

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1068

**MODELO COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO DA FORMAÇÃO DO
CANAL DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: DESENVOLVIMENTO E
APLICAÇÃO PARA MONITORAMENTO DA EVOLUÇÃO DAS
GRANDEZAS ELÉTRICAS ENVOLVIDAS**

Marcelo Augusto Sousa Arcanjo

DATA DA DEFESA: 18/07/2018

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**MODELO COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO DA
FORMAÇÃO DO CANAL DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS:
DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO PARA MONITORAMENTO
DA EVOLUÇÃO DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS ENVOLVIDAS**

Marcelo Augusto Sousa Arcanjo

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.

Orientador: Prof. Silvério Visacro Filho

Belo Horizonte - MG

Julho de 2018

A668m

Arcanjo, Marcelo Augusto Sousa.

Modelo computacional para simulação da formação do canal de descargas atmosféricas [manuscrito] : desenvolvimento e aplicação para monitoramento da evolução das grandezas elétricas envolvidas / Marcelo Augusto Sousa Arcanjo. – 2018.

96 f., enc.: il.

Orientador: Silvério Visacro Filho.

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

Bibliografia: f. 90-96.

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

CDU: 621.3(043)

"Modelo Computacional para Simulação da Formação do Canal de Descargas Atmosféricas: Desenvolvimento e Aplicação para Monitoramento da Evolução das Grandezas Elétricas Envolvidas"

Marcelo Augusto Sousa Arcanjo

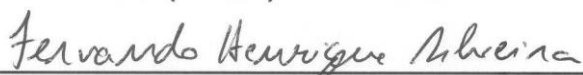
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 18 de julho de 2018.

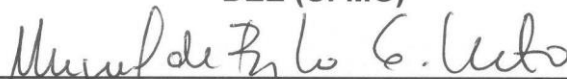
Por:



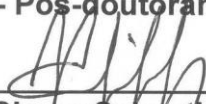
Prof. Dr. Silvério Visacro Filho
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. Fernando Henrique Silveira
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Miguel de Brito Guimarães Neto
LRC - Pos-doutorando (UFMG)



Prof. Dr. Clever Sebastião Pereira Filho
DEE (UFMG)

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus! Ainda há muito o que percorrer, mas sem Ele, jamais teria alcançado tudo o que já conquistei. Sua companhia me fortalece, me dá paz, saúde e sabedoria.

À minha família, pelo apoio incondicional prestado desde o meu primeiro dia de vida. Palavras não são suficientes para descrever toda minha gratidão. Hoje, tudo o que sou é graças ao esforço de vocês para me proporcionar a melhor educação possível.

Ao professor Silvério Visacro, pela valiosa contribuição na orientação deste trabalho e por sua dedicação em transferir aos seus alunos parte de seu conhecimento.

Aos meus atuais e antigos companheiros de pesquisa no LRC: Caio, João, Paula, Pedro e Richard, o meu muito obrigado pela amizade e pelo conhecimento compartilhado. Em especial, agradeço ao Gabriel e ao Kevin pela contribuição direta no desenvolvimento deste trabalho e ao Listz e ao Miguel, por todo incentivo, suporte e disponibilidade ao longo desses anos. Agradeço aos professores Alberto de Conti, Clever Pereira e Fernando Silveira, pela presteza e atenção que sempre disponibilizaram aos seus alunos.

A todas as pessoas que não foram citadas, mas que fazem parte da minha vida, e que tiveram grande importância no sucesso da minha formação profissional e pessoal, fica o meu mais sincero agradecimento.

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a aplicação de um modelo computacional para avaliação das grandezas elétricas envolvidas nos processos de formação da descarga atmosférica negativa nuvem-solo, baseado no modelo do *leader* bidirecional.

O modelo foi aplicado sistematicamente para interpretação dos efeitos associados aos processos e para a quantificação da evolução das grandezas, notadamente, os potenciais desenvolvidos na atmosfera, a carga elétrica total transferida pela descarga e sua distribuição nos canais, no solo e em estruturas aterradas, o campo elétrico ao nível do solo e no topo das estruturas aterradas, além da corrente média induzida nessas estruturas.

Foram analisadas condições reais das ocorrências, incluindo a incidência em estrutura colocada em solo plano e em relevo acidentado. Em particular, usando como referência os dados simultâneos de medição e filmagem de uma descarga real, obtidos recentemente na Estação Morro do Cachimbo, foi determinada a evolução das grandezas elétricas a partir do traçado geométrico desta descarga e os resultados foram comparados com os do evento real.

O modelo mostrou-se consistente e bastante útil para desenvolvimento de análises qualitativas e quantitativas, em certos casos, que subsidiam a interpretação dos processos envolvidos na formação da descarga nuvem solo.

Foram obtidos resultados de interesse prático para a proteção contra descargas derivados da aplicação do modelo, sobretudo aqueles relacionados à definição do raio de atração de estruturas. Em particular, a estimativa do quociente entre os valores de campo elétrico médio acima do topo de estruturas e no solo próximo possibilita se estimar o limiar de campo associado ao surgimento do canal ascendente para determinação do parâmetro *striking distance*.

Abstract

This work presents the development and application of a computational model to evaluate the electrical quantities involved in the processes of formation of a CG lightning leader, based on the bidirectional leader model.

The model was applied systematically for the interpretation of the effects associated to the processes and for quantification of the evolution of quantities, notably, the potentials developed in the atmosphere, the total electric charge transferred by the discharge and its distribution in the channels, in the ground and in grounded structures, the Electric field at ground level and at the top of the grounded structures, as well as the average current induced in these structures.

Real conditions of the occurrences were analyzed, including the incidence at a structure placed on a flat ground and on a mountainous relief. In particular, using the simultaneous measurement and high-speed video data of a real lightning incidence, obtained recently at Morro do Cachimbo Station, the electrical quantities were determined from the geometric trace of this discharge and the results were compared with those of the actual event.

The model proved to be consistent and very useful for the development of qualitative and quantitative analyzes, in several cases, that support the interpretation of the processes involved in the formation of negative CG lightning.

Results of great interest were obtained for the protection against lightning derived from the application of the model, especially those related to the definition of the radius of attraction of structures. In particular, the estimation of the quotient between the values of average electric field above the top of structures and in the near ground makes it possible to estimate the field threshold associated to the emergence of the upward leader to determine the striking distance parameter.

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Relevância e Motivação.....	1
1.2	Objetivo	2
1.3	Metodologia	3
1.4	Estrutura do texto.....	3
2	Descrição do processo de formação da descarga negativa nuvem-solo.....	5
2.1	Considerações Iniciais	5
2.2	Modelos de formação do canal de descarga	5
2.2.1	Modelo clássico	6
2.2.2	Modelo do leader bidirecional.....	7
2.3	Aspectos físicos da descarga negativa nuvem-solo	9
2.3.1	O canal negativo descendente precursor da descarga atmosférica	9
2.3.2	Intervalo entre passos do canal descendente	11
2.3.3	O canal positivo ascendente	11
2.3.4	Evolução dos canais negativo e positivo precedente ao attachment	13
2.3.5	Velocidade média de canais ascendente e descendente.....	14
2.4	Grandezas elétricas envolvidas no estudo das descargas atmosféricas	15
2.5	Considerações finais	17
3	Modelagem do sistema físico envolvido na formação da descarga atmosférica	18
3.1	Introdução	18
3.2	Representação da nuvem de tempestade.....	19
3.2.1	Considerações iniciais	19

3.2.2	Modelo da nuvem de tempestade	20
3.3	Resultados preliminares	22
3.3.1	Posicionamento vertical da nuvem de tempestade	22
3.4	Modelos de corpos condutores.....	24
3.4.1	Modelo do leader	24
3.4.2	Modelo de estruturas aterradas	25
3.5	Modelos de relevo do solo	25
3.5.1	Solo plano.....	25
3.5.2	Solo representando o relevo de MCS	26
3.6	Camada de corona acima do solo	29
3.7	Determinação numérica das grandezas elétricas envolvidas	30
3.7.1	O Método de Simulação de Cargas (CSM)	30
3.7.2	Carga e corrente nas estruturas modeladas.....	32
3.8	Considerações finais	33
4	Dinâmica da simulação da formação do canal de descarga atmosférica.....	34
4.1	Introdução	34
4.2	Condições de contorno do problema	34
4.2.1	Potenciais dos elementos do sistema simulado	35
4.3	Evolução do canal precursor da descarga atmosférica segundo o modelo do <i>leader</i> bidirecional	37
4.3.1	Dinâmica da simulação.....	37
4.3.2	Evolução do leader bidirecional	38
4.3.3	Carga transferida e Campo Elétrico após a corrente de retorno	40
4.4	Modelo computacional	41
4.4.1	Estruturas de dados	42
4.4.2	Descrição da rotina de simulação	43

4.5	Considerações Finais	45
5	Aplicação da ferramenta computacional a casos de interesse.....	46
5.1	Introdução	46
5.2	Apresentação dos casos avaliados	46
5.3	Caso Base.....	48
5.3.1	Resultados.....	48
5.3.2	Carga transferida pela corrente de retorno	54
5.4	Análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada.....	55
5.4.1	Efeito do raio do canal.....	55
5.4.2	Efeito da altura da nuvem de tempestade	61
5.4.3	Considerações adicionais.....	62
5.5	Estimativa do quociente da amplitude dos campos elétricos acima da estrutura e ao nível do solo a 50 m desta (R_E)	63
5.5.1	Campo elétrico sem considerar a presença do canal ascendente.....	63
5.5.2	Determinação de R_E	65
5.5.3	Resultados considerando a representação do canal ascendente.....	66
5.6	Evolução dos canais verticais na condição de relevo de MCS	68
5.6.1	Características do relevo da Estação Morro do Cachimbo.....	68
5.6.2	Resultados.....	69
5.6.3	Considerações adicionais sobre o cômputo do relevo no modelo computacional	74
5.7	Simulação das condições de uma descarga real em MCS	74
5.7.1	Características gerais do evento modelado.....	75
5.7.2	Implementação da representação do canal	76
5.7.3	Resultados.....	78
5.7.4	Efeito da tridimensionalidade do canal: análise preliminar.....	81

5.8	Considerações finais	85
6	Conclusões	87
6.1	Conclusões gerais	87
6.2	Propostas de Continuidade.....	89
7	Referências Bibliográficas	90

1 Introdução

1.1 Relevância e Motivação

Os efeitos provenientes de descargas atmosféricas podem ser extremamente danosos. A busca de soluções para o problema levou equipes de pesquisa da UFMG e da Cemig a iniciarem trabalho pioneiro, na década de 1980, para caracterizar as descargas atmosféricas e a resposta transitória de aterramentos elétricos.

No início dos anos 90, iniciou-se um trabalho de investigação que, na década seguinte, resultou na constituição do Lightning Research Center (LRC), ou Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas, um centro de excelência que hoje é referência mundial na pesquisa teórica e aplicada sobre os raios, seus efeitos e as técnicas de proteção. O Núcleo, resultado de projeto cooperativo entre as duas instituições, conta com a Estação do Morro do Cachimbo (MCS), localizada nos arredores da cidade de Belo Horizonte, dedicada à medição de correntes de raios, campo elétrico, luminosidade e gravação de vídeos (obtidos com câmera ultrarrápida) dos eventos que incidem na torre instrumentada.

A complexidade dos processos físicos envolvidos no fenômeno determina um cenário de conhecimento do tema que, mesmo tendo avançado continuamente nos últimos anos, com a ampliação de registros simultâneos de corrente elétrica, campo elétrico e vídeos de alta velocidade em centros de pesquisa no mundo, ainda está distante do requerido para a sua compreensão plena, bem como do dimensionamento da intensidade dos seus efeitos.

Desde a constituição do LRC, ali foram desenvolvidos importantes trabalhos associados às descargas atmosféricas. As primeiras estatísticas referentes à primeira fase

de operação de MCS foram apresentadas por *Visacro et al.* [2004]. A consolidação de resultados obtidos em MCS foi reportada por *Visacro et al.*, [2010; 2012], em que são analisados registros de corrente de descargas negativas nuvem-solo.

A instalação de um sistema de medição de campo elétrico em MCS trouxe progressos no estudo do fenômeno, possibilitando, pela primeira vez, a detecção de componentes M em primeiras correntes de retorno [*Visacro et al.*, 2013a]. As primeiras observações de descargas ascendentes em regiões tropicais foram reportadas em [*Guimarães et al.*, 2014], reunindo registros sincronizados de campo elétrico, corrente elétrica e vídeo gravado por câmera ultrarrápida.

Nos últimos anos, a Estação Morro do Cachimbo passou por melhorias que levaram à ampliação do sistema de campo elétrico e ao aumento da taxa de gravação de vídeos de incidências na torre instrumentada. Os trabalhos de *Guimarães et al.* [2017] e *Visacro et al.* [2017a; 2017b] proporcionaram contribuições significativas na interpretação física de processos associados ao desenvolvimento do canal de descarga. Recentemente, *Guimarães et al.* [2018] apresentou, pela primeira vez, resultados relativos ao valor do campo elétrico no solo próximo a estrutura aterrada, no instante de início da propagação do canal ascendente, para descargas negativas nuvem-solo. Especificamente no tema desta dissertação, foi desenvolvida uma ferramenta computacional para representação da evolução do canal precursor de descarga [*Louro et al.*, 2017].

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a avaliação das grandezas elétricas associadas ao processo de formação do canal da descarga atmosférica negativa nuvem-solo. Em particular, esta ferramenta constitui meios para avaliar o campo elétrico obtido ao nível do solo nas proximidades do ponto de incidência da descarga e no topo de estruturas aterradas, além da corrente elétrica média que flui por essas estruturas.

Os casos avaliados nas simulações, juntamente com a análise de registros simultâneos de vídeos, corrente e campo elétrico de eventos medidos em MCS, podem

prover subsídios para interpretação e modelagem dos processos físicos envolvidos no fenômeno. Tal análise pode contribuir para o melhor entendimento do processo de formação do canal de descarga e das condições determinantes da incidência de descarga em estruturas aterradas.

1.3 Metodologia

A primeira etapa deste trabalho consistiu numa análise detalhada da literatura no tema específico, destacando-se a referência básica [*Mazur e Ruhnke*, 1998], e num redimensionamento e aprofundamento das realizações desenvolvidas em [*Louro*, 2017]. Adicionalmente, desenvolveu-se um estudo sobre os aspectos físicos envolvidos na formação do canal de descarga atmosférica, para propiciar uma melhor representação dos componentes envolvidos na modelagem do processo de formação do canal, que lhe conferisse consistência física.

Após a revisão bibliográfica, foi elaborada uma nova ferramenta computacional capaz de realizar as simulações desejadas. Tal ferramenta foi aplicada em sistemáticas análises de sensibilidade e em algumas situações práticas para possibilitar o desenvolvimento de interpretação da evolução das grandezas elétricas envolvidas na formação do canal de descarga atmosférica e na transferência de carga da nuvem para o solo. Foram obtidos resultados que descrevem de forma qualitativa os principais aspectos envolvidos nesse processo e, também, resultados quantitativos, que contribuem para a discussão de relevantes questões científicas no tema.

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 dos modelos de formação da descarga atmosférica e das contribuições relevantes mais recentes apresentadas na literatura, em se tratando dos processos físicos associados especificamente à descarga

negativa nuvem-solo. É apresentada uma descrição sucinta desses processos e dos parâmetros detectáveis, notadamente do campo elétrico observado na fase de formação do fenômeno, que possibilitam avaliação destes.

No **Capítulo 3**, são apresentados os componentes do ambiente de formação da descarga atmosférica que são modelados na rotina computacional implementada. Tais componentes correspondem à nuvem de tempestade, os canais ascendentes e descendentes, à estruturas aterradas e ao solo. São apresentadas as formulações utilizadas para a obtenção do valor das grandezas elétricas envolvidas, bem como o Método da Simulação de Cargas, empregado para os cálculos da rotina computacional.

No **Capítulo 4**, é discutida a dinâmica implementada na simulação para possibilitar a aplicação consecutiva do modelo eletrostático em curtos intervalos de tempo. Através dos cálculos propostos, avalia-se a evolução das grandezas elétricas no aspecto temporal. Estabelece-se uma metodologia para a diminuição de memória computacional utilizada nas simulações pelo Método de Simulação de Cargas tradicional sem a perda da consistência física do problema.

