidas na Estação Morro do Cachimbo, esta equação foi apresentada por Almeida e Visacro [48] e equivale a toda a carga transferida durante o processo, não apenas o primeiro pico. Percebe-se que as equações fornecem resultados diferentes, guardando uma relação de aproximadamente 2.

$$Q_{100 \mu s} = 0,061 \cdot I_p \quad (4.4)$$

$$Q_t = 0,14 \cdot I_p^{0,979} \quad (4.5)$$

A nuvem de tempestade padrão continua sendo aquela apresentada no Capítulo 2, com diâmetro de 10 km e cargas distribuídas ao longo de 4 regiões cilíndricas. Visando obter diferentes cenários de corrente de retorno e aplicar o modelo para análise de atratividade em diferentes condições variou-se o diâmetro da nuvem de tempestade, de

2,5 km até 55 km. Esta metodologia, apresentada por Costa *et al.* [54], foi aplicada neste trabalho conforme ilustrado pela Figura 4.11 na qual o diâmetro da nuvem foi variado de 2,5 km até 55 km e verificou-se o perfil vertical do campo elétrico. A curva preta se refere ao campo devido à nuvem padrão com diâmetro de 10 km; as curvas que estão à direita na parte superior do gráfico representam os perfis de campo elétrico devido às nuvens de maiores diâmetros; enquanto a curva localizada à esquerda apresenta o perfil provocado pela nuvem de menor diâmetro. A Figura 4.12 apresenta os perfis verticais para o potencial elétrico para os mesmos arranjos de nuvem da figura anterior.

Verificou-se também, em um dos cenários, o efeito de dobrar o valor das cargas contidas na nuvem de diâmetro 5 km.

Os cenários simulados são apresentados nas próximas seções e identificados a partir das dimensões da nuvem e carga transferida, estas grandezas podem ser relacionadas com a corrente de retorno a partir dos dados apresentados na Tabela 4.1, analisando criticamente as diferenças apontadas entre as equações que correlacionam ambas as grandezas. As cargas transferidas para cada condição de nuvem foram calculadas de acordo com o método apresentado por Arcanjo [13] e são apresentadas na Figura 4.13. A carga transferida é a diferença entre as cargas acumuladas ao longo do canal no momento imediatamente anterior ao *attachment* e as cargas acumuladas ao longo do canal após o *attachment*.

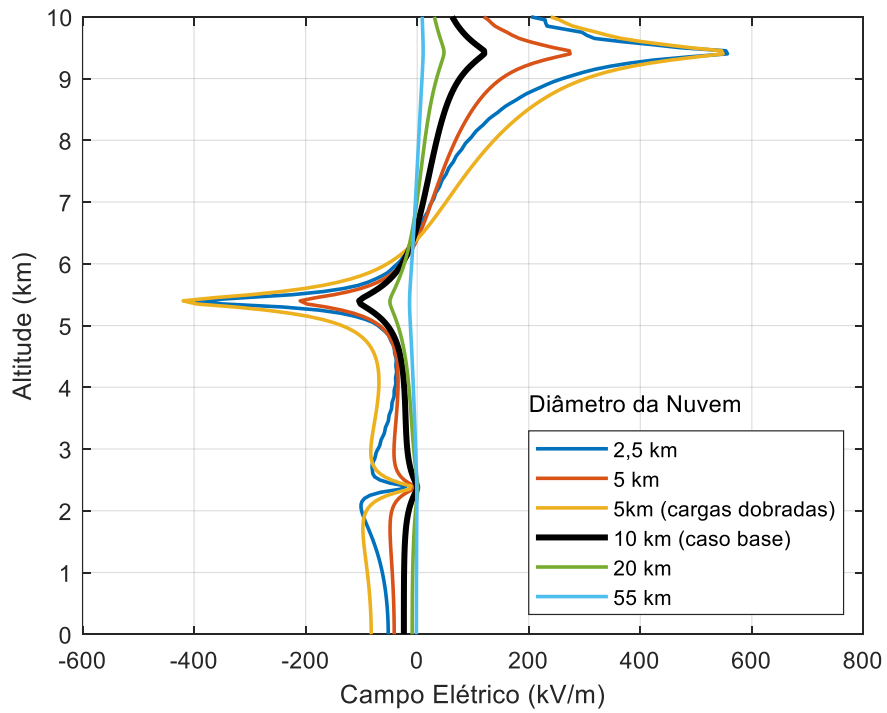


Figura 4.11 – Perfil vertical do campo elétrico para uma série de arranjos de nuvem de tempestade.

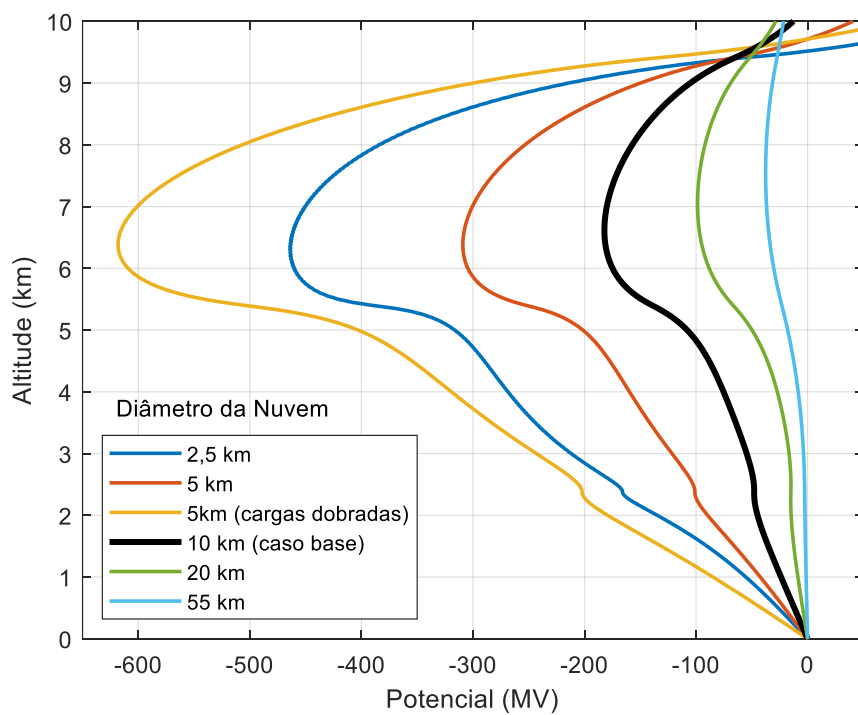


Figura 4.12 - Perfil vertical do Potencial Elétrico para uma série de arranjos de nuvem de tempestade.