No **Capítulo 5**, são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas. Primeiramente, realiza-se uma análise de sensibilidade das grandezas elétricas associadas à descarga nuvem-solo ao se variarem os parâmetros geométricos constantes do sistema. São realizadas comparações com diferentes modelos de estruturas aterradas e com os dois modelos de solo implementados (solo plano e o solo real). Ao final, apresentam-se os resultados relativos à simulação de uma incidência real registrada em MCS, que são comparados com resultados de medição.

As conclusões do trabalho são apresentadas no **Capítulo 6**, tendo em vista uma avaliação geral do trabalho desenvolvido, suas contribuições e as perspectivas de continuidade. As referências bibliográficas de leitura no escopo dessa dissertação estão citadas ao longo do texto e se encontram listadas ao final.

2 Descrição do processo de formação da descarga negativa nuvem-solo

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica dos principais modelos de formação da descarga atmosférica, bem como das contribuições atuais mais relevantes para o tema, no aspecto da física do desenvolvimento dos canais de descarga. Discute-se a importância das medições de campo elétrico para obtenção de informações referentes a processos atmosféricos. O capítulo fornece a base de conceitos e definições utilizadas no decorrer do trabalho, além das considerações e suposições adotadas nas simulações computacionais.

2.2 Modelos de formação do canal de descarga

Nesta seção, são apresentados e discutidos os dois modelos de formação do canal de descarga mais difundidos na literatura, o modelo clássico, ou modelo de Schonland, e o modelo do *leader* bidirecional, ou modelo de Kasemir. Tais modelos contemplam a evolução do canal de descarga segundo diferentes abordagens.

O canal precursor da descarga, ou *leader*, forja um caminho condutor que se propaga da nuvem para o solo e efetivamente distribui a carga acumulada em seu corpo

ao longo desse caminho. A corrente de retorno é a onda de corrente elétrica que percorre o caminho estabelecido pelo *leader* após o *attachment*, neutralizando as cargas do *leader* e levando o potencial nulo do solo para o interior da nuvem [Rakov e Uman, 2003; Visacro, 2005].

2.2.1 Modelo clássico

O modelo introduzido por *Schonland* [1938] assume que as cargas para a formação da descarga atmosférica são providas por um centro de cargas na nuvem de tempestade. Supõe-se que a descarga se configura a partir da evolução de um canal unipolar da nuvem para o solo e que, a partir do centro de cargas da nuvem, a carga transferida é distribuída ao longo da extensão do canal.

Após uma série de artigos de *Schonland et al.* [1934], *Schonland et al.* [1935] e *Malan e Collens* [1937], em que os autores analisaram registros visuais de descargas atmosféricas, *Schonland* [1938] supôs que o *leader* da descarga nuvem-solo se propagava de maneira unidirecional. Além disso, foi admitido que o fenômeno se desenvolve de forma similar a descargas geradas por eletrodos, em que é possível explicar a formação do processo a partir de um cátodo (polo negativo) ou ânodo (polo positivo) pela teoria de ionização em gases.

Através de medições de campo elétrico ao nível do solo, interpretou-se que as mudanças de sinal observadas na incidência de descargas atmosféricas poderiam ser atribuídas a transferência de cargas negativas da nuvem para o solo. *Schonland* [1938] estabeleceu duas fases para o processo completo da descarga atmosférica, a primeira, chamada fase do *leader*, contempla a evolução das descargas sucessivas parciais que formam o canal precursor descendente, e a segunda, fase da descarga de retorno solo-nuvem, acontece após a conexão do canal de descarga com o solo, em que se concretiza a transferência de cargas nuvem-solo.

A Figura 2.1 ilustra tal processo de formação da descarga negativa nuvem-solo. No passo 1, a formação do *leader* de carga negativa é apresentada, com a carga se estendendo desde o centro de carga até as extremidades inferiores do canal. Ocorre a indução de cargas positivas na superfície do solo, devido à aproximação do canal negativo. No passo 2, as cargas positivas se concentram mais densamente, devido à

presença de um campo elétrico intenso, e são formados canais ascendentes (solo-nuvem), que partem do solo de encontro ao canal descendente. O passo 3 mostra a condição posterior à conexão dos canais ascendente e descendente (*attachment*), incluindo a transferência de cargas negativas para o **solo**, no processo denominado descarga de retorno.

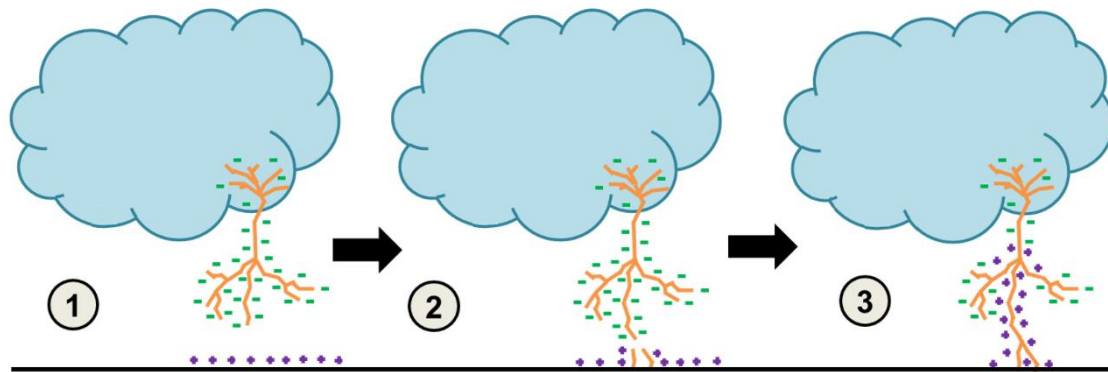


Figura 2.1 - Evolução do canal de descarga segundo o modelo clássico. Adaptado de [Louro, 2017].

2.2.2 Modelo do *leader* bidirecional

O presente trabalho se fundamenta em aplicações diretas do modelo do *leader* bidirecional, inicialmente proposto por *Kasemir* [1950], e consolidado em seu trabalho posterior [Kasemir, 1960]. Nesses trabalhos, é introduzido um modelo qualitativo que estabelece a formação de uma descarga negativa nuvem-solo a partir de uma ruptura inicial em uma região de elevado campo elétrico no interior da nuvem de tempestade. Essa descarga inicial configura um *leader* bipolar com carga líquida total nula.

A distribuição de cargas no canal bipolar é governada pelo potencial elétrico do ambiente ao seu redor. Sob o efeito de campos elétricos muito intensos na região à frente das duas extremidades do *leader* bipolar, processos disruptivos nas extremidades estendem-no em ambas as direções. As cargas positivas e negativas liberadas por esses processos tendem a ser depositadas nas extremidades superior e inferior, respectivamente. A intensificação de campo elétrico produzida por essas novas cargas nas extremidades do canal, sobrepostas ao campo elétrico de fundo, determina ou não a extensão do *leader* em ambas as direções. Segundo o modo de propagação a ser discutido na próxima seção, a ponta superior (positiva) move-se continuamente para cima, enquanto a ponta inferior (negativa) move-se para baixo por passos.

A Figura 2.2a mostra a distribuição de carga de um *leader* em seu estágio inicial segundo o modelo de Kasemir. Essa representação utiliza um volume condutor sob a influência de um campo elétrico constante, apresentando densidade de carga nula em seu ponto médio (do qual se origina) que aumenta na direção das extremidades do volume. Macroscopicamente, o canal é eletricamente neutro. A Figura 2.2b, por sua vez, mostra a distribuição unipolar de carga líquida, do modelo clássico.

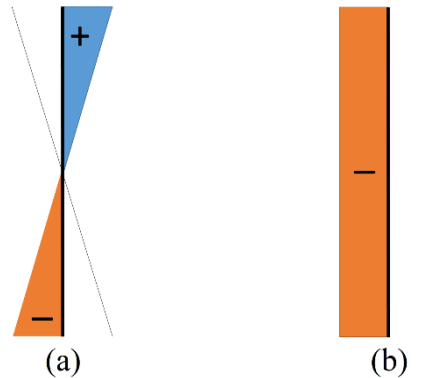


Figura 2.2 - Distribuições de cargas assumidas no modelo bidirecional (a) e no modelo clássico, unidirecional (b).

Em um terceiro trabalho, *Kasemir* [2012] calculou a energia necessária para o desenvolvimento do *leader* flutuante e comparou com a mesma estimativa em relação ao modelo clássico, introduzido por *Schonland* [1938]. Para o modelo clássico, ele mostrou que a nuvem de tempestade seria descarregada durante o desenvolvimento do canal descendente, ao transferir cargas concentradas de mesmo sinal ao longo do canal. Tal processo exigiria uma quantidade de energia que não seria possível obter de uma nuvem de tempestade, já que o fluxo de cargas elétricas não seguiria as linhas de campo elétrico produzidas pela distribuição de carga de nuvem conhecida. *Kasemir* [2012] concluiu que o modelo clássico não exibe um conceito físico consistente.

Como discutido em *Mazur e Ruhnke* [1998], no modelo bidirecional consolidado, o *leader* não coleta cargas da nuvem. As cargas positivas (íons positivos) e negativas (elétrons) são produzidas pelos processos disruptivos nas extremidades do canal bipolar por ionização. A separação de cargas seria causada pelo campo elétrico externo ao canal, produzido pela distribuição de carga da nuvem. Uma representação gráfica das condições assumidas nas demonstrações de *Kasemir* [2012] é mostrada na Figura 2.3. As partes (a) e (b) correspondem a uma descarga negativa nuvem-solo, durante o desenvolvimento do canal bidirecional e no instante antecessor ao *attachment*, respectivamente. As partes (c)

e (d) correspondem a uma descarga intranuvem no início e no final de sua propagação, respectivamente, seguindo o mesmo princípio descrito anteriormente.

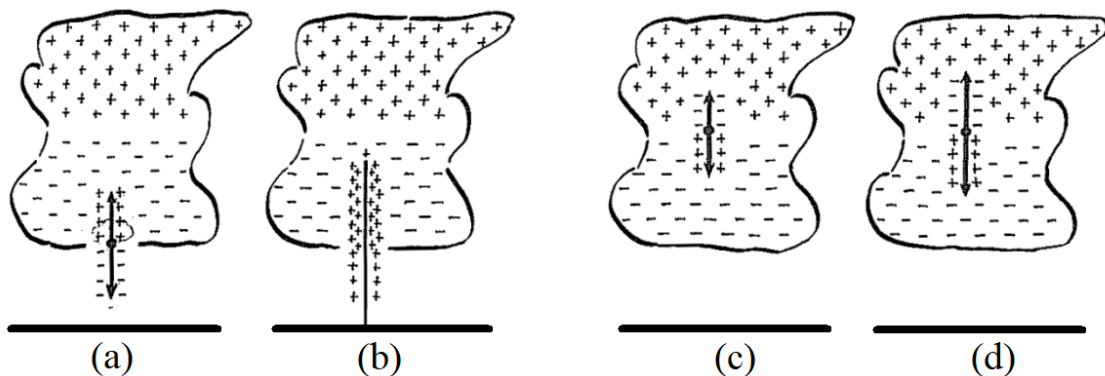


Figura 2.3 - Distribuição de cargas em uma descarga negativa nuvem-solo (a) e (b) e intranuvem (c) e (d). Adaptado de [Kasemir, 2012].

Baseados em análises de câmera de vídeo de alta velocidade, Warner *et al.* [2016] observaram casos do desenvolvimento ao ar livre de canais bidirecionais, próximos a um canal previamente estabelecido. Nessas situações, identificaram-se claramente as diferenças de propagação das extremidades positiva e negativa, que são discutidas em detalhe na seção 2.3 a seguir. Trabalhos recentes trazem observações que mostram a evolução bidirecional do *leader* [Van der Velde e Montanya, 2013; Tran e Rakov, 2016].

2.3 Aspectos físicos da descarga negativa nuvem-solo

Nesta seção, realiza-se uma revisão teórica em trabalhos recentes para discussão de aspectos físicos envolvidos na propagação de canais positivos e negativos da descarga negativa descendente nuvem-solo, objeto de estudo desta dissertação. São definidos diversos nomes e siglas utilizados ao longo dessa dissertação.

2.3.1 O canal negativo descendente precursor da descarga atmosférica

A porção inferior do *leader* bipolar flutuante corresponde ao *Downward Negative Leader* (DNL). O DNL, carregado negativamente, determina a macrorregião de incidência da descarga e é o responsável pela intensificação de campo elétrico ao nível do solo e em estruturas aterradas [Visacro, 2005]. Essa elevação de campo elétrico pode dar origem a um canal ascendente positivo, ou *Upward Connecting Leader* (UCL), que

evolui e, eventualmente, se conecta ao canal descendente. O UCL define o ponto exato de incidência da descarga atmosférica [Visacro, 2005].

Biagi *et al.* [2009] e Hill *et al.* [2011] verificaram elementos que precedem o desenvolvimento do DNL em descargas negativas. Foram detectadas a formação de corpos de plasma flutuantes (*stems*) à frente da região de corona do canal negativo. Tais observações coincidem com resultados obtidos através de experimentos laboratoriais para a extensão de canais negativos [Bazelyan e Raizer, 2000]. Baseados nessas observações, Hill *et al.* [2011] apresentaram um modelo esquemático que representa as etapas de propagação do *leader* negativo nas descargas atmosféricas, conforme visto na Figura 2.4.

Segundo esse esquema, é possível observar a formação de segmentos luminosos flutuantes com comprimentos estimados entre 1 e 4 m, já reportados por Biagi *et al.* [2010] à frente da região de corona do canal negativo (de 1 a 10 m de distância). No primeiro instante (1), o canal negativo está em desenvolvimento. Em seguida (2), é detectado um canal flutuante, que é precedido por *stems* à frente do DNL. Começa a se estabelecer uma região de corona (3) que antecede a conexão efetiva entre o canal descendente e o canal flutuante (4). Após a conexão, consolida-se o passo do canal, com a conseqüente propagação de uma onda luminosa a partir da extremidade inferior do canal descendente, ilustrado no instante (5).

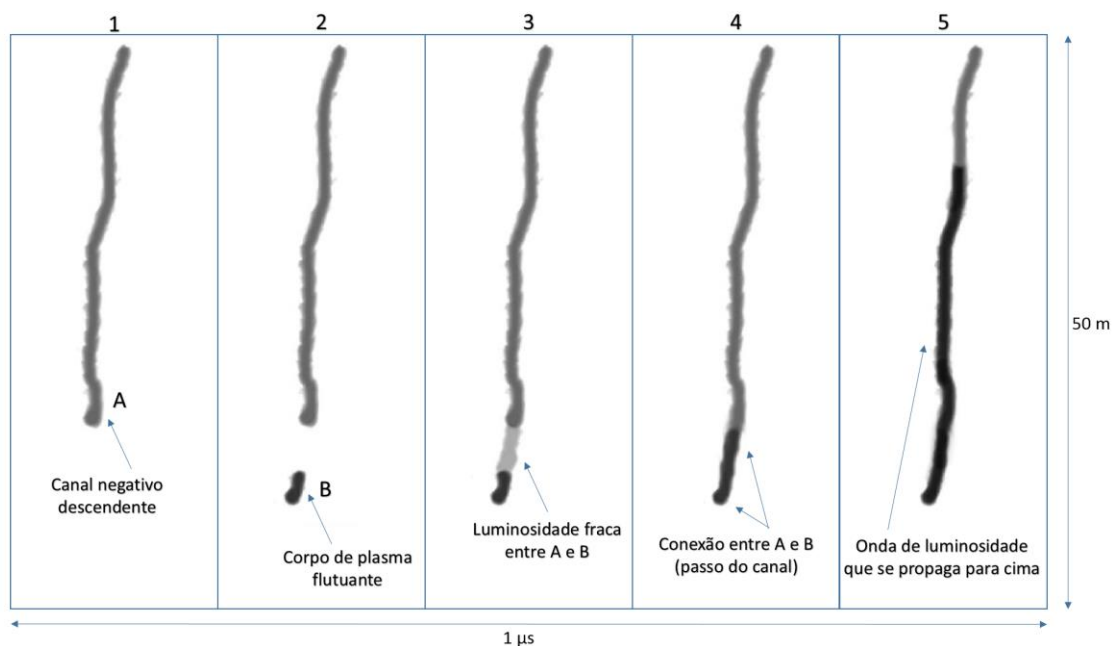


Figura 2.4 - Modelo de propagação por passos do canal negativo. Adaptado de [Hill *et al.*, 2011]

2.3.2 *Intervalo entre passos do canal descendente*

O intervalo entre passos do canal descendente pode ser entendido como o tempo médio transcorrido para cada extensão abrupta deste canal. Nos últimos anos, a melhoria crescente da resolução e da taxa de aquisição de câmeras ultrarrápidas possibilitou ampla difusão do registro visual em alta qualidade e em intervalos da ordem de unidades de microssegundos do processo de evolução de descargas atmosféricas.

Notadamente, os trabalhos de *Hill et al.* [2011], *Biagi et al.* [2014] e *Qi et al.* [2016] trouxeram contribuições, reportando o mecanismo de propagação do canal negativo descendente. Nesses trabalhos, em que se utilizou registros de vídeo para avaliar a evolução do canal negativo, foi encontrado um intervalo médio variando entre 13 e 18 μs . *Visacro et al.* [2010] utilizaram registros da fase inicial de correntes de descargas negativas que incidiram na torre da Estação Morro do Cachimbo (MCS), associando os pulsos de corrente induzidos na torre à evolução por passos do canal descendente. Foi observada uma consistente regularidade para o intervalo entre passos, variando entre 40 e 50 μs . *Arcanjo et al.* [2017] ampliaram a análise na base de dados de MCS, promovendo uma descontaminação dos dados de corrente, cujos pulsos induzidos poderiam ser atribuídos a diferentes ramificações do canal negativo descendente. Nessa análise, obteve-se um intervalo médio entre passos igual a 39 μs .

Ao se considerar somente o desenvolvimento do canal descendente, este intervalo pode ser utilizado como o tempo transcorrido entre cada passo da simulação implementada neste trabalho, que considera diferentes comprimentos do *leader*, como será discutido em detalhe no capítulo 4.

2.3.3 *O canal positivo ascendente*

Ensaio laboratoriais indicam que o típico modo de propagação observado para canais positivos é bem definido: o desenvolvimento do canal se dá a partir do aumento progressivo da temperatura a sua ponta, resultante do confinamento das bases de vários *streamers* nesta região, o que resulta em processos de extensão contínuos, sem variações abruptas na sua geometria [*Bazelyan e Raizer, 2000; Rakov e Uman, 2003; Mazur, 2016*]. A propagação de canais positivos na natureza é pauta de diversas publicações recentes, e tema de divergência entre pesquisadores. Enquanto alguns apresentam evidências e

modelos de propagação de canais positivos de maneira contínua, outros ainda sugerem que essa propagação acontece de maneira semelhante aos canais negativos descendentes (por passos).

O aumento de campo elétrico nas extremidades de estruturas aterradas propicia o início do efeito Corona, que consiste na liberação de íons positivos nessas extremidades. Essa camada de cargas positivas reduz localmente a intensidade de campo elétrico, tendendo a inibir a evolução dos processos disruptivos iniciados. Entretanto, se o canal descendente continua a se aproximar da estrutura, a variação de campo elétrico devido a essa aproximação fornece energia adicional para superar esse efeito e consolidar a iniciação do canal ascendente positivo [Guimarães, 2017].

A observação de perfis de corrente na fase inicial de descargas ascendentes constitui evidência sólida da propagação contínua de canais positivos. Nos instantes iniciais da forma de onda de corrente de descargas ascendentes induzidas por descargas negativas próximas, é possível detectar a presença de pulsos unipolares de corrente, superpostos a uma corrente contínua medida. Esses pulsos são atribuídos por alguns autores à propagação por passos do canal positivo. Entretanto, em descargas ascendentes não-induzidas por eventos próximos, não se detecta a presença desses pulsos. De tal maneira, os pulsos de corrente detectados não podem ser atribuídos ao desenvolvimento de canais positivos, eles devem ser atribuídos ao efeito induzido que canais negativos causam em estruturas aterradas.

Visacro *et al.* [2017a] ponderam que, se fosse assumida a existência de pulsos induzidos de corrente em canais ascendentes positivos que se propagam de forma contínua, as mesmas características atribuídas a uma propagação por passos seriam observadas. É possível identificar intensificações de luminosidade devido ao surto de corrente induzido ao longo do canal, o que não evidencia o desenvolvimento por passos do canal positivo. A detecção de pulsos magnéticos e os pulsos irradiados de campo elétrico podem ter como origem tanto a corrente induzida no canal ascendente, quanto a corrente que flui no canal descendente quando novos passos são formados.

Da mesma forma, Saba *et al.* [2015] observaram pulsos em registros de campo elétrico correspondentes a incidência de descargas positivas, na fase final que precede o *attachment*. Através dos registros sincronizados de vídeo, foi possível perceber que tais

pulsos aparecem a partir da detecção de um canal ascendente negativo partindo da estrutura aterrada, portanto, estão associados unicamente à evolução do canal negativo e não podem ser atribuídos à aproximação do canal positivo descendente.

2.3.4 Evolução dos canais negativo e positivo precedente ao attachment

Baseados nos registros de MCS e nas análises previamente reportadas na literatura, *Visacro et al.* [2017a] estabeleceram um modelo esquemático para a evolução do canal negativo descendente e do surgimento do canal positivo ascendente, destacando o comportamento da corrente elétrica e do campo elétrico nessa fase, conforme ilustrado pela Figura 2.5.

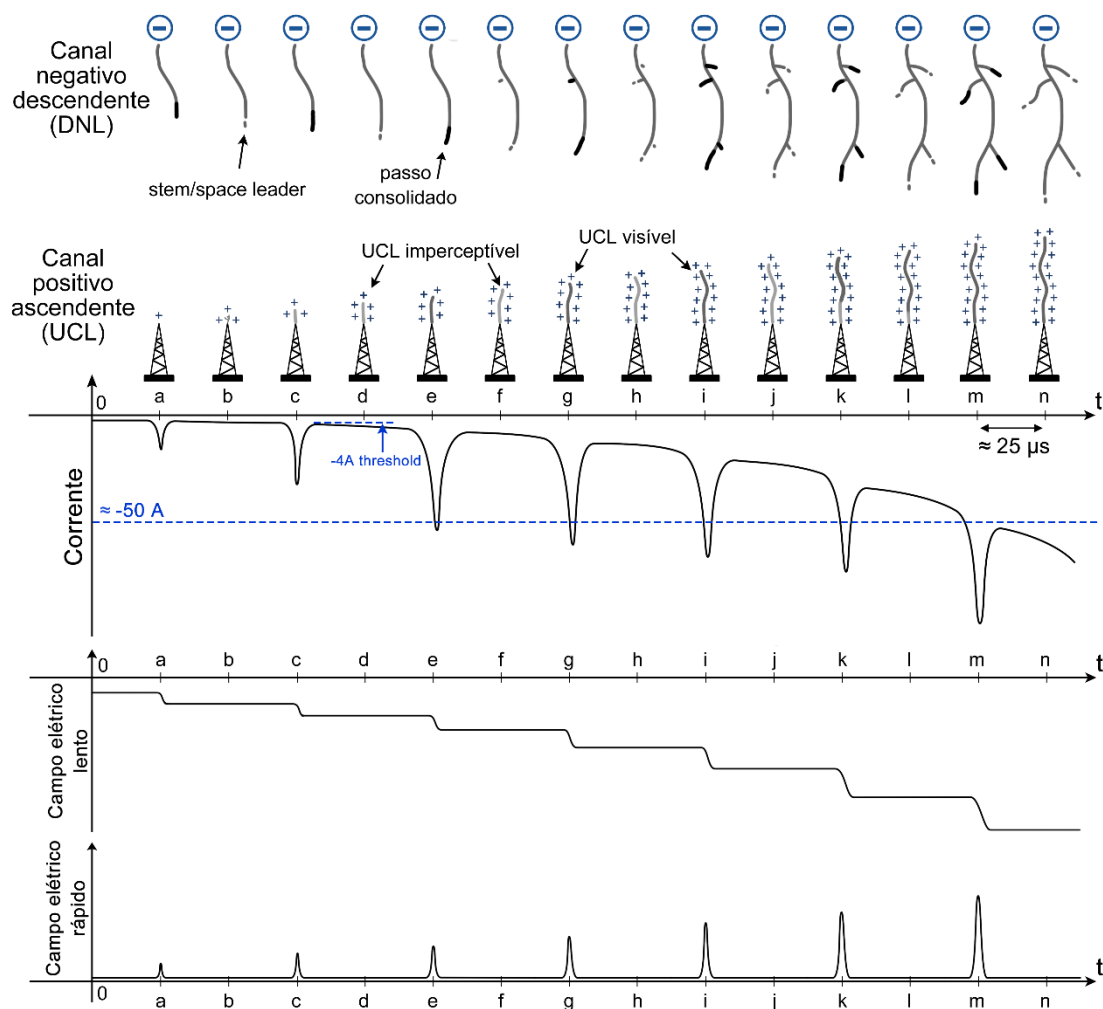


Figura 2.5 - Representação esquemática da propagação dos canais negativo e positivo.
Adaptado de *Visacro et al.* [2017a]

No estágio inicial do desenvolvimento do canal descendente, apenas pulsos de corrente são induzidos ao longo da estrutura aterrada, aumentando a carga depositada na

extremidade superior dessa estrutura (a). Após essa extremidade atingir um valor de campo elétrico crítico, existe um fluxo de corrente elétrica de baixa intensidade correspondente ao desenvolvimento de filamentos de corona na estrutura (b). Pulsos de corrente induzidos quando a componente contínua da corrente elétrica excede o limiar de $-4 A$ são capazes de induzir a formação sustentada do canal ascendente (c). Entretanto, tal canal ainda é imperceptível (d), e só se torna visível quando pulsos de corrente induzidos que excedam $-50 A$ são registrados (e). O canal positivo continua a se desenvolver de forma contínua (f-j), até que a intensidade da componente contínua de corrente elétrica atinja valores suficientemente altos tal que o canal se torne visível, independentemente dos pulsos induzidos pelo canal descendente.

O comportamento do campo elétrico lento, mostrado na Figura 2.5, mostra degraus na variação do campo elétrico detectáveis à medida em que o canal descendente se propaga. O campo elétrico rápido, por sua vez, apresenta apenas pulsos unipolares a cada variação de comprimento do DNL.

2.3.5 Velocidade média de canais ascendente e descendente

Para a dinâmica do modelo implementado neste trabalho, além do modo de propagação dos canais de descarga, é importante uma avaliação da velocidade média dos canais ascendente e descendente, a ser detalhada no capítulo 4. As observações realizadas na Estação Morro do Cachimbo possibilitaram que *Guimarães* [2017] fizesse uma análise da velocidade bidimensional de canais descendentes e canais ascendentes de três registros de descarga negativa nuvem-solo. Além disso, um quarto evento reportado por *Visacro et al.* [2018] contribuiu para a ampliação da base de dados de MCS.

A Tabela 2.1 apresenta os resultados obtidos em MCS, que são descritos nas referências mencionadas. A velocidade média do canal descendente é calculada nos instantes em que o canal está relativamente próximo à torre instrumentada (aproximadamente nos $500 \mu s$ que antecedem o *attachment*), já a velocidade média do canal ascendente é determinada com base em todos os instantes em que este canal é observável nos registros de vídeo. Os quatro eventos apresentaram uma média de velocidade de $0,24 m/\mu s$ para o canal descendente e de $0,12 m/\mu s$ para o canal ascendente. Tais resultados são compatíveis com resultados presentes na literatura, em destaque para os resultados obtidos por *Campos et al.* [2014] e *Saba et al.*, [2017], que

reportam velocidades médias de $0,22 \text{ m}/\mu\text{s}$ para o canal descendente e velocidades variando entre $0,05 \text{ m}/\mu\text{s}$ a $0,07 \text{ m}/\mu\text{s}$ para o canal ascendente.

Tabela 2.1 – Velocidades bidimensionais médias obtidas através de observações de vídeo em MCS

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

¹O *Flash 19* não apresenta registro de vídeo

2.4 Grandezas elétricas envolvidas no estudo das descargas atmosféricas

Tendo em vista a dificuldade da medição direta e indireta de correntes de descargas atmosféricas naturais, o campo elétrico ao nível do solo é o principal parâmetro utilizado na detecção de atividade atmosférica, por conter assinaturas dos processos de formação e evolução da descarga.

O campo elétrico apresenta uma relação direta com as cargas elétricas da nuvem de tempestade, e sua medição pode ser facilmente implementada ao nível do solo, através de equipamentos específicos como o *field mill*, utilizado para monitorar os valores absolutos de campo elétrico ambiente, antes e depois das rápidas variações associadas ao início da descarga de retorno, e as antenas do tipo *whip* ou *plate*, capazes de medir as variações rápidas de campo elétrico, observadas principalmente durante a ocorrência de descargas atmosféricas [Guimarães, 2017]. Balões instrumentados e aviões também realizam medições de campo elétrico no interior das nuvens de tempestade, entretanto, trata-se de uma tarefa mais complexa devido à dificuldade de se realizarem tais medições [Rakov e Uman, 2003].

Baseado em diversos resultados de medições, Uman [1969] desenvolveu um perfil característico para o campo elétrico de descargas descendentes negativas. De acordo com este perfil, existem três fases de campo elétrico identificáveis nos instantes antecedentes

à descarga atmosférica. Cada um desses períodos é associado a uma etapa do processo de formação do *leader*.

A Figura 2.6 mostra o perfil típico (designado BIL) em diferentes distâncias de observação ao nível do solo. Nessa representação, **B** (disrupção / *breakdown*) corresponde à disrupção inicial que ocorre no interior da nuvem e dá início à propagação do canal descendente, **I** (intermediário / *intermediate*) diz respeito à lenta variação de campo elétrico representando a propagação do canal ainda na nuvem e **L** (canal / *leader*) se refere à propagação do canal para fora da nuvem, em que ocorre uma alteração mais perceptível na forma de onda de campo elétrico próximo.

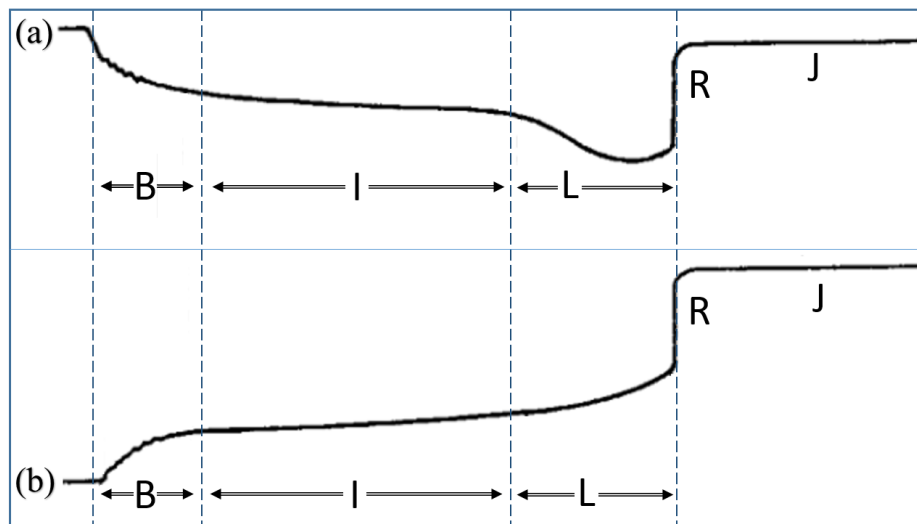


Figura 2.6 - Perfil de campo elétrico ilustrando as fases típicas BIL de uma descarga negativa descendente a uma distância representativa de (a) 2 km e (b) 5 km, segundo a convenção atmosférica¹. Adaptado de [Uman, 1969].

Há ainda duas outras fases consideradas na Figura 2.6: a fase **R** ocorre no intervalo da corrente de retorno (*return stroke*) e a fase **J** representa um intervalo de variação lenta do valor de campo elétrico após o fluxo da primeira (ou única) corrente de retorno. É possível notar que, a partir de uma certa distância do ponto de incidência, ocorre uma inversão do comportamento do campo elétrico.

¹ Segundo a *convenção atmosférica* de sinal, um campo elétrico cujo sentido aponta para cima do solo é considerado negativo.

2.5 Considerações finais

O presente capítulo contemplou a apresentação e comparação das ideias referentes aos dois principais modelos da literatura que explicam a formação da descarga atmosférica. Em particular, destacou-se o modelo do *leader* bidirecional, adotado como referência neste trabalho para o desenvolvimento da ferramenta computacional de simulação do processo de evolução do canal da descarga negativa nuvem-solo.