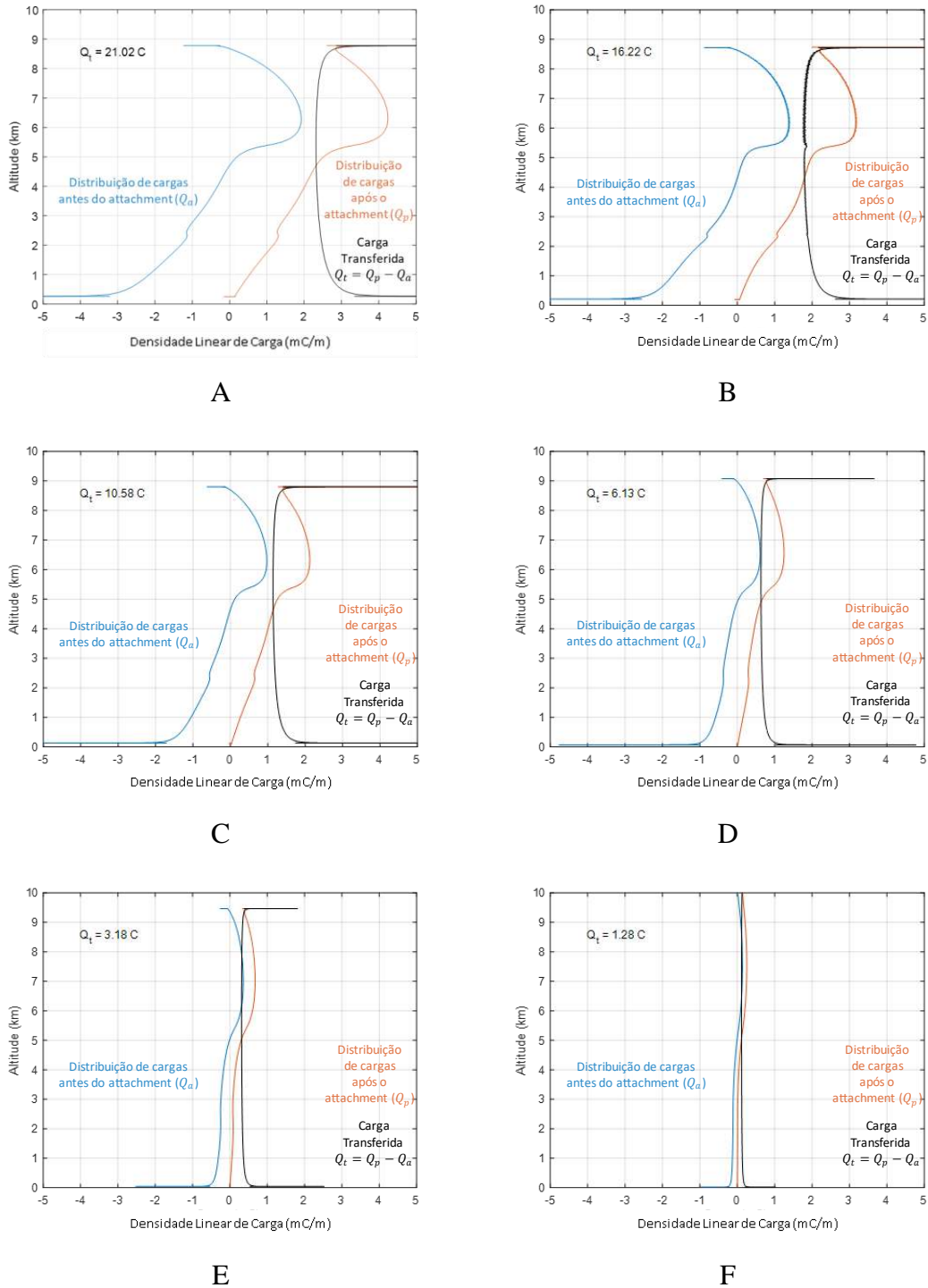


Figura 4.13 – Representação das distribuições de carga ao longo do canal nos momentos imediatamente anterior (curva azul) e posterior (curva vermelha) ao attachment para os cenários apresentados na Tabela 4.1. A diferença entre estas cargas (curva preta) corresponde à carga transferida pela descarga.

Tabela 4.1 - Relação entre Carga Transferida, Corrente de Retorno para as variações adotadas no diâmetro e na carga interna da nuvem de tempestade. (a) é a nuvem de tempestade padrão; (b) representa uma nuvem de tempestade com carga padrão e diâmetro alterado para 5km; (c) representa uma nuvem de tempestade com cargas internas da nuvem dobradas e diâmetro de 5 km.

Cenário	Carga (Q)	Diâmetro da nuvem (d)	Corrente de retorno (I_p)	
			Equação (4.4)	Equação (4.5)
A	21,02 C	5 km ^c	344 kA	167 kA
B	16,22 C	2,5 km	266 kA	128 kA
C	10,58 C	5 km ^b	173 kA	83 kA
D	6,13 C	10 km ^a	100 kA	47 kA
E	3,18 C	20 km	52 kA	24 kA
F	1,28 C	55 km	21 kA	10 kA

Analisando os resultados apresentados pela tabela e pelas figuras acima pode-se concluir que a técnica da variação do diâmetro da nuvem e da variação das cargas internas da nuvem é eficaz para se obter cenários de simulação com correntes de retorno dentro da faixa que se deseja analisar: entre 10 kA e 167 kA por serem valores compatíveis com o histórico de descargas de MCS, conforme os resultados mais recentes apresentados por Silveira e Visacro [5]. Nuvens com diâmetros menores serão responsáveis por descargas com correntes de retorno maiores, quando comparadas a outras nuvens com a mesma carga interna. Observe que a diminuição do diâmetro da nuvem sem a alteração das cargas internas faz com que a quantidade de cargas acumuladas na região próxima ao ponto de surgimento do canal no interior da nuvem seja maior.

4.4 Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações realizadas com o modelo para análise de atratividade da linha de transmissão. O primeiro resultado consiste em determinar o ponto de iniciação do UPL de acordo com o ponto de incidência do DNL para uma descarga formada a partir de uma nuvem de tempestade padrão. São apresentados resultados para outros casos, com variações no diâmetro e nas cargas da nuvem, visando obter transferências de carga variando de 1,28 C a 21,02 C.