Além disso, foram abordadas as contribuições mais recentes no que diz respeito ao processo físico da formação de canais positivos e negativos da descarga nuvem-solo, de modo a dar suporte à dinâmica adotada no modelo computacional implementado. Mostrou-se a importância da variável campo elétrico no entendimento desses processos, tendo em vista a dificuldade de medição direta de outras grandezas relacionadas à descarga atmosférica.

3 Modelagem do sistema físico envolvido na formação da descarga atmosférica

3.1 Introdução

Neste capítulo, discute-se a representação dos elementos considerados na formação da descarga atmosférica nuvem-solo no modelo implementado. Consideram-se o desenvolvimento dos cálculos e a formulação utilizada para a determinação numérica das grandezas elétricas envolvidas. Este capítulo se restringe de maneira qualitativa a esses aspectos, uma vez que a análise de sensibilidade dos parâmetros numéricos do sistema é realizada no capítulo 5.

Seguindo a metodologia introduzida por *Mazur e Ruhnke* [1998], o modelo incorpora as representações da nuvem de tempestade, do canal de descarga, de estruturas aterradas e do relevo do solo através de cargas pontuais distribuídas nos volumes correspondentes a cada um desses componentes.

3.2 Representação da nuvem de tempestade

3.2.1 Considerações iniciais

As distribuições de potencial e de campo elétrico na atmosfera são fatores determinantes na iniciação e desenvolvimento do canal de descarga e dependem da posição e da intensidade das cargas da nuvem.

Os modelos de nuvem de tempestade propõem uma distribuição de cargas obtida a partir de medições de campo elétrico realizadas ao nível do solo e dentro das nuvens (utilizando sondagens de balão). A variabilidade significativa dos resultados das medições dentro das tempestades se resulta das diferenças entre tempestades individuais, tipos de tempestades, as várias fases dentro da mesma tempestade e as posições do balão de medição em relação à tempestade [Stolzenburg *et al.*, 2009; Karunarathna *et al.*, 2017]. Tais modelos concordam com a representação simplificada de estrutura tripolar de cargas, que consiste de uma carga negativa na massa principal da nuvem, uma carga positiva acima dela e uma porção menor de carga positiva abaixo.

A expressão básica do campo elétrico produzido a uma distância r da carga elementar Q é apresentada na Equação 3.1, onde a constante ε é a permissividade do meio, que é igual a $8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ no caso do ar.

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

Um modelo tripolar elementar, desenvolvido por Rakov e Uman [2003], utiliza três cargas pontuais para a representação dos centros de cargas Q_P , Q_N e Q_{LP} , em diferentes alturas H_P , H_N e H_{LP} , correspondentes ao centro de cargas positivo, negativo e inferior positivo, respectivamente. A Figura 3.1 mostra a estrutura básica colocada sobre um solo plano e os resultados de campo elétrico ao nível do solo calculados para cada um dos centros de carga (E_P , E_N , E_{LP} e E_{TOTAL}) segundo a convenção física, em que um campo elétrico de sentido ascendente no solo é considerado positivo.

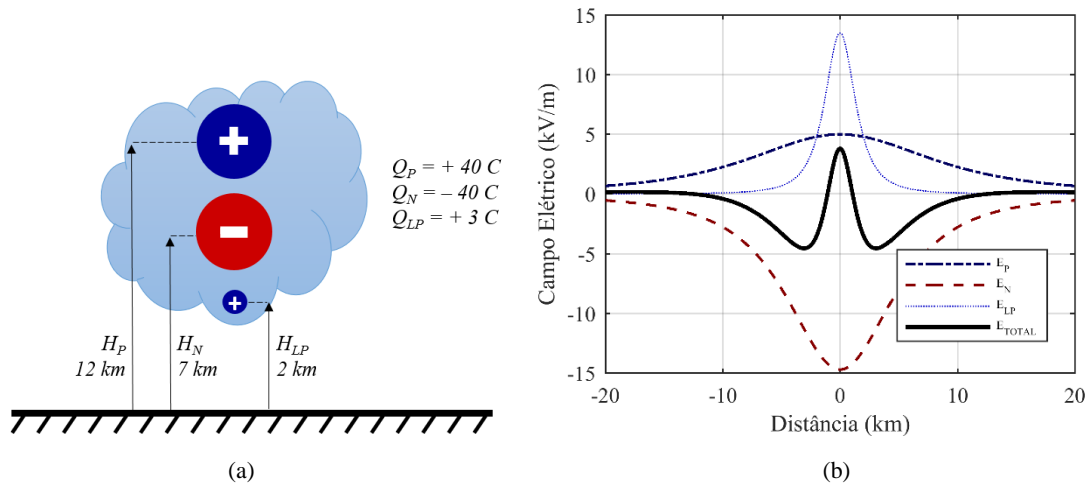


Figura 3.1 - Representação do modelo tripolar de cargas pontuais (a). Campo Elétrico ao nível do solo para estrutura tripolar (b). Adaptado de [Araújo, 2013].

O arranjo tripolar produz um campo elétrico constante de $3,8\text{ kV/m}$ ao nível do solo, no eixo dos centros de carga. Esse valor é positivo devido à contribuição majoritária do centro de cargas positivo inferior. Ao se afastar do eixo, é possível notar que o módulo do campo elétrico diminui, até que uma inversão de sinal é observada a 1 km . A partir de então, a contribuição do centro de cargas negativo torna-se dominante, até a distância de $12,5\text{ km}$, em que o campo elétrico novamente fica positivo, indicando predominância do centro de cargas positivo superior.

3.2.2 Modelo da nuvem de tempestade

A estrutura de nuvem de tempestade apresentada por Mazur e Ruhnke [1998] é constituída por distribuições cilíndricas uniformes de cargas. Escolheu-se utilizar a mesma estrutura proposta, ilustrada na Figura 3.2, que possui simetria axial, diâmetro e extensão vertical iguais a 10 km .

A nuvem cilíndrica compreende duas regiões principais carregadas com 50 C (região A) e -80 C (região B), que possuem, respectivamente, densidade de carga de $0,212\text{ nC/m}^3$ e $-0,147\text{ nC/m}^3$. Duas regiões secundárias foram utilizadas para representar a célula de tempestade. Estas possuem 1 km de diâmetro e estão carregadas com -10 C (região C) e 3 C (região D), com respectivas densidades de carga de $-3,18\text{ nC/m}^3$ e $1,27\text{ nC/m}^3$.

A configuração apresentada é modelada através de cargas pontuais igualmente espaçadas, equivalentes à distribuição cilíndrica. A Tabela 3.1 sumariza as características de cada uma das regiões cilíndricas que compõem a nuvem de tempestade:

Tabela 3.1 – Regiões cilíndricas que compõem o modelo de nuvem

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

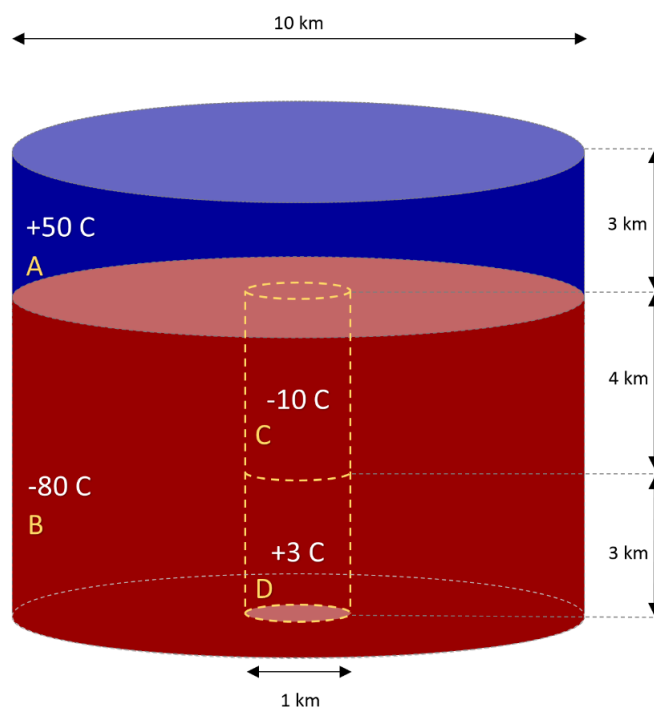


Figura 3.2 - Estrutura cilíndrica que representa a nuvem de tempestade. (Desenho fora de escala)
Adaptado de [Louro, 2017]

Essa distribuição específica de cargas é capaz de reproduzir o perfil típico das distribuições de potencial elétrico e campo elétrico na atmosfera ao longo do eixo do cilindro. Além disso, é capaz de produzir perfis de campo elétrico no solo a diferentes distâncias do eixo, consistentes com suas assinaturas medidas durante a formação de descargas atmosféricas nuvem-solo, conforme se discute na seção a seguir.

3.3 Resultados preliminares

Mazur e Ruhnke [1998] utilizaram a mesma abordagem descrita por este trabalho para obter o perfil de potencial elétrico e campo elétrico vertical, no eixo da nuvem de tempestade. Realizou-se, de maneira preliminar, a reprodução desses resultados.

3.3.1 Posicionamento vertical da nuvem de tempestade

A Figura 3.3 mostra o posicionamento da base da nuvem de tempestade a 2 km de altitude. É considerado um solo plano para a determinação das grandezas elétricas associadas.

Ao se considerar o modelo da nuvem de tempestade, existem duas regiões preferenciais para o início de descargas nuvem-solo e descargas intranuvem. Essas regiões foram identificadas a partir de medições de campo elétrico por radiação VHF, realizadas por *Proctor* [1991]. Os valores máximos de campo elétrico acontecem nas fronteiras das regiões positivas e negativas da estrutura cilíndrica da nuvem de tempestade, que correspondem a altitudes médias de 5 e 9 km. A primeira região é atribuída às rupturas da descarga nuvem-solo e a segunda, às rupturas de descargas intranuvem.

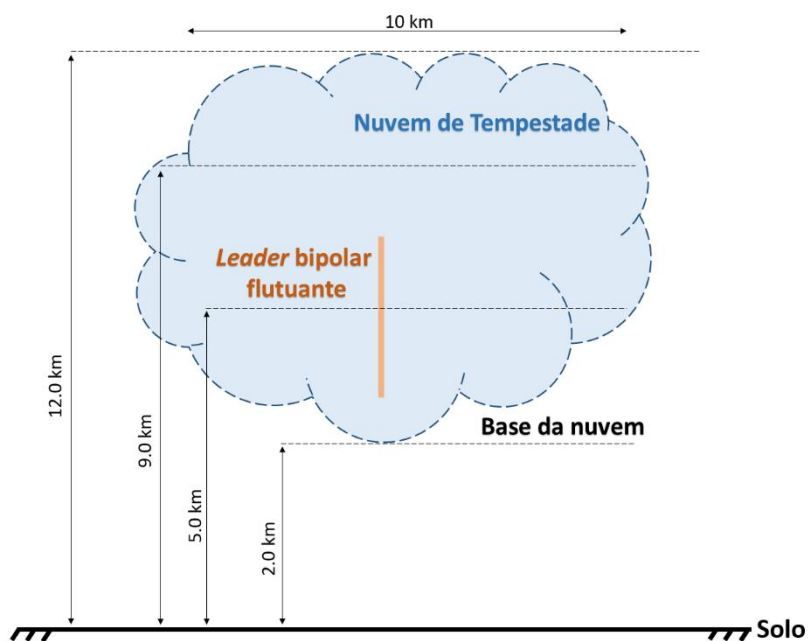


Figura 3.3 - Esquema de posicionamento da nuvem de tempestade na simulação realizada por [Mazur e Ruhnke,1998].

A Figura 3.4 mostra o perfil de campo e potencial elétrico vertical obtido no eixo da nuvem de tempestade, sem a presença do *leader* bipolar. Como esperado, os valores máximos de campo, $105,4 \text{ kV/m}$ e $-121,5 \text{ kV/m}$, acontecem, respectivamente, a 5 km e 9 km de altitude. O potencial atinge valores da ordem de 180 MV a uma altitude de aproximadamente 6 km .

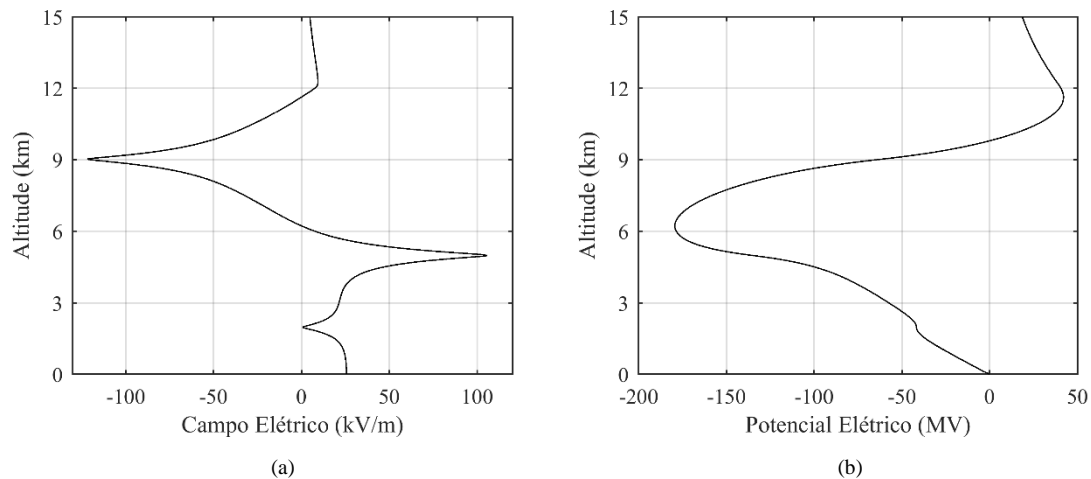


Figura 3.4 - Campo Elétrico (a) e Potencial Elétrico (b) verticais no eixo da nuvem de tempestade.

A Figura 3.5 apresenta os resultados obtidos a partir do cálculo do campo elétrico ao nível do solo para diferentes distâncias horizontais do eixo do cilindro. O campo elétrico vale $-25,7 \text{ kV/m}$ no ponto central do eixo ao nível do solo. Esse valor é negativo devido à contribuição majoritária do cilindro negativo inferior (região C). A inversão de campo elétrico não é detectada até a distância de 20 km , diferentemente do modelo tripolar simplificado mostrado na Figura 3.1.

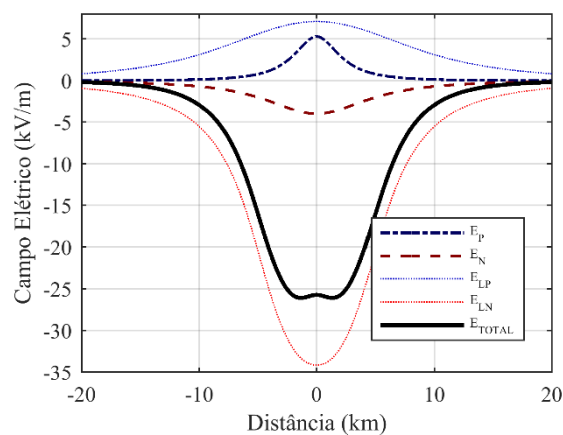


Figura 3.5 - Perfil do Campo Elétrico ao nível do solo para diferentes distâncias do eixo do cilindro.

3.4 Modelos de corpos condutores

Além da estrutura da nuvem de tempestade, este trabalho considera o modelo do canal de descarga (*leader* bidirecional), do canal ascendente (*leader* positivo) e de estruturas aterradas.

3.4.1 Modelo do *leader*

O canal de descarga consiste em um longo corpo condutor vertical, com raio r e comprimento variável. Sua parte positiva, o *leader* positivo ascendente, propaga-se para cima, enquanto a parte negativa, o *leader* negativo descendente (DNL), propaga-se para baixo, em direção ao solo.

O *leader* é modelado por cargas pontuais de valor e polaridades desconhecidas, que são distribuídas ao longo do eixo do comprimento do condutor e estão separadas por uma distância d . O valor de cada carga varia ao longo do tempo, sendo determinado em cada passo simulado, de modo que o potencial do *leader* (calculado em r) seja o potencial desejado. A Figura 3.6 ilustra a estrutura genérica do corpo condutor.

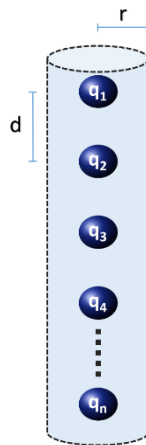


Figura 3.6 - Estrutura de cargas pontuais para representação do corpo condutor.

O canal ascendente surge como um corpo condutor de comprimento variável que possui a mesma representação mostrada na Figura 3.6. O potencial do canal ascendente é sempre nulo, já que ele está conectado ao solo ou a uma estrutura aterrada. As distâncias de separação e os raios escolhidos para o *leader* bipolar e o *leader* ascendente estão explicitados no capítulo 4.

3.4.2 *Modelo de estruturas aterradas*

Uma estrutura aterrada pode ser utilizada para representar diferentes casos para a simulação, como, por exemplo, um poste de rua ou uma torre instrumentada. O modelo implementado considera a distribuição com simetria cilíndrica apresentada na Figura 3.6, com comprimento constante, para o cálculo de cargas induzidas ao longo de um corpo condutor. Essas cargas são responsáveis por manter o potencial calculado na superfície de raio r sempre igual a zero, seja qual for a condição eletrostática à qual o sistema está submetido.

É possível determinar o valor médio da corrente elétrica que flui pelo corpo aterrado ao se avaliar a variação da carga total armazenada na estrutura entre passos de simulação subsequentes. O detalhamento do cálculo da corrente é realizado na seção 3.7.

3.5 Modelos de relevo do solo

O solo é uma das condições de fronteira para as cargas espaciais constituintes do modelo de formação da descarga atmosférica. Foram consideradas duas implementações possíveis: um solo ideal e um solo real, descritos a seguir.

3.5.1 *Solo plano*

O modelo do solo plano considera a implementação do método das imagens na solução das equações do problema. O solo é um plano infinito de carga total nula e potencial nulo, que pode ser removido se substituído por cargas virtuais de sinal contrário ao da carga original, posicionadas do outro lado do plano imaginário, conforme ilustrado pela Figura 3.7. Nessa situação, os potenciais são calculados com base na contribuição de todas as cargas pontuais do sistema e suas respectivas cargas imagem.

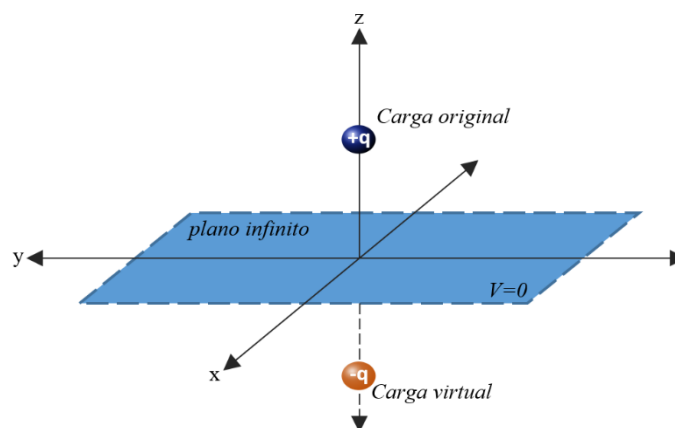


Figura 3.7 - Uso do método das imagens: carga pontual e plano infinito.

3.5.2 Solo representando o relevo de MCS

É possível a utilização de um recurso que torna possível a inserção de qualquer tipo de relevo real no modelo, dispensando o uso do método das imagens. São colocadas cargas a uma determinada profundidade do relevo almejado e a condição de solução do problema impõe que o potencial gerado por essas cargas, somado aos potenciais devidos a todas as outras cargas do sistema, resulte em um potencial nulo nos pontos desejados.

A Figura 3.8 esquematiza a distribuição de cargas pontuais abaixo da linha do solo, para a obtenção de potencial nulo no relevo desejado.

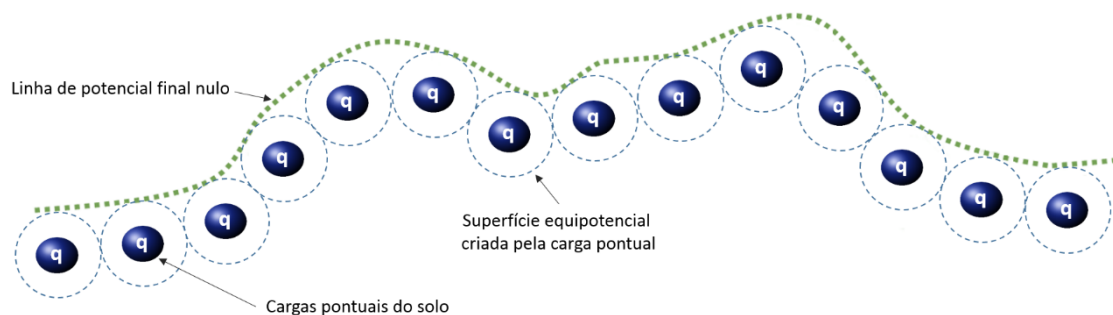


Figura 3.8 - Esquema da distribuição de cargas pontuais do solo. Adaptado de [Louro, 2017].

Do ponto de vista prático, a abordagem utilizada permite a avaliação das cargas no solo à medida em que se aproxima um canal negativo descendente, possibilitando a incorporação de diversas formas de relevo de interesse.

Neste trabalho, realiza-se a implementação do relevo da Estação Morro do Cachimbo. Localizada nos arredores de Belo Horizonte, a estação possui duas áreas de medição, distantes de 700 m. No abrigo principal, são realizados registros de corrente

elétrica, campo elétrico e luminosidade. Já no abrigo secundário, estão instalados sistemas de campo elétrico e de gravações de vídeo utilizando uma câmera ultrarrápida [Guimarães *et al.*, 2017]. A Figura 3.9 mostra uma fotografia da estação, tirada a aproximadamente 1 km de distância do abrigo principal.



Figura 3.9 - Fotografia da Estação Morro do Cachimbo e suas proximidades.

A Figura 3.10 ilustra o relevo correspondente a MCS, obtido através de um levantamento topográfico na região. É possível destacar os locais no abrigo principal, onde estão a torre instrumentada e o ponto principal de medição de campo elétrico, a 50 metros da torre, bem como a localização da câmera ultrarrápida, no abrigo secundário, a 700 metros de distância da torre.

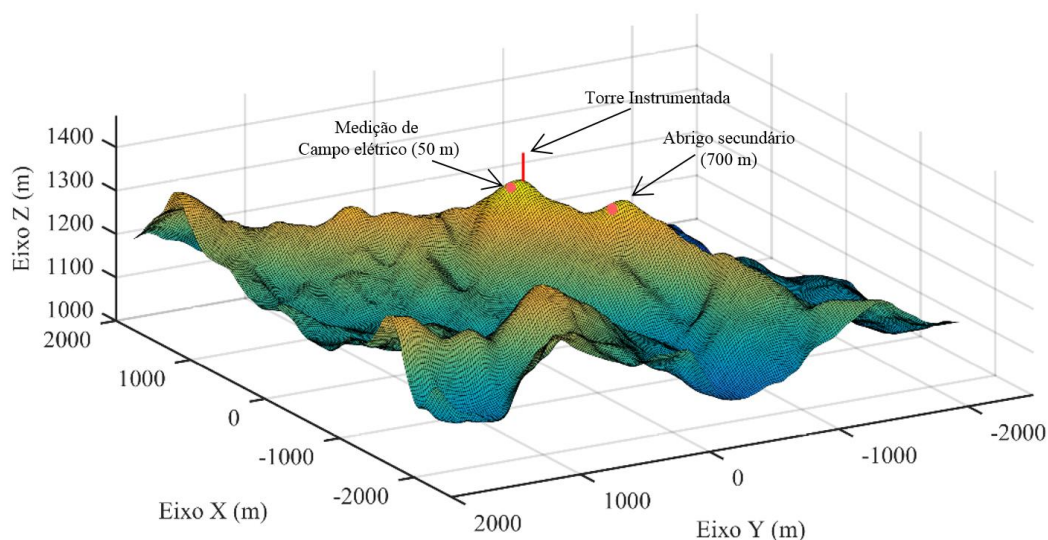
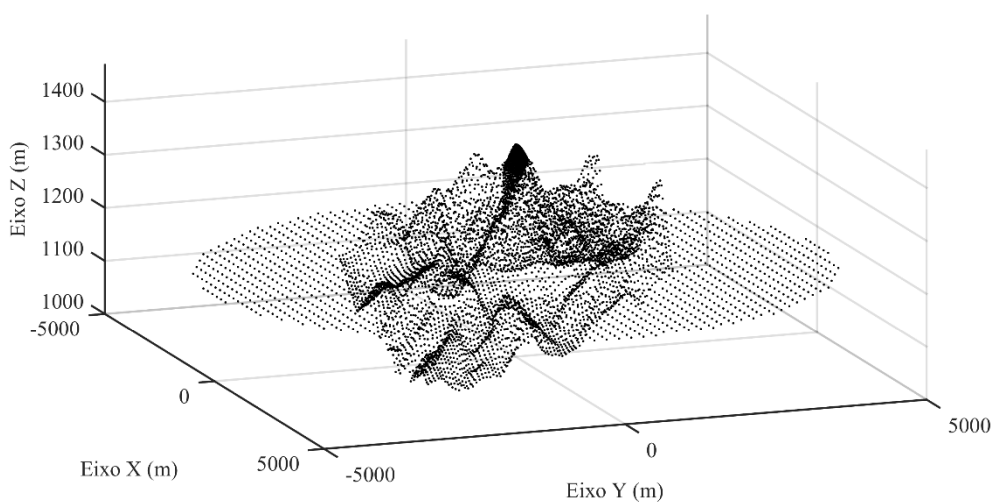


Figura 3.10 - Relevo correspondente à região de MCS, mostrando a torre instrumentada e o abrigo secundário.

Os pontos originais do relevo possuem separação de, aproximadamente, 33 m. Em busca de aperfeiçoar os valores obtidos para as grandezas elétricas do solo, optou-se por uma densidade de pontos de carga maior nas proximidades da torre, e sua diminuição à medida em que se afasta da torre. Por meio de interpolação entre os pontos de coordenadas existentes, são colocadas cargas espaçadas por 12 metros do eixo da torre até um raio de 200 metros; entre 200 e 1100 metros de distância da torre, as cargas estão separadas por 50 metros; para o restante do relevo, as cargas estão espaçadas por 200 m. As cargas são colocadas a uma profundidade igual ao espaçamento entre elas, seguindo o esquema ilustrado na Figura 3.8.

É importante ressaltar que foram considerados pontos de uma região aproximadamente quadrada de 2 km de lado, o que não é suficiente para o modelo, uma vez que a nuvem de tempestade cilíndrica possui 5 km de raio. Realizou-se a extensão do relevo de MCS até o raio de 5 km, considerando que os pontos externos ao relevo conhecido estão na altitude média da região circundante ao Morro do Cachimbo (aproximadamente até um raio de 10 km), ou seja, aproximadamente a 1140 m de altitude. A Figura 3.11 mostra os pontos correspondentes ao solo com a extensão até o raio da nuvem, com detalhamento em (b) para a região próxima à torre de MCS, em que são utilizados mais pontos de cargas pontuais.



(a)

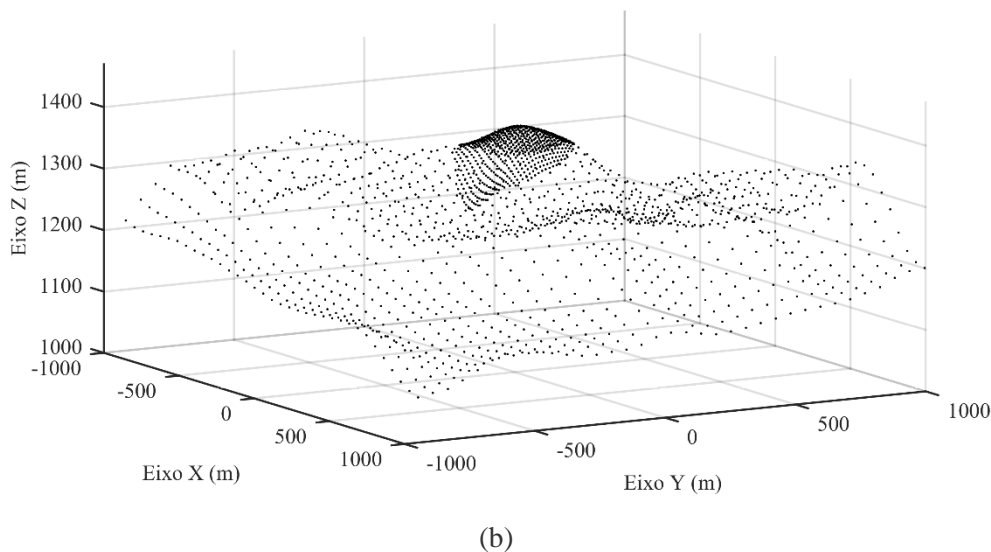


Figura 3.11 - Pontos de medição da implementação do solo real de MCS (a) com detalhamento de densidade de cargas na região da torre (b).

3.6 Camada de corona acima do solo

Medições de campo elétrico acima do solo mostram a existência de uma camada de cargas espaciais produzidas por efeito corona durante a ocorrência de tempestades [Becerra, 2007]. Essa camada depende de diversos fatores, tais como a intensidade do campo elétrico produzido pela nuvem ao nível do solo, a concentração de partículas aerossóis neutras e o tipo de vegetação local. As cargas espaciais desta camada podem influenciar nas condições requeridas para a iniciação de canais ascendentes a partir de estruturas posicionados sobre o solo. Tal camada pode se estender a altitudes consideráveis (até poucas centenas de metros acima do solo) e produz redução do campo elétrico de fundo (campo elétrico de variação lenta produzido pela nuvem de tempestade) [Bazelyan *et al.*, 2015]. Conforme resultados de medição em MCS, estima-se que amplitudes de cerca de 50 kV/m produzidas ao nível do solo pelas cargas de nuvens são tipicamente reduzidas para cerca de $\pm 5 \text{ kV/m}$ devido a este efeito.

A Figura 3.12 ilustra um registro de campo elétrico lento, medido em MCS, durante 30 minutos de uma tempestade. É possível perceber a presença de pulsos de campo elétrico correspondentes à detecção de descargas atmosféricas na região da estação. Além disso, nota-se que, antes e após as descargas, o campo elétrico se estabiliza em valores tipicamente na faixa de $\pm 5 \text{ kV/m}$.

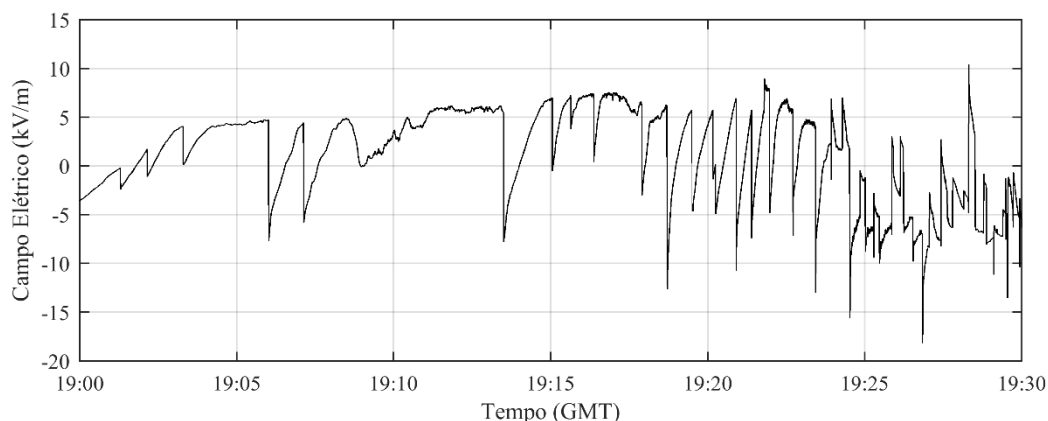


Figura 3.12 - Forma de onda de campo elétrico lento típica observada em MCS.

Adaptado de [Guimarães et al., 2017].

Neste trabalho, não se incorporou um modelo para a camada de corona existente no solo. Considerando-se que, ao nível do solo, as cargas espaciais quase anulam o efeito do campo de fundo, e a grande variabilidade do valor de campo resultante quando se consideram eventos diferentes, as análises desenvolvidas atribuem o campo elétrico resultante em qualquer ponto inteiramente às cargas depositadas ao longo do *leader* bipolar [Arcanjo et al., 2018a].