4.4.1 Caso Base – Carga Transferida: 6,13 C

A Figura 4.14 ilustra a atratividade de uma descarga atmosférica de 6,13 C pela linha de transmissão. Esta descarga foi obtida a partir de uma nuvem com diâmetro de 10 km e valores padrão de carga, conforme o modelo descrito no Capítulo 2.

Observa-se que para as regiões hachuradas em azul o canal ascendente inicia-se pelo topo da torre central; para as regiões hachuradas em vermelho o canal ascendente inicia-se pelo ponto mais próximo localizado acima do cabo para-raios da linha de transmissão; enquanto para as regiões hachuradas em verde o canal ascendente inicia-se pelo objeto auxiliar posicionado nas proximidades do solo. Note que a relação entre a soma das áreas hachuradas em azul e vermelho e da área total compreendendo o conjunto de cores indica o percentual de descargas que prospectivamente incidiriam nesta região que estão sendo atraídas pela linha de transmissão para esta valor específico de carga transferida ou corrente de pico.

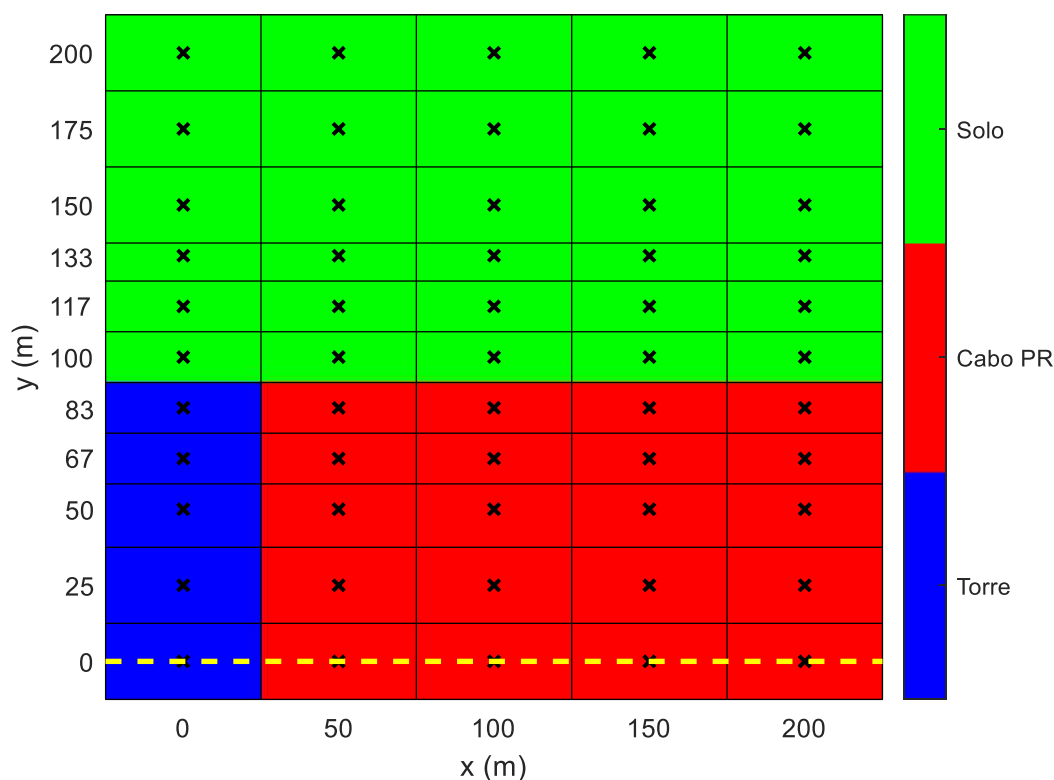


Figura 4.14 - Atratividade da linha de transmissão para uma descarga de 6,13 C.

4.4.2 Carga Transferida: 1,28 C

A Figura 4.15 ilustra a atratividade de uma descarga atmosférica de 1,28 C pela linha de transmissão. Esta descarga foi obtida a partir de uma nuvem com diâmetro de 55 km e valores padrão de carga resultando em uma menor densidade de cargas no interior da nuvem, quando comparada ao modelo padrão descrito no Capítulo 2. Observa-se que a atratividade pela torre central e pela linha, respectivamente hachuras azul e vermelha, ocorre somente quando o DNL é projetado sobre o eixo da LT; quando a projeção do *leader* se dá em pontos mais distantes a iniciação do canal ascendente ocorre no objeto auxiliar posicionado próximo ao solo.

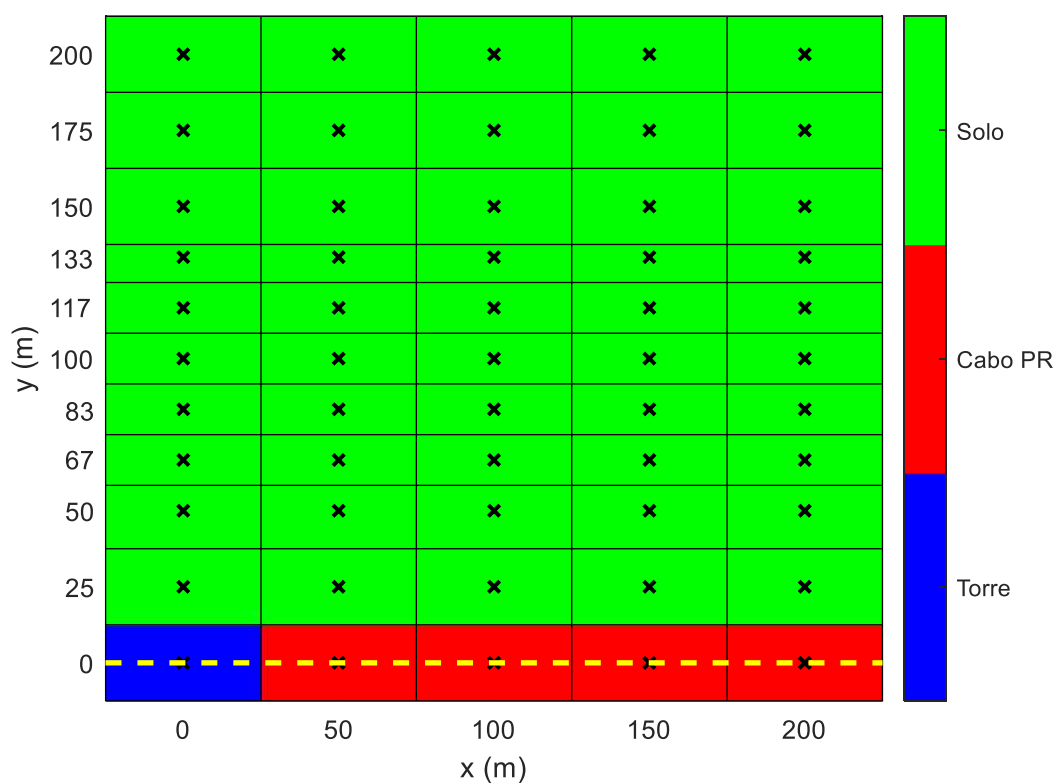


Figura 4.15 - Atratividade da linha de transmissão para uma descarga de 1,28 C.