3.7 Determinação numérica das grandezas elétricas envolvidas

Dada uma condição estática do sistema, com as posições da nuvem e da estrutura aterrada fixadas e com o comprimento do *leader* definido, é possível calcular as distribuições de potencial e de campo elétrico em qualquer ponto espacial, bem como as cargas induzidas para uma determinada condição de potencial e a corrente elétrica média que flui por uma estrutura aterrada, ao se considerarem passos consecutivos da simulação. Esta seção apresenta a formulação utilizada na rotina computacional implementada.

3.7.1 O Método de Simulação de Cargas (CSM)

No Método de Simulação de Cargas, detalhado por Singer [1974], são utilizadas cargas discretas colocadas fora da região onde se deseja obter o valor de campo ou potencial, e, assim, determina-se, por superposição, o valor de campo na região de interesse. Os valores das cargas discretas são determinados de modo a satisfazer as condições de contorno em um número específico de pontos.

Tendo em vista que os valores e as posições das cargas são conhecidos para um passo da simulação, o potencial e a distribuição de campo em qualquer lugar da região podem ser computados com certa facilidade. O potencial elétrico em qualquer ponto do sistema pode ser obtido pela equação de Poisson, mostrada na Equação 3.2.

$$\nabla^2 \phi = -\frac{q}{\varepsilon} \quad (3.2)$$

Em que 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 E [kV/m] em uma direção qualquer pode ser calculado utilizando o gradiente do potencial, mostrado na Equação 3.3.

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi \quad (3.3)$$

Utilizando o CSM para resolver a Equação 3.2, temos

$$\phi_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} q_j \quad (3.4)$$

Em que 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 3.13 ilustra um esquema utilizado para o cálculo do potencial no ponto M , devido à presença de n cargas.

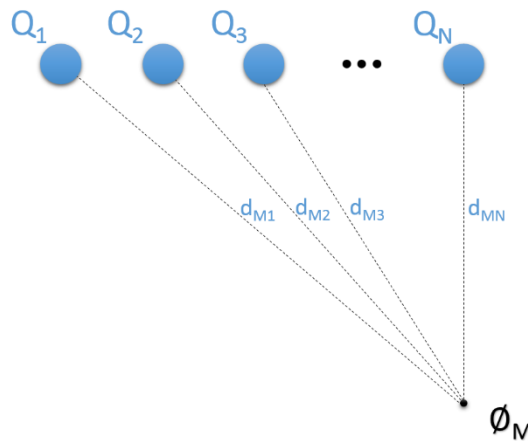


Figura 3.13 - Cálculo do potencial em um ponto utilizando o CSM. Adaptado de *Malik* [1989].

No caso de diversos pontos de medição de potencial, a relação descrita pela Equação 3.4 pode ser expandida para a relação matricial mostrada na Equação 3.5.

$$\Phi = \mathbf{P}\mathbf{Q} \rightarrow \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{M1} & P_{M2} & \cdots & P_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \vdots \\ \Phi_M \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Nesse caso, \mathbf{P} é a matriz dos coeficientes de potencial, \mathbf{Q} é o vetor coluna com os valores das cargas conhecidas e Φ é o vetor de potenciais elétricos a se determinar. Os coeficientes de potencial são calculados utilizando a Equação 3.6, em que d_{MN} é a distância entre uma carga pontual e um ponto de medição.

$$P_{MN} = \frac{1}{4\pi\epsilon d_{MN}} \quad (3.6)$$

Se a solução do problema requer a determinação da carga induzida em uma determinada estrutura (*leader*, estrutura aterrada ou solo), basta inverter a matriz \mathbf{P} e utilizar um vetor de potenciais conhecidos para determinar \mathbf{Q} , como mostra a Equação 3.7.

$$\mathbf{Q} = \mathbf{P}^{-1}\Phi \rightarrow \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{M1} & P_{M2} & \cdots & P_{MN} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \vdots \\ \Phi_M \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Se, para a solução do problema eletrostático, for considerado a representação do solo ideal, deve-se utilizar o método das imagens. Nesse caso, serão geradas duas matrizes de potencial, a primeira, \mathbf{P}_1 , referente às cargas reais acima do solo e a segunda, \mathbf{P}_2 , referente às cargas imagem, de valor igual e sinal contrário às cargas reais, posicionadas do outro lado do plano do solo plano, como ilustrado na Figura 3.7. Portanto, a matriz \mathbf{P} apresentada nas Equações 3.5 e 3.7 será a resultante da subtração das matrizes \mathbf{P}_1 e \mathbf{P}_2 .

3.7.2 Carga e corrente nas estruturas modeladas

Aplicadas as devidas condições de contorno em cada passo da simulação, o CSM permite a obtenção de campo elétrico e potencial elétrico em todos os pontos espaciais do domínio da representação física. Também é possível determinar a carga das estruturas que compõe o sistema, já que apenas a nuvem possui cargas invariáveis.

A carga total da parte negativa do DNL é dada pelo somatório das cargas pontuais negativas que compõem a porção negativa do *leader* bipolar, como mostra a Equação 3.8.

$$q_{DNL} = \sum_{i=1}^{N/2} q_i \quad (3.8)$$

É conveniente avaliar a carga total da estrutura aterrada somada à carga de um *leader* ascendente (UCL), caso ele exista. Essa carga é dada pela Equação 3.9.

$$q_{estrutura_total} = \sum_{j=1}^M q_{estrutura} + \sum_{i=1}^N q_{UCL} \quad (3.9)$$

Os valores de carga obtidos em diferentes passos de simulação podem ser combinados para a observação dinâmica do comportamento da carga armazenada em uma estrutura. Se o intervalo de tempo entre dois passos consecutivos (Δt) é suficientemente pequeno, pode-se utilizar esses valores para a determinação da corrente elétrica média que flui pela estrutura. A Equação 3.10 descreve o uso da Equação 3.9 para obtenção da corrente elétrica no instante de tempo intermediário a dois passos de simulação.

$$i \left[t + \frac{\Delta t}{2} \right] = \frac{q_{estrutura_total}[t + \Delta t] - q_{estrutura_total}[t]}{\Delta t} \quad (3.10)$$

Nas simulações realizadas para o cálculo dos pulsos de corrente, foi assumido que a variação da carga acumulada ocorria num intervalo de $5 \mu s$, pois este intervalo (Δt) é consistente com as observações de corrente em MCS [Visacro *et al.*, 2010]

3.8 Considerações finais

Neste capítulo, foi mostrado como o modelo computacional implementa as diferentes estruturas físicas que representam o sistema simulado, para o monitoramento da evolução das grandezas elétricas envolvidas na formação do canal de descarga, a saber: nuvem de tempestade, *leader* bipolar, *leader* ascendente, estrutura aterrada e solo. Foi discutido como o CSM é aplicado para a solução das condições de contorno impostas pelo problema, possibilitando a obtenção do campo elétrico e do potencial elétrico determinados pelo conjunto de cargas pontuais. Complementarmente, também se mostrou como são obtidas as cargas totais e a corrente elétrica nas estruturas do sistema físico.

4 Dinâmica da simulação da formação do canal de descarga atmosférica

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as considerações realizadas para implementação da dinâmica de simulação da formação do canal de descarga. O modelo eletrostático é aplicado consecutivamente em intervalos de tempo muito curtos (na faixa de microssegundos) e, através dos cálculos indicados no capítulo 3, é possível avaliar a evolução das grandezas elétricas envolvidas na formação do canal de descarga atmosférica nuvem-solo.

Essa metodologia não aborda a dinâmica física da propagação do *leader*, tal como o mecanismo de transição de *streamers* para o *leader*. Ela apenas possibilita monitorar os valores das grandezas elétricas envolvidas de acordo com a evolução das condições geométricas das estruturas do sistema e com as condições de contorno de cada passo, como discutido a seguir.

4.2 Condições de contorno do problema

Como discutido no capítulo 2, o presente trabalho considera o modelo do *leader* bidirecional para o desenvolvimento do canal de descarga. Tal *leader* surge na parte

inferior da nuvem, no ponto de campo elétrico máximo entre a camada negativa e as cargas positivas inferiores. O *leader* bipolar possui carga líquida nula e se estende até configurar uma conexão que transfere efetivamente carga positiva do solo para a nuvem (ou, equivalentemente, negativa da nuvem para o solo).

4.2.1 Potenciais dos elementos do sistema simulado

As cargas da nuvem de tempestade possuem valor e posição fixos. Em cada passo da simulação, o potencial do *leader* é assumido constante e igual à média dos valores do potencial de fundo causado pelas cargas da nuvem (e das cargas que estas induzem no solo), ao longo do comprimento do *leader*.

Considerando-se novamente as condições de simulação realizada por Mazur e Ruhnke [1998], considerou-se um *leader* de raio 1 m e espaçamento entre cargas pontuais $d = 1 m$. A Figura 4.1 exibe o potencial de fundo provocado pela nuvem (linha azul), calculado em pontos posicionados à distância de 1 m do eixo do *leader* determinado para tais condições. Aplicando-se o Princípio da Superposição ao problema, para um dado comprimento do *leader* bipolar, a distribuição de potenciais gerados pelas cargas induzidas no canal da descarga nuvem-solo, indicada pela curva verde, deve ser igual à diferença entre o potencial do *leader* (linha preta) e a distribuição dos potenciais gerados pelas cargas da nuvem nos pontos do *leader* (curva azul). Essa distribuição de potenciais (linha verde) constitui parâmetro de entrada para a determinação das cargas do *leader*.

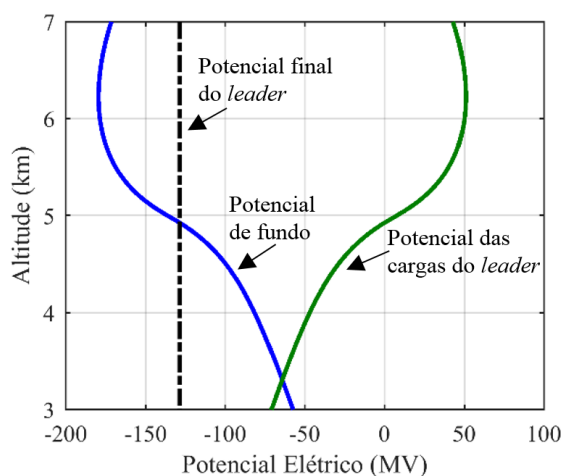


Figura 4.1 – Potenciais utilizados para o cálculo das cargas do *leader*.

A Figura 4.2 esquematiza os potenciais utilizados para cálculos referentes à estrutura aterrada, que seguem o mesmo raciocínio de superposição empregado para o *leader* bipolar. Nesse caso, o potencial final já é conhecido e igual a zero. O mesmo procedimento deve ser considerado na existência de um canal ascendente a partir do topo da estrutura aterrada. A distribuição de potencial gerada por suas cargas somada ao potencial de fundo calculado em seu raio deve ser nulo.

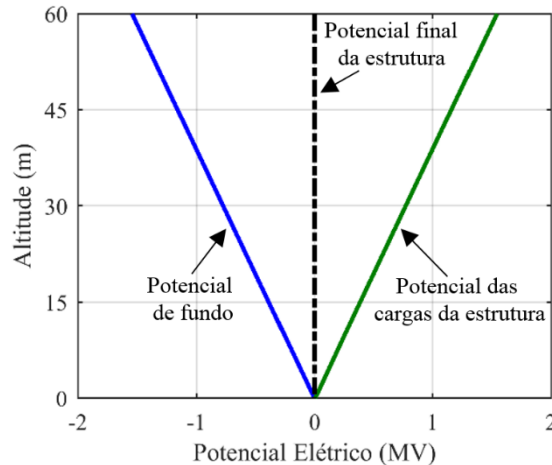


Figura 4.2 - Potenciais utilizados para o cálculo das cargas da estrutura aterrada.

Em princípio, a presença da estrutura aterrada no solo compromete a simetria geométrica perfeita do problema. Contudo, avaliações realizadas em Louro [2017] mostram que os resultados obtidos para o solo plano sem estruturas e outro, também plano, mas com a presença de estruturas têm diferenças mínimas quando a representação da estrutura é feita colocando-se uma imagem simétrica ao solo para cada carga usada. Portanto, optou-se por empregar o método das imagens em todos os casos de simulação de solo plano na presença de uma estrutura aterrada e/ou canal ascendente, objetivando-se a realização uma simulação simplificada.

No caso da representação de relevos não planos, como o de MCS, as cargas posicionadas abaixo da superfície do solo devem ser tais que a somatória das contribuições para o potencial de cada ponto, geradas pelas cargas de todos os elementos do sistema, tenha valor nulo. Uma vez estabelecida a condição de contorno para relevos reais do solo, as contribuições das cargas do solo e da nuvem geram um potencial de fundo do tipo ilustrado na Figura 4.3, que mostra o perfil do potencial elétrico vertical acima do solo, no eixo da nuvem de tempestade, especificamente considerando o relevo

de MCS. Note que, nesse caso, o potencial nulo ocorre para uma altitude próxima a 1500 m.

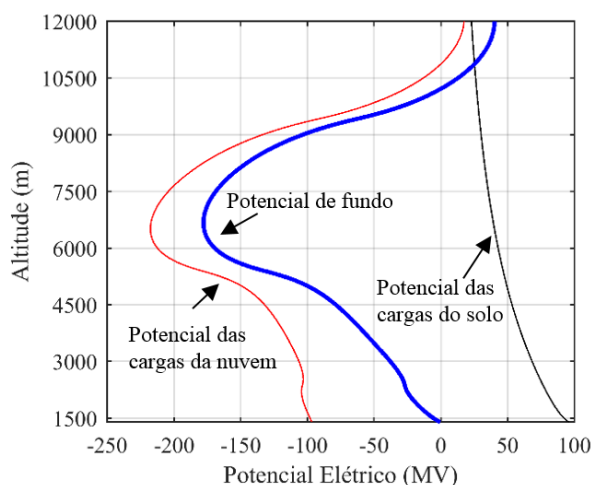


Figura 4.3 - Potencial de fundo considerando o modelo de solo real.

4.3 Evolução do canal precursor da descarga atmosférica

segundo o modelo do *leader* bidirecional

4.3.1 Dinâmica da simulação

Cada passo da simulação consiste em uma "fotografia" eletrostática do sistema, que exhibe o estado das grandezas elétricas envolvidas. Os únicos elementos de comprimento variável são o *leader* bipolar e, caso exista, o *leader* ascendente. Utilizando as condições de contorno descritas na seção anterior, torna-se possível determinar todas as cargas das estruturas, e, conseqüentemente, todas as grandezas de interesse.

Primeiramente, a rotina computacional faz uma leitura de todos os parâmetros de entrada do sistema. O modelo genérico simulado permite a utilização da nuvem de tempestade descrita na seção 3.2 em diferentes altitudes, bem como a utilização ou não de uma estrutura aterrada de diferentes comprimentos. A Tabela 4.1 apresenta uma visão geral dos parâmetros de entrada inseridos no código. Os valores típicos desses parâmetros são discutidos na análise de sensibilidade realizada no capítulo 5 deste trabalho.

Tabela 4.1 - Parâmetros de entrada da rotina computacional

Nome	Descrição	Valor típico
<i>base_nuvem</i>	Altitude da base da nuvem de tempestade. (determina o posicionamento de todas as cargas das estruturas cilíndricas)	2,40 km
<i>raio_desc</i>	Raio do canal bipolar de descarga.	1,00 m
<i>raio_asc</i>	Raio do canal ascendente.	0,20 m
<i>raio_estrutura</i>	Raio da estrutura aterrada.	0,20 m
<i>h_inf</i>	Altitude da base inferior da estrutura aterrada.	0 (solo plano) 1401 m (solo de MCS)
<i>h_sup</i>	Altitude da base superior da estrutura aterrada.	60 m (solo plano) 1461 m (solo de MCS)
<i>E_threshold</i>	Valor limiar para o campo elétrico a 1 m da estrutura, para início da propagação do canal ascendente.	530 kV/m
<i>Flag</i>	Valor de indicação do tipo de solo. Para solo plano (0) ou solo de MCS (1)	0 (solo plano) 1 (solo de MCS)

4.3.2 Evolução do leader bidirecional

Segundo o modelo de nuvem implementado, o ponto de início do canal de descarga está localizado 3 km acima da base da nuvem. O programa calcula, para cada passo, o comprimento esperado para as partes positiva e negativa (DNL) do canal bipolar. Tendo em vista a discussão realizada no capítulo 2, escolheu-se para o intervalo de tempo aproximado entre passos do DNL o valor de 50 μ s, e sua velocidade igual a 0,2 m/ μ s.

Embora a parte superior do canal bipolar se propague continuamente, a simulação considera que seu crescimento se realiza da mesma forma do DNL, com extensões de 10 m por passo, já que sua relevância se dá apenas no cálculo do potencial do leader. Entretanto, enquanto o DNL continua sua evolução em direção ao solo, o canal positivo superior tem a sua propagação interrompida quando o seu potencial se iguala ao potencial de fundo do sistema na extremidade superior do leader.

A Figura 4.4 representa esquematicamente e de forma estilizada a evolução do DNL numa simulação de solo plano, sem considerar a presença do canal ascendente. Cada um dos instantes mostrados corresponde a um instante da simulação em que são

calculadas cargas na estrutura e no canal de descarga. Em cada passo, o canal descendente aumenta 10 metros.

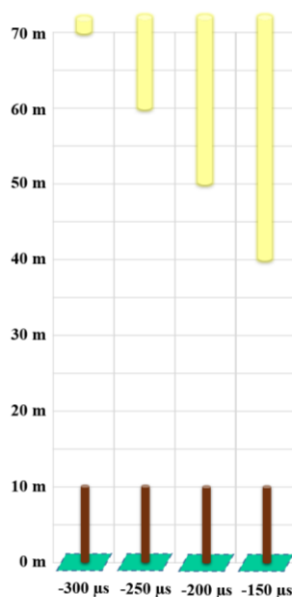


Figura 4.4 - Esquema da evolução do canal negativo descendente.

A representação da evolução do canal ascendente (UCL) considera a natureza contínua de seu modo de propagação. A velocidade escolhida para a evolução do UCL é de $0,1 m/\mu s$ (menor que a velocidade do DNL). O seu modo de propagação sugere o uso de passos de simulação com intervalo bem reduzido, da ordem de alguns microssegundos.

A Figura 4.5 mostra a sequência temporal do esquema ilustrado na Figura 4.4, numa situação em que, hipoteticamente, o canal ascendente surge em $t = -100 \mu s$. Para considerar o surgimento do canal ascendente, avalia-se a cada passo no modelo computacional o valor de campo elétrico médio $1 m$ acima da extremidade da estrutura aterrada. Se esse valor supera um limiar estabelecido pelo usuário (através da variável $E_threshold$), os passos seguintes passam a considerar o desenvolvimento do UCL.

É possível perceber, na Figura 4.5, que o passo de simulação é trocado de $50 \mu s$ para $5 \mu s$ e que o canal descendente interrompe sua propagação à medida que o ascendente cresce. São necessários 10 passos do UCL (5 metros) para um passo de 10 metros do DNL, considerando as diferentes velocidades dos dois canais. O instante de conexão entre os dois canais (*attachment*) aconteceria em $t = 0 s$.

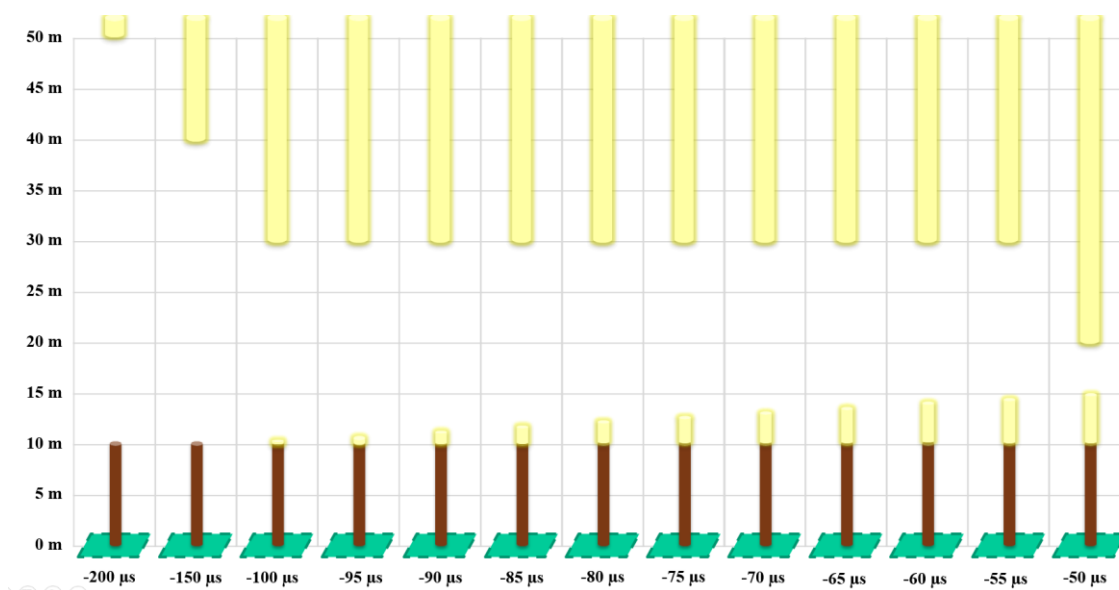


Figura 4.5 - Esquema da evolução do DNL após o surgimento do UCL.

Os recursos apresentados nesta subseção permitem ao modelo contemplar os métodos de propagação dos canais negativos e positivos. Assim, torna-se possível, através das simulações realizadas, desenvolver uma análise qualitativa das consequências desses diferentes métodos na evolução da descarga negativa nuvem-solo.

4.3.3 Carga transferida e Campo Elétrico após a corrente de retorno

A abordagem eletrostática utilizada neste trabalho não permite a modelagem do processo de *attachment*, uma vez que este processo envolve equações dinâmicas que necessitam a configuração de um modelo particular para o canal da descarga de retorno com parâmetros específicos. Entretanto, o valor de carga total transferida para o solo e o campo elétrico final após o fluxo da corrente de retorno da descarga podem ser calculados pelo modelo.

A Figura 4.6 ilustra o potencial do *leader* na última iteração antes do *attachment* para a simulação de uma condição de solo plano. É possível resolver a equação 3.7 para se determinar as cargas que precisam ser fornecidas para anular esse potencial. Decorrido o intervalo após o *attachment*, correspondente ao fluxo da corrente de retorno, pode-se calcular a distribuição de cargas ao longo do canal, atribuindo-lhe o potencial nulo. O somatório dessas cargas representa a carga total transferida pela descarga. Do conjunto de cargas do sistema (da nuvem, do solo e do canal) pode ser determinado o campo elétrico resultante em qualquer ponto do espaço, inclusive na superfície do solo.

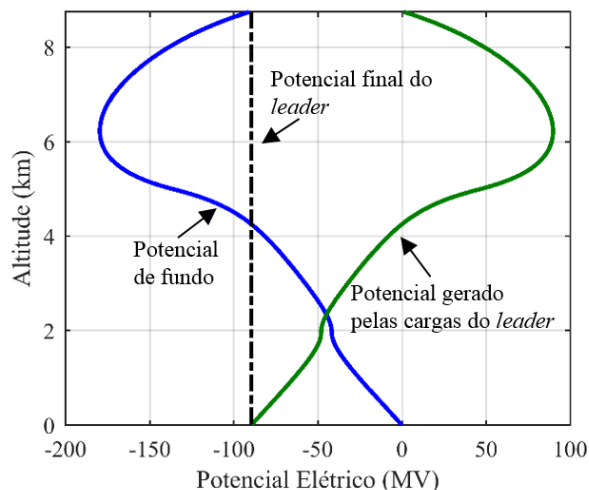


Figura 4.6 - Potencial final do canal de descarga na iteração que antecede o *attachment*.

4.4 Modelo computacional

O modelo computacional foi implementado utilizando-se o MATLAB[®] (*matrix laboratory*), um ambiente computacional numérico que permite o desenvolvimento dos algoritmos de cálculo deste trabalho e a manipulação dos resultados obtidos.

Embora fisicamente consistente, a formulação apresentada levaria a uma matriz de potenciais de ordem elevada. Apenas a representação da nuvem de tempestade requer 146072 pontos de cargas pontuais, o que corresponde a uma matriz de coeficientes de potencial com a ordem de 10^{10} elementos. A exigência de memória volátil para alocação da matriz torna inviável a aplicação direta do CSM nestas condições, sobretudo quando se considera o uso de computadores com 8 GB de memória RAM.

Neste trabalho, adotou-se a mesma abordagem utilizada em Louro [2017], baseada no princípio da superposição. Nas avaliações para cálculo dos potenciais e cargas do problema não foram utilizadas as cargas das nuvens a cada passo e, sim, cargas e potenciais gerados por estas no eixo do(s) *leader*(s), no solo e na estrutura aterrado, calculados num único passo no início da simulação. Como as cargas da nuvem não modificam, a contribuição destas para indução de cargas e potenciais permanece a mesma ao longo de todo o processo.

4.4.1 Estruturas de dados

Objetivando-se simplificar a implementação e o uso da rotina computacional, o código desenvolvido utiliza cerca de 20 funções que modularizam as tarefas executadas pelo programa. Trabalha-se com variáveis de entrada e saída padronizadas para representação das grandezas utilizadas, o que facilita futuras expansões e modificações no algoritmo.

Basicamente, empregam-se duas estruturas de dados para representar a maior parte das variáveis de interesse do programa. A primeira das estruturas, cujo esquema é ilustrado na Figura 4.7a, corresponde a um arranjo de cargas, contendo informações sobre o valor de cada carga pontual e o ponto do espaço em que a carga está localizada. Um valor de identificação (*id*) permite que a mesma estrutura seja considerada em passos diferentes, possibilitando criar-se um vetor de estruturas ao longo tempo. Esse tipo de estrutura é utilizado para a representação da nuvem de tempestade, do *leader* bipolar, do conjunto estrutura aterrada / canal ascendente e do solo real.

A segunda estrutura, mostrada na Figura 4.7b é um arranjo de pontos de medição, contendo os valores de potencial e campo elétrico em pontos específicos. Algumas estruturas de medição estão associadas às respectivas estruturas de cargas. Por exemplo, no caso da representação do solo real, a estrutura de cargas do solo possui cargas posicionadas a uma determinada profundidade do relevo, enquanto a estrutura de medição do solo está associada ao potencial elétrico diretamente nos pontos do relevo. Da mesma forma acontece para o *leader* bipolar, em que a estrutura de cargas possui pontos centrados no eixo da nuvem de tempestade e a estrutura de medição está afastada deste eixo pelo raio do *leader*.

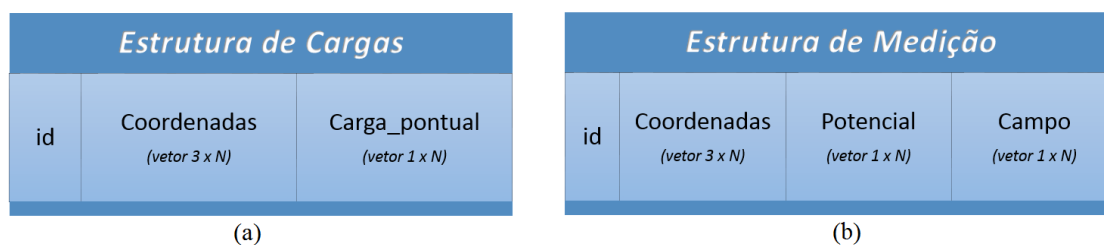


Figura 4.7 - Esquema de representação das estruturas de cargas (a) e das estruturas de medição (b) encapsuladas na rotina computacional.

As funções de cálculo que utilizam as equações 3.5 e 3.7 para a solução do problema de potencial acessam os dados contidos nas estruturas de cargas e de medição na montagem das matrizes dos coeficientes de potencial.

4.4.2 Descrição da rotina de simulação

A Figura 4.8 ilustra o fluxograma simplificado da rotina de simulação. O programa pode ser dividido em três macro etapas: a primeira etapa inicializa todas as estruturas utilizadas ao longo da simulação, a segunda e terceira etapa resolvem o problema de potencial considerando, respectivamente, a evolução do canal bipolar e do canal ascendente.

Primeiramente, o programa realiza a leitura dos parâmetros de entrada (descritos na Tabela 4.1) e das constantes internas utilizadas na rotina computacional. Em seguida, são criadas as representações de estruturas físicas da nuvem e da torre, e é implementado o tipo de solo da solução. No caso da representação do solo não plano, o programa importa os dados do relevo desejado e cria a estrutura de representação das cargas do solo, bem como a estrutura de medição correspondente ao relevo.

A segunda etapa do programa determina a posição inicial e final do *leader* para o passo correspondente e faz a resolução das condições de fronteira para encontrar as cargas induzidas em todas as estruturas do problema. A avaliação do campo elétrico em um ponto acima de estruturas aterradas do sistema constitui critério para iniciação do UCL e para a troca de passo da simulação, explanada através dos diagramas das Figura 4.4 e Figura 4.5.

A etapa de desenvolvimento do canal ascendente consiste na verificação das condições geométricas do DNL e do UCL para constatar a ocorrência do *attachment*. Durante dez passos, ocorre desenvolvimento do canal ascendente enquanto o canal descendente permanece estático, contemplando o caráter de desenvolvimento contínuo do canal positivo ante o desenvolvimento por passos do canal negativo.

Funções auxiliares não contempladas no fluxograma podem ser executadas após o término da simulação e permitem uma análise quantitativa das variáveis do problema, como a determinação da carga e da corrente elétrica na estrutura aterrada, o campo elétrico em qualquer ponto ao longo da evolução do DNL e após a incidência da descarga e o cálculo da carga total transferida pela descarga.

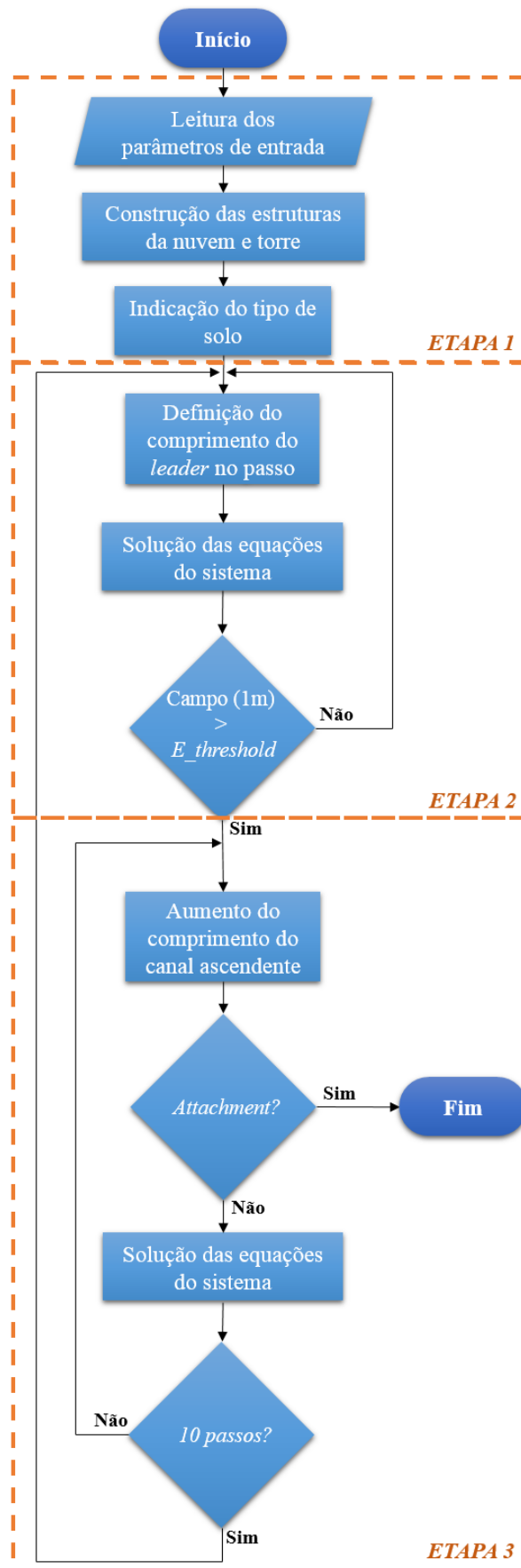


Figura 4.8 – Fluxograma simplificado da rotina computacional.

4.5 Considerações Finais

Neste capítulo, foram consideradas a dinâmica da simulação da formação do canal de descarga e as condições assumidas para realizá-la. A rotina computacional utiliza uma abordagem eletrostática por passos, contemplando os diferentes modos de propagação do canal de descarga. Embora um modelo de corrente de retorno não seja considerado, o enfoque eletrostático permite a determinação da carga transferida e do campo elétrico após a corrente de retorno.