4.4.3 Carga Transferida: 3,18 C

A Figura 4.16 ilustra a atratividade de uma descarga atmosférica de 3,18 C pela linha de transmissão. Esta descarga foi obtida a partir de uma nuvem com diâmetro de 20 km e valores padrão de carga resultando em uma menor densidade de cargas no interior da nuvem, quando comparada ao modelo padrão descrito no Capítulo 2. Observa-se que a atratividade pela torre central ocorre em canais projetados em até 50 m; para o cabo

para-raios da linha ocorre em canais projetados até 25 m; e que canais projetados em distâncias maiores fazem com que a atratividade e, conseqüentemente, iniciação do canal ascendente ocorra no objeto auxiliar posicionado próximo ao solo.

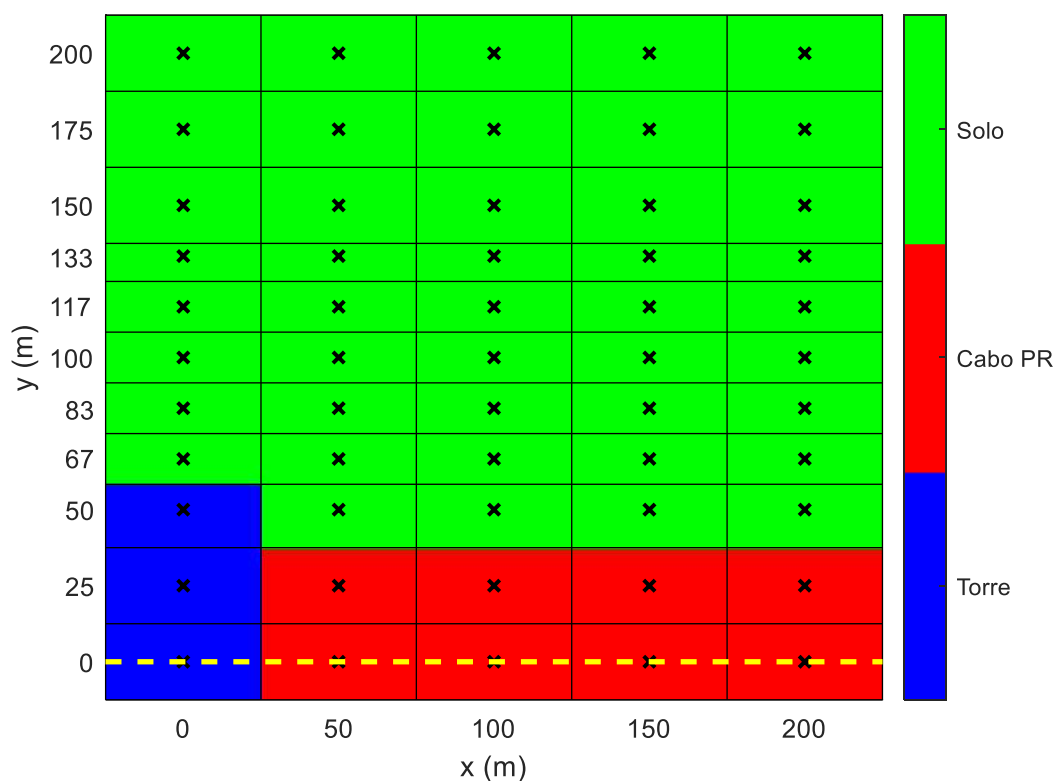


Figura 4.16 - Atratividade da linha de transmissão para uma descarga de 3,18 C.

4.4.4 Carga Transferida: 10,58 C

A Figura 4.17 ilustra a atratividade de uma descarga atmosférica de 10,58 C pela linha de transmissão. Esta descarga foi obtida a partir de uma nuvem com diâmetro de 5 km e valores padrão de carga resultando em uma maior densidade de cargas no interior da nuvem, quando comparada ao modelo padrão descrito no Capítulo 2. Observa-se que a atratividade pela torre central ocorre em canais projetados em até 150 m; para o cabo para-raios da linha ocorre em canais projetados até 117 m; e que canais projetados em distâncias maiores fazem com que a atratividade e, conseqüentemente, iniciação do canal ascendente ocorra no objeto auxiliar posicionado próximo ao solo.

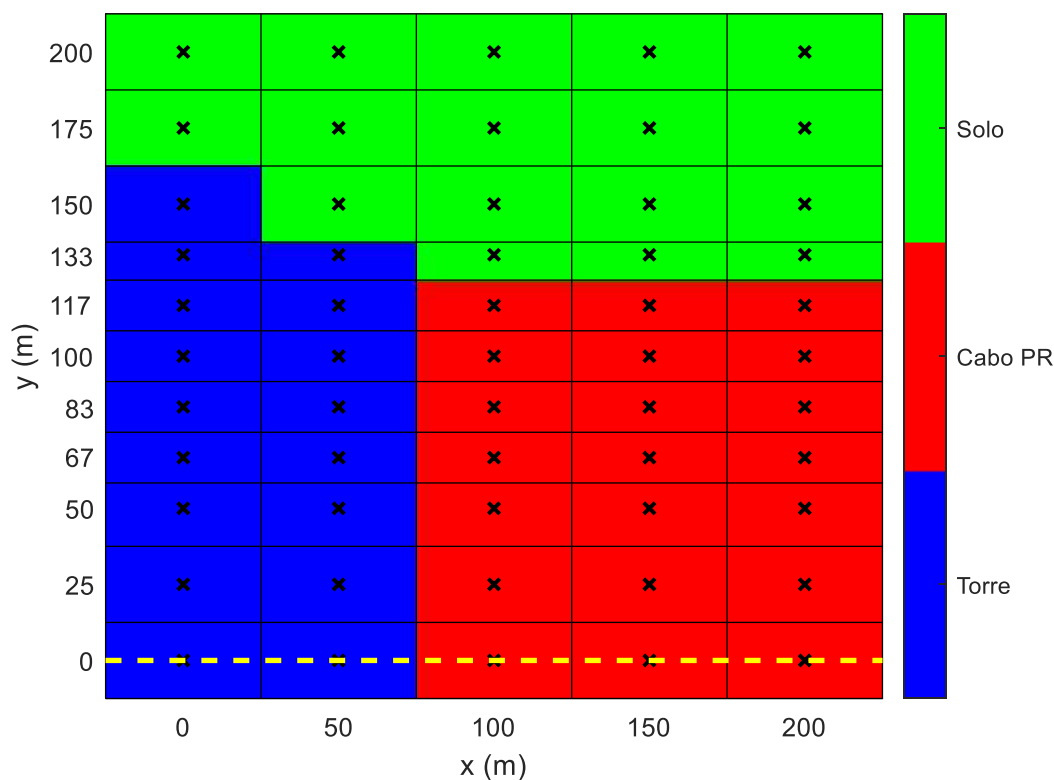


Figura 4.17 - Atratividade da linha de transmissão para uma descarga de 10,58 C.