A implementação do programa utilizando o MATLAB® e um computador Intel® Core™ i5-3470, CPU de 3,2 GHz, com 8 GB de memória RAM limita o número de cargas pontuais utilizadas pelo sistema, pois esse número determina uma matriz de coeficientes de potencial que deve ser invertida em cada um dos passos da simulação. Assim, não seria possível realizar as simulações considerando as cargas da nuvem de tempestade. Realizou-se a supressão das cargas das nuvens e a utilização do potencial que elas causam nos pontos de interesse (denominado neste trabalho potencial de fundo), já que as mesmas são fixas e constantes. Tal estratégia torna viável a execução da simulação, sem comprometer a consistência física do problema.

Vale comentar que um ciclo completo de simulação compreende de 400 a 600 passos (cada qual correspondente a uma condição geométrica dos canais durante a evolução destes) dependendo da complexidade do sistema físico representado.

5 Aplicação da ferramenta computacional a casos de interesse

5.1 Introdução

Este capítulo mostra o resultado da aplicação sistemática da rotina computacional desenvolvida para implementação do modelo apresentado nos capítulos anteriores para a avaliação qualitativa do comportamento das grandezas elétricas envolvidas nos processos de formação das descargas, notadamente do campo elétrico próximo ao nível do solo e acima da estrutura aterrada.

As aplicações consideram diferentes condições geométricas dos elementos que compõem o sistema simulado com objetivo de conferir representatividade aos resultados obtidos.

5.2 Apresentação dos casos avaliados

O capítulo aborda cinco diferentes conjuntos de avaliações. Inicialmente, verifica-se a consistência dos resultados obtidos para uma configuração básica, em referência aos resultados desenvolvidos inicialmente por *Mazur e Ruhnke* [1998], para condição similar.

Em seguida, recorrendo-se a essa mesma configuração, mostram-se resultados de análise de sensibilidade para a definição de parâmetros geométricos otimizados na

representação do sistema simulado, notadamente por meio da variação dos raios dos canais ascendente e descendente e do posicionamento vertical da nuvem de tempestade.

O terceiro conjunto de avaliações é dedicado à análise da relação entre o campo elétrico acima do topo da estrutura aterrada e do campo elétrico observado ao nível do solo plano, a uma distância de 50 metros dessa estrutura (tal qual a condição de medição em MCS), nos instantes que antecedem a iniciação do canal positivo ascendente. Verifica-se tal relação para dois tipos de estrutura aterrada.

As avaliações do quarto conjunto contemplam especificamente a análise dos resultados obtidos a partir da inserção do relevo de MCS, em substituição à condição do solo plano considerada nos casos anteriores.

As avaliações finais do capítulo referem-se à aplicação do modelo numa condição especial, que reflete a representação geométrica do canal de descarga de um evento real registrado em MCS e do solo local, considerando a ocorrência de ramificação no canal de descarga e suas tortuosidades.

A Tabela 5.1 apresenta um sumário do conjunto de avaliações reportadas neste capítulo.

Tabela 5.1 - Sumário da descrição das etapas de simulação

Avaliação	Descrição
1 (Seção 5.3)	Caso base: Solo plano com torre de 60 metros, nuvem posicionada a 2400 metros de altitude.
2 (Seção 5.4)	Análise de sensibilidade a partir do caso base: Variação dos raios dos canais de descarga e da altura da nuvem de tempestade.
3 (Seção 5.5)	Estimativa do quociente da amplitude dos campos elétricos acima da estrutura e ao nível do solo a 50 m desta: Variação da altura da estrutura aterrada: torre de 60 m e poste de 10 m.
4 (Seção 5.6)	Inserção do relevo de MCS: Solo real (MCS) com torre de 60 metros e nuvem posicionada a 2400 metros de altitude.
5 (Seção 5.7)	Simulação das condições de uma descarga real em MCS.

5.3 Caso Base

O caso básico consiste na simulação da evolução de um canal bipolar vertical considerando o solo plano e condutor com uma torre de 60 m, posicionada no eixo da nuvem de tempestade, como mostra a Figura 5.1. A diferença principal em relação à condição analisada por Mazur e Ruhnke [1998] consiste na altura da base da nuvem de tempestade a 2,4 km de altitude. Esse valor se mostra mais coerente com altitudes do ponto de orvalho observado na região de MCS. Nesta condição, o *leader* bipolar flutuante deve surgir a 5,4 km de altitude.

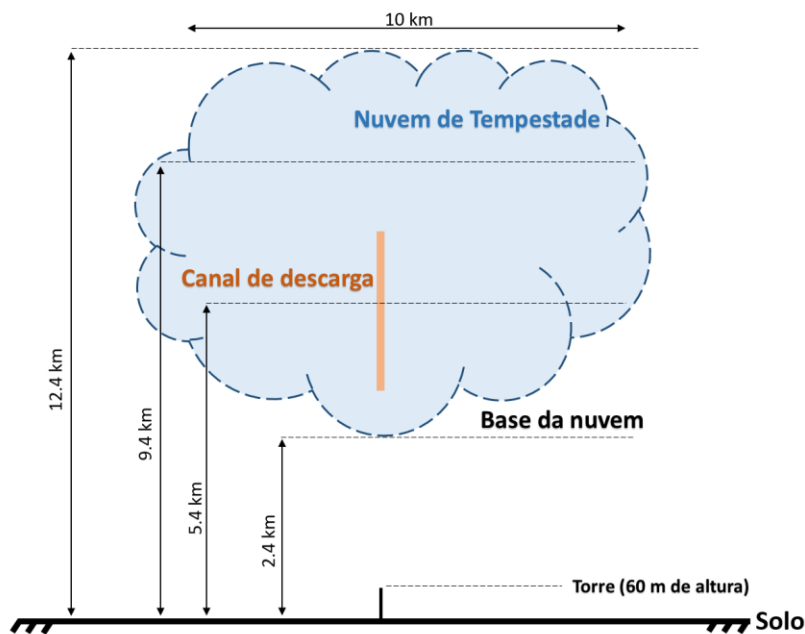


Figura 5.1 - Esquema de posicionamento das estruturas simuladas no caso base.

5.3.1 Resultados

A Figura 5.2 mostra os resultados da aplicação do código na condição básica, relativos ao potencial (a) e ao campo elétrico vertical (b) ao longo do eixo da nuvem de tempestade, na ausência do canal de descarga. A partir da figura, pode-se observar que as posições dos máximos gradientes de potencial positivo e negativo, que correspondem aos campos elétricos máximos negativo e positivo respectivamente, estão em alturas de 5,4 e 9,4 km, sendo a primeira a altura de iniciação do *leader* bipolar.

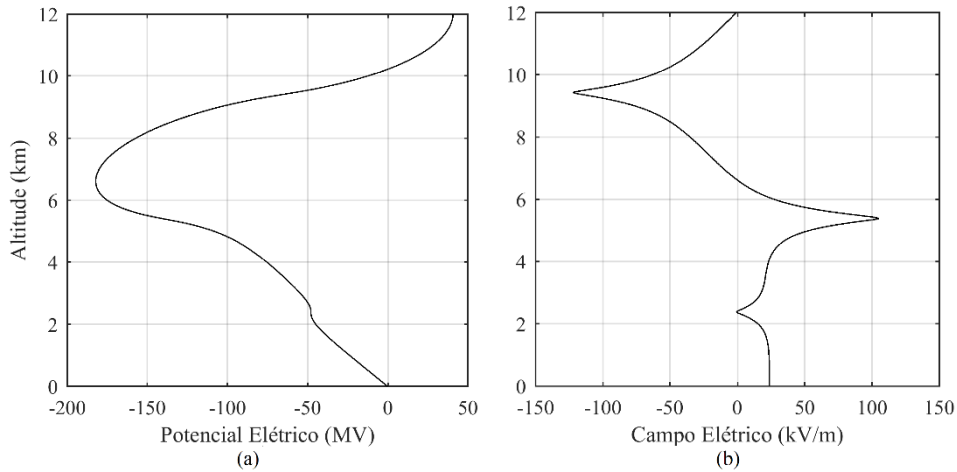


Figura 5.2 - Potencial vertical (a) e Campo Elétrico vertical (b) da configuração exibida na Figura 5.1.

Para a condição representada na Figura 5.1, é possível realizar a simulação da evolução do *leader* bipolar, a partir de 5,4 km, até que o DNL toque o solo. Neste caso básico, adotou-se o raio do canal bipolar igual a 1 metro e o raio do canal ascendente e da estrutura aterrada iguais a 0,20 m. Assumiu-se que o início do canal ascendente se dá quando o campo elétrico a 1 m acima da torre supera um limiar de 530 kV/m.

A Figura 5.3 mostra a variação do potencial vertical após alguns passos de evolução do *leader*. À medida em que o *leader* cresce, seu potencial (calculado pela média do potencial de fundo do sistema) também cresce. A parte superior do *leader* praticamente interrompe a sua propagação quando a altitude de 9 km é atingida. Nessa situação, seu potencial médio se iguala ao potencial de fundo, ou seja, não existe gradiente de potencial para sustentar sua propagação para cima.

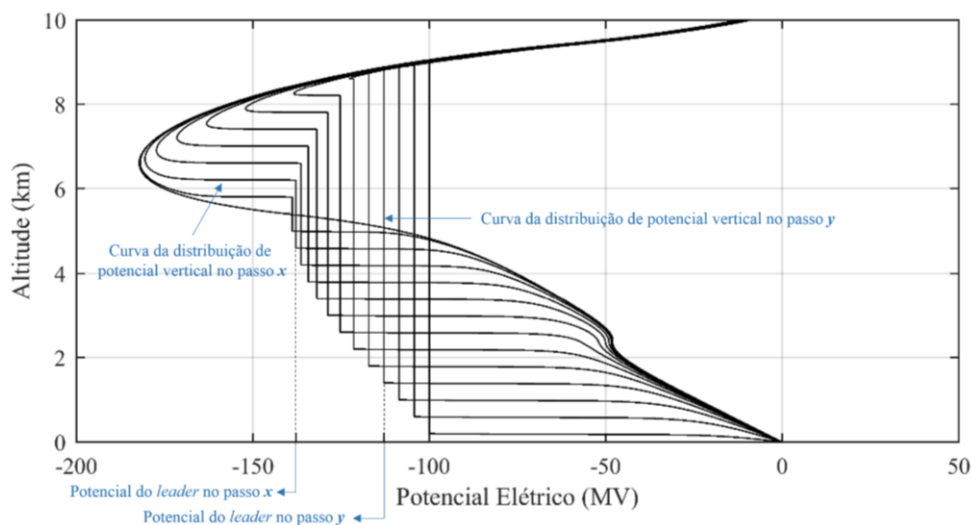


Figura 5.3 - Potencial vertical calculado no raio do *leader* para vários passos da simulação.

É possível determinar, para as mesmas iterações mostradas na Figura 5.3, a distribuição de cargas no *leader*. Nessa condição, mostrada na Figura 5.4, observa-se o caráter bipolar do *leader* flutuante, que possui cargas negativas em sua parte inferior e positivas na sua parte superior. Para as iterações finais, pode-se observar cargas negativas na parte superior do *leader*, que são detectadas à medida que ele penetra na parte positiva superior da nuvem de tempestade cilíndrica (região A).

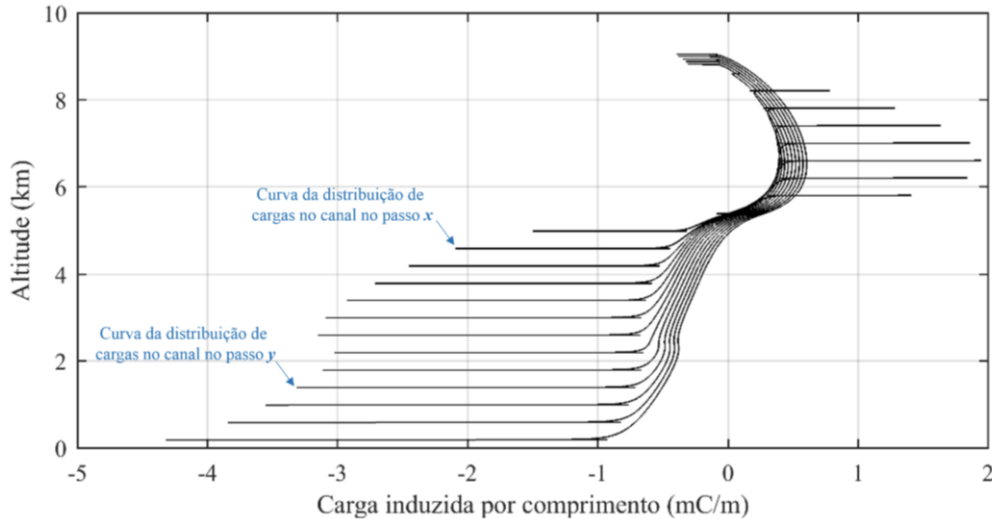


Figura 5.4 - Distribuição de cargas no comprimento do *leader* para vários passos da simulação.

Utilizando a dinâmica descrita no capítulo 4, é possível calcular o campo elétrico obtido ao nível do solo a diferentes distâncias do eixo axial da nuvem de tempestade. A Figura 5.5 mostra os resultados para o campo elétrico próximo, calculados a 50 metros de distância da torre, um metro acima do solo. O instante de tempo igual a 0 s representa a ocorrência do *attachment*. É possível notar que o módulo do campo elétrico atinge um valor máximo de 112,5 kV/m, na parte ampliada da figura, que mostra os 2,5 ms finais da simulação. Todos os cálculos de campo elétrico realizados neste capítulo consideram apenas a contribuição referente à evolução do canal bipolar, não levando em conta o campo de fundo ocasionado pela nuvem.

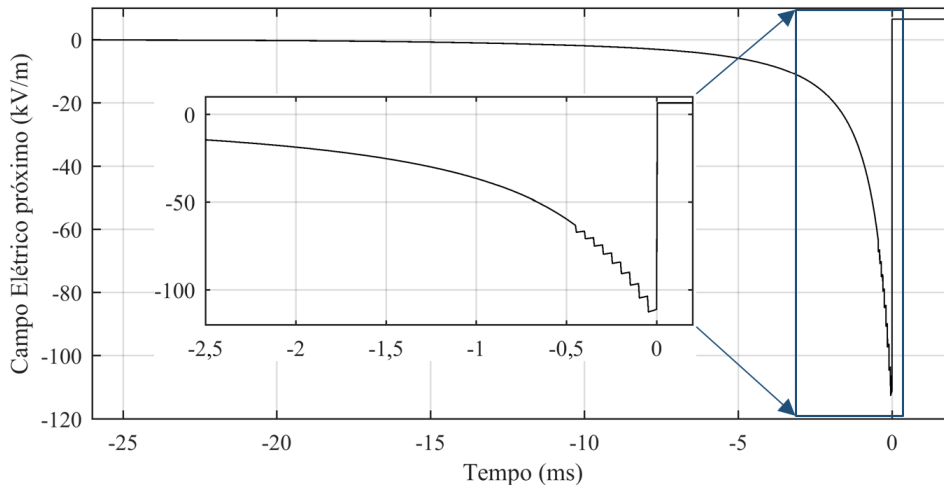


Figura 5.5 - Campo elétrico observado ao nível do solo, a 50 metros de distância da torre.

Na Figura 5.5, notam-se degraus na curva de campo elétrico a partir da iniciação da propagação do UCL. Tal efeito é percebido após a troca do passo de simulação (de $50 \mu s$ para $5 \mu s$). À medida que o UCL evolui, o aumento de cargas positivas leva a uma diminuição no módulo do campo elétrico. Esse efeito é notado até que ocorra um novo passo do DNL. No instante de iniciação do UCL ($t = -450 \mu s$), o campo elétrico observado tem módulo igual a $67 kV/m$ e a extremidade inferior do DNL está a $190 m$ de altura.

Buscou-se verificar o perfil de campo elétrico ao nível do solo para diferentes distâncias da torre, como mostrado na Figura 5.6. A $700 m$ de distância (a), o perfil exibido é semelhante ao perfil de campo próximo calculado a $50 m$, entretanto, o valor máximo de campo observado é de $-12 kV/m$ antes do *attachment* e $6 kV/m$ após a corrente de retorno. Ao aumentar-se a distância para $2 km$ (b), observa-se uma inversão no sentido de crescimento do campo antes do *attachment* e uma diminuição dos valores observados. No caso de $10 km$ (c), o perfil de campo elétrico se altera, devido ao distanciamento das cargas negativas do DNL. Em $20 km$ (