4.4.5 Carga Transferida: 16,22 C

A Figura 4.18 ilustra a atratividade de uma descarga atmosférica de 16,22 C pela linha de transmissão. Esta descarga foi obtida a partir de uma nuvem com diâmetro de 2,5 km e valores padrão de carga resultando em uma maior densidade de cargas no interior da nuvem, quando comparada ao modelo padrão descrito no Capítulo 2. Observa-se que a atratividade pela torre central ocorre em canais projetados em até 200 m; para o cabo para-raios da linha ocorre em canais projetados até 175 m; e que canais projetados em distâncias maiores fazem com que a atratividade e, conseqüentemente, iniciação do canal ascendente ocorra no objeto auxiliar posicionado próximo ao solo. Neste cenário fez-se necessário estender a região analisada para além dos limites da área quadrada inicialmente proposta, neste caso projetou-se descargas até uma distância transversal de 225 m em relação a linha de transmissão a fim de se obter a atratividade para o solo em todos os pontos longitudinais.

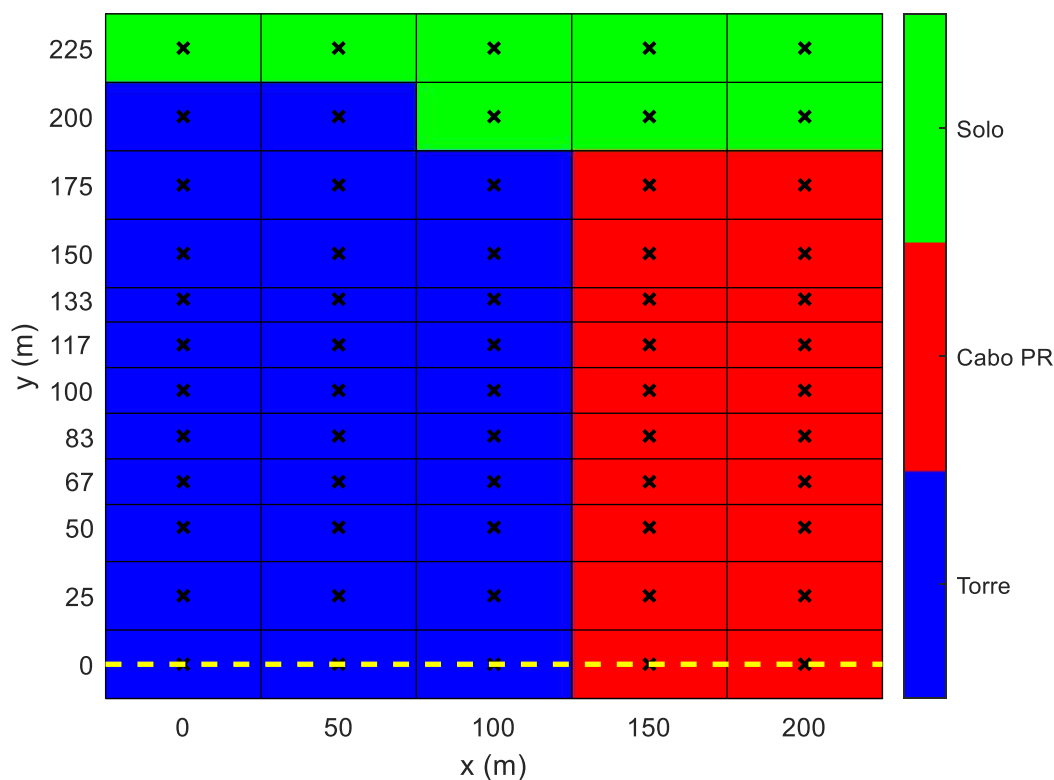


Figura 4.18- Atratividade da linha de transmissão para uma descarga de 16,22 C.

4.4.6 Carga Transferida: 21,02 C

A Figura 4.19 ilustra a atratividade de uma descarga atmosférica de 21,02 C pela linha de transmissão. Esta descarga foi obtida a partir de uma nuvem com diâmetro de 5 km e valores dobrados de carga resultando em uma maior densidade de cargas no interior da nuvem, quando comparada ao modelo padrão descrito no Capítulo 2. Observa-se que a atratividade para o objeto auxiliar posicionado próximo ao solo não ocorreu em nenhum ponto dentro da região inicialmente analisada. Desta forma fez-se necessário estender os limites da análise até que se obtivesse a atratividade para o solo em todos os pontos longitudinais. A atratividade pela torre central ocorre em canais projetados em até 250 m; para o cabo para-raios da linha ocorre em canais projetados até 200 m; e que canais projetados em distâncias maiores fazem com que a atratividade e, conseqüentemente, iniciação do canal ascendente ocorra no objeto auxiliar posicionado próximo ao solo.

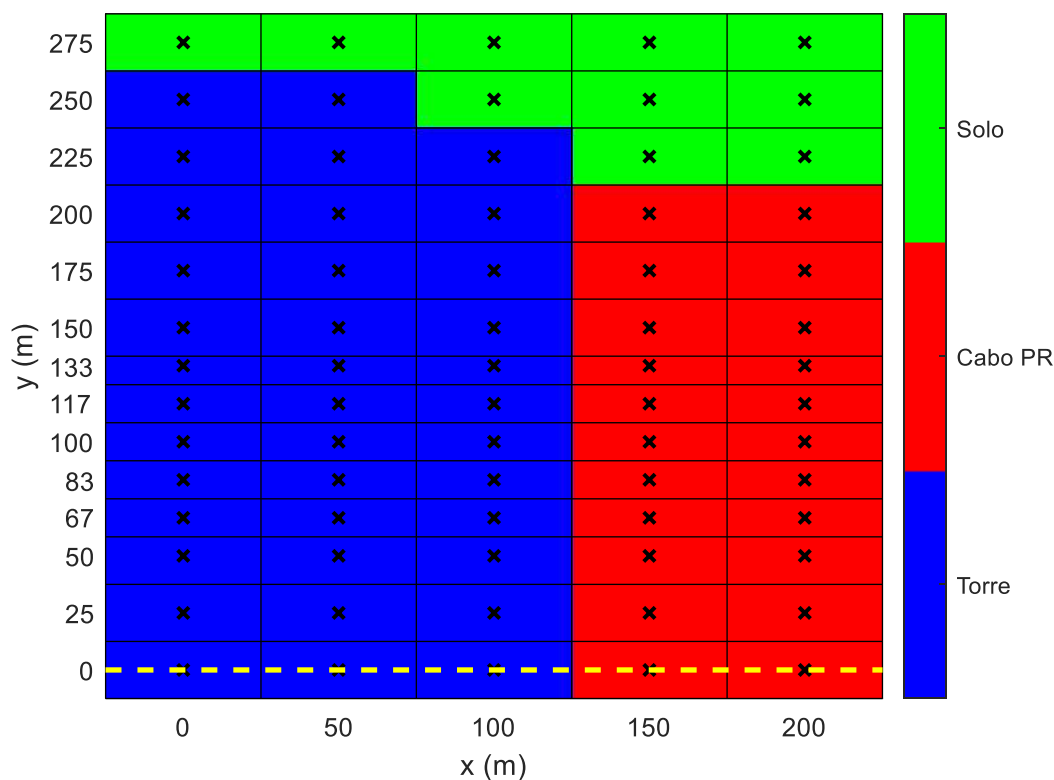


Figura 4.19- Atratividade da linha de transmissão para uma descarga de 21,02 C.

4.5 Análise dos resultados

Conforme apresentado na seção 4.3 verificou-se que o aumento do diâmetro da nuvem de tempestade é responsável pela diminuição dos potenciais e do campo elétrico percebidos ao longo de um perfil vertical localizado próximo ao eixo do canal descendente.

Observa-se que uma nuvem com dimensões maiores faz com que haja menor acúmulo de cargas ao longo da porção negativa do canal descendente bipolar e, conseqüentemente, uma menor carga transferida na descarga nuvem-solo. Pode-se entender que o aumento nas dimensões da nuvem relaciona-se com a diminuição dos valores percebidos de corrente de retorno. Tomando ainda como exemplo as nuvens de dimensões aumentadas, percebe-se que a atratividade das estruturas aterradas, exemplificada como uma linha de transmissão, é menor quando da aproximação de canais menos carregados, se comparada à situação percebida com a nuvem padrão de diâmetro igual a 10 km. Nestes casos, o surgimento do canal ascendente ocorrerá no topo da estrutura somente quando o DNL for projetado em pontos muito próximos da linha de transmissão.

Por outro lado, em cenários nos quais as dimensões da nuvem foram reduzidas ou os valores das cargas do interior da nuvem foram aumentadas, percebe-se o comportamento inverso. A estrutura aterrada torna-se mais atrativa que o observado pelo caso da nuvem de tempestade padrão, com diâmetro de 10 km. Observa-se que o canal ascendente inicia a partir do topo da torre ou dos cabos para-raios mesmo em pontos relativamente distantes do eixo da linha de transmissão.

4.6 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado um modelo para análise de atratividade de descargas atmosféricas por linhas de transmissão, que consiste em uma série de simulações com a finalidade de indicar qual estrutura seria a responsável pela iniciação do canal ascendente quando da existência de um DNL se desenvolvendo nas proximidades.

Foram apresentados os passos e equações necessários para a representação computacional de um tipo determinado de linha de transmissão segundo a metodologia proposta. Cabe destacar que o procedimento pode ser replicado para outros arranjos de linhas de transmissão, bastando realizar as devidas alterações nos parâmetros referentes à geometria das torres e cabos.

Por fim, foram apresentados os resultados e análises para uma sequência definida de cenários, variando o ponto de projeção do *leader* e a densidade de cargas da nuvem, a fim de se variar a carga total transferida. Foram apresentados graficamente os resultados, determinando o ponto de iniciação do UPL para cada cenário simulado.

5 Conclusões

5.1 Considerações Iniciais

O grupo de pesquisa do *Lightning Research Center* (LRC) vem realizando há alguns anos um trabalho de investigação articulado que consiste no desenvolvimento de um modelo de formação do canal baseado na teoria de Kasemir que se sustenta a partir da formação e evolução de um *leader* bipolar, bidirecional e de carga líquida nula. Este modelo vem sendo aprimorado a cada trabalho (duas dissertações de mestrado anteriores). Esta é a terceira dissertação a abordar o tema. Particularmente, conseguiu-se realizar um modelo integral com representação de todos os componentes envolvidos na formação e evolução do canal de uma descarga bipolar, do canal unipolar de uma descarga ascendente e a transferência de carga após o *attachment* destes dois canais.

5.2 Conclusões Gerais

O presente trabalho apresenta duas contribuições importantes: o desenvolvimento de um modelo de representação do solo mais elaborado; e a aplicação do modelo, inicialmente na hipótese do solo plano, para avaliação da atratividade de estruturas frente a descargas atmosféricas.

5.2.1 Modelo de representação do solo

A representação do solo adotada nas dissertações anteriores consistia numa representação simplificada de cargas profundas que conseguiam reproduzir o potencial nulo na superfície do solo, mas com uma oscilação significativa. Uma das contribuições deste trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo de representação do solo muito mais elaborado, baseado na distribuição de cargas superficiais no relevo do solo, que

admite uma representação bastante apurada de qualquer tipo de relevo na aplicação deste modelo. Este trabalho apresenta toda a formulação deste modelo de representação do solo, bem como resultados de potenciais e campos na superfície do solo muito mais exatos do que aqueles das aproximações apresentadas em trabalhos anteriores.

Os resultados e análises das simulações realizadas com este modelo foram apresentados no Capítulo 3 e pode-se destacar as seguintes conclusões:

- O novo modelo permite obtenção direta dos valores de campo elétrico ao nível do solo a partir das distribuições superficiais de carga, com grande exatidão e constitui-se em uma importante ferramenta para determinação do *striking distance*;
- O modelo permite avaliar o campo elétrico em diversos pontos, sendo possível transferir a condição de início do canal ascendente verificada a 50 m da base da torre de MCS para uma condição localizada acima da torre. Permitindo que as análises sejam replicadas a qualquer outra configuração de relevo e estrutura.

5.2.2 Análise da atratividade

A segunda contribuição deste trabalho consiste na aplicação do modelo, inicialmente na hipótese do solo plano para se avaliar a atratividade de canais descendentes de descarga uma descarga nuvem-solo desenvolvida por estruturas, no caso uma linha de transmissão. Neste sentido, foi realizado um grande número de simulações que permitiram avaliar a aproximação deste canal em posições diferentes nas laterais da linha e sobre a linha. Considerando diferentes cenários de cargas negativas acumuladas na parte inferior do canal verificou-se quais seriam as descargas que iriam incidir na linha de transmissão ou no solo próximo.

Destaca-se como conclusão que foi possível elaborar uma maneira de medir a atratividade de uma descarga nuvem-solo por uma estrutura aterrada em função da carga acumulada na extremidade negativa daquele canal descendente.

5.3 Propostas de continuidade

O modelo mais elaborado de representação do solo desenvolvido nesta dissertação permite calcular com uma melhor exatidão a relação entre o campo elétrico medido ao

nível do solo e o campo existente no alto de estruturas, no momento de iniciação do canal ascendente, de tal maneira que isso possibilite a aplicação dos resultados obtidos em MCS para estruturas colocadas em qualquer outro tipo de solo.

Uma continuidade deste trabalho de interesse para a engenharia consiste na aplicação sistemática do modelo em outros tipos de relevo e estruturas, para a avaliação da atratividade destas.

Outra aplicação de interesse consiste no uso do modelo desenvolvido em análises de atratividade de linhas de transmissão de diferentes configurações e níveis de tensão para eventual proposição de expressões concisas relacionando a atratividade destas com parâmetros da linha e com o pico de corrente. E, posteriormente, com os dados obtidos, avaliar a possibilidade de desenvolver um modelo de atratividade consoante à linhas de transmissão.

6 Referências Bibliográficas

- [1] S. Visacro, *Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem em Engenharia*, São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2005.
- [2] S. Visacro, A. Soares, M. Schroeder, L. Cherchiglia e V. Sousa, “Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station,” *Journal Geophysical Research*, vol. 109, nº D01105, pp. 1-11, 2004.
- [3] S. Visacro, M. Vale, G. Correa e A. Teixeira, “Early phase of lightning currents measured in a short tower associated with direct and nearby lightning strikes,” *Journal Geophysical Research*, vol. 115, nº D16104, pp. 1-11, 2010.
- [4] S. Visacro, C. Mesquita, A. d. Conti e F. Silveira, “Updated statistics of lightning currents measured at Morro do Cachimbo Station,” *Atmospheric Research*, vol. 117, pp. 55-63, 2012.
- [5] F. H. Silveira e S. Visacro, “Lightning Parameters of a Tropical Region for Engineering Application: Statistics of 51 Flashes Measured at Morro do Cachimbo and Expressions for Peak Current Distributions,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, nº 4, pp. 1186-1191, Agosto 2020.
- [6] S. Visacro, L. Araujo, M. Guimarães e M. Vale, “M-component currents of first return strokes in natural negative cloud-to-ground lightning,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 118, pp. 12132-12138, 2013a.

- [7] M. Guimarães, L. Araujo, C. Pereira, C. Mesquita e S. Visacro, “Assessing currents of upward lightning measured in tropical regions,” *Atmospheric Research (Print)*, vol. 149, pp. 324-332, 2014.
- [8] M. Guimarães, “Observação e modelagem dos processos físicos envolvidos na formação das descargas atmosféricas,” Belo Horizonte, 2017.
- [9] S. Visacro, M. Guimarães e M. Vale, “Features of upward positive leaders initiated from towers in natural CG lightning based on simultaneous high-speed videos, measured currents and electric fields,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 122, pp. 12786-12800, 2017a.
- [10] S. Visacro, M. Guimarães e M. Vale, “Striking distance determined from high-speed videos and measured currents in negative cloud-to-ground lightning,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 122, pp. 13356-13369, 2017b.
- [11] M. Guimarães, M. Vale e S. Visacro, “Electric Field During Upward Connecting Leader Initiation in Negative Cloud-to-Ground Lightning Measured at a 50-m Distance,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. PP, n° 99, pp. 1-4, 2018.
- [12] R. Louro, “Análise da Formação de Descargas Atmosféricas Baseada na Aplicação do Modelo do Leader Bidirecional,” Belo Horizonte, 2017.
- [13] M. Arcanjo, “Modelo Computacional para Simulação da Formação do Canal de Descargas Atmosféricas: Desenvolvimento e Aplicação para Monitoramento da Evolução das Grandezas Elétricas Envolvidas,” Belo Horizonte, 2018.
- [14] V. MAZUR e L. RUHNKE, “Model of electric charges in thunderstorms and associated lightning,” *J. Geophys. Res.*, vol. 103, n° D18, p. 23299–23308, 1998.
- [15] V. Rakov e M. Uman, “Lightning Physics and Effects,” 2003.

- [16] B. Schonland, "Progressive Lightning IV - The Discharge Mechanism," *A. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 164, n° 916, pp. 132-150, 1938.
- [17] B. Scholand e H. Collens, "Progressive Lightning," *A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 143, n° 850, pp. 656-674, 1934.
- [18] B. Schonland, D. Malan e H. Collens, "Progressive Lightning – II," *A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 152, n° 877, pp. 595-625, 1935.
- [19] D. Malan e H. Collens, "Progressive Lightning. III. The Fine Structure of Return Lightning Strokes," *A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 162, pp. 175-203, 1937.
- [20] H. W. Kasemir, "Qualitative ubersicht uber potential-, feld-und ladungsverhaltnisse bei einer blitzentladung in der gewitterwolke (qualitative survey of the potential, field and charge conditions during a lightning discharge in the thunderstorm cloud)," *Das Gewitter, edited by H. Israel, Akadem. Verlagsgesellschaft*, pp. 112-126, 1950.
- [21] H. W. Kasemir, "A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge," *Journal of Geophysical Research*, vol. 65, n° 7, pp. 1873-1878, 1960.
- [22] H. Kasemir, "Static discharge and triggered lightning," em *Heinz-Wolfram Kasemir: His collected works*, 1 ed., Wash. DC, American Geophysical Union, 2012, pp. 418-428.
- [23] V. Mazur e L. Ruhnke, "Model of electric charges in thunderstorms and associated lightning," *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, n° D18, pp. 23299-23308, 1998.
- [24] T. Warner, M. Saba, C. Schumann, J. H. Jr. e R. Orville, "Observations of bidirectional lightning leader initiation and development near positive leader channels," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 121, pp. 9251-9260, 2016.

- [25] O. V. D. Velde e J. Montanya, “Asymmetries in bidirectional leader development of lightning flashes,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 118, pp. 13504-13519, 2013.
- [26] M. Tran e V. Rakov, “Initiation and propagation of cloud-to-ground lightning observed with a high-speed video camera,” *Nature, Scientific Reports*, vol. 6, n° 1, pp. 1-11, 2016.
- [27] C. BIAGI, D. JORDAN, M. UMAN, J. HILL, W. BEASLEY e J. HOWARD, “Highspeed video observations of rocket-and-wire initiated lightning,” *Geophysical Research Letters*, vol. 36, n° 15, 2009.
- [28] J. D. HILL, M. A. UMAN e D. M. JORDAN, “High-speed video observations of a lightning stepped leader,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 116, n° D16, 2011.
- [29] E. M. BAZELYAN e Y. P. RAIZER, *Lightning physics and lightning protection*, CRC Press, 2000.
- [30] C. BIAGI, M. UMAN, J. HILL, D. JORDAN, V. RAKOV e J. DWYER, “Observations of stepping mechanisms in a rocket-and-wire triggered lightning flash,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 115, n° D23, 2010.
- [31] C. BIAGI, M. UMAN, J. HILL e D. JORDAN, “Negative leader step mechanisms observed in altitude triggered lightning,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 119, n° 13, pp. 8160-8168, 2014.
- [32] Q. QI, W. LU, Y. MA, L. CHEN, Y. ZHANG e V. RAKOV, “High-speed video observations of the fine structure of a natural negative stepped leader at close distance,” *Atmospheric Research*, vol. 178, pp. 260-267, 2016.
- [33] M. ARCANJO, M. GUIMARÃES, G. BERTOLIM, P. MATTIOLI e S. VISACRO, “On the interpeak interval of early phase of negative CG

- lightning currents,” em *XIV SIPDA – International Symposium on Lightning Protection*, Natal, Brasil, 2017.
- [34] E. M. BAZELYAN e RAIZER, *Lightning Physics and Lightning Protection*, CRC Press, 2000.
- [35] V. MAZUR, *Principles of Lightning Physics*, IoP Publishing, 2016.
- [36] M. SABA, S. C., T. WARNER, J. HELSDON e R. ORVILLE, “High-speed video and electric field observation of a negative upward leader connecting a downward positive leader in a positive cloud-to-ground flash,” *Electric Power Systems Research*, vol. 118, pp. 89-92, 2015.
- [37] S. VISACRO, ARCANJO, V. M. M. e M. GUIMARÃES, “On the records of current, electric field and high-speed vídeo of a recent negative downward lightning measured at Morro do Cachimbo Station,” em *GROUND 2018 & 8th LPE, International Conference on Grounding and Earthing & 8th International Conference on Lightning, Physics and Effects*, 2018.
- [38] L. CAMPOS, “On the mechanisms that lead to multiple ground contacts in lightning,” 2016.
- [39] M. SABA, A. PAIVA, S. C., M. FERRO, K. NACCARATO, J. SILVA, F. SIQUEIRA e D. CUSTÓDIO, “Lightning attachment process to common buildings,” *Geophysical Research Letter*, vol. 44, n° 9, pp. 4368-4375, 2017.
- [40] M. UMAN, *Lightning*, Pittsburgh, Pennsylvania: Westinghouse Research Laboratories, 1969.
- [41] M. STOLZENBURG e T. MARSHALL, “Electric field and charge structure in lightning-producing clouds. In H.-D. Betz,” em *Lightning: Principles, instruments and applications*, Springer, Dordrecht, 2009, pp. 57-82.

- [42] N. KARUNARATHNA, T. MARSHALL, S. KARUNARATHNE e M. STOLZENBURG, "Initiation locations of lightning flashes relative to radar reflectivity in four small Florida thunderstorms," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 122, n° 12, pp. 6565-6591, 2017.
- [43] J. KUETTNER, "The electrical and meteorological conditions inside thunderclouds," *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 7, n° 5, pp. 322-332, 1950.
- [44] D. E. PROCTOR, "Regions where lightning flashes began," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 96, n° D3, pp. 5099-5112, 1991.
- [45] M. Becerra, V. Cooray, S. Soula e S. Chauzy, "Effect of the space charge layer created by corona at ground level on the inception of upward lightning leaders from tall towers," *J. Geophys. Res.*, vol. 112, n° D12205, Junho 2007.
- [46] E. M. Bazelyan, Y. P. Raizer e N. L. Aleksandrov, "The effect of space charge produced by corona at ground level on lightning attachment to high objects," *Atmos. Res.*, vol. 153, pp. 74-86, Fevereiro 2015.
- [47] M. Arcanjo, R. Dias e S. Visacro, "An electrostatic model for tracking the evolution of electrical quantities during a negative CG lightning formation," em *GROUND 2018 & 8th LPE, International Conference on Grounding and Earthing & 8th International Conference on Lightning, Physics and Effects*, 2018.
- [48] G. Almeida e G. Visacro, "A new approach for modeling the ground in negative cloud-to ground lightning simulation by an electrostatic-by-step representation of leaders," em *GROUND2020/21 & 9th LPE Conference Proceedings*, Belo Horizonte, 2021.
- [49] R. Palacios, "Função computacional "deg2utm.m"," Madrid, 2006.

- [50] H. Singer, H. Steinbigler e P. Weiss, “A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vols. %1 de %2PAS-93, n° 5, pp. 1660-1668, Setembro 1974.
- [51] S. Visacro, M. Guimarães e M. H. M. Vale, “Striking Distance Determined From High-Speed Videos and Measured Currents in Negative Cloud-to-Ground Lightning,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 122, n° 24, pp. 13356-13369, 2017c.
- [52] S. Visacro, F. H. Silveira, B. Pereira e R. M. Gomes, “Constraints on the use of surge arresters for improving the backflashover rate of transmission lines,” *Electric Power Systems Research*, vol. 180, Março 2020.
- [53] V. Cooray, V. Rakov e N. Theethayi, “The lightning striking,” *Journal of Electrostatics*, vol. 65, n° 5-6, pp. 296-306, Maio 2007.
- [54] K. Costa, M. Guimarães, R. Alípio e M. Arcanjo, “Striking distance to flat ground estimated from the bipolar leader model and the influence of the lightning channel radius,” em *35th ICLP - XVI SIPDA*, Sri Lanka, 2021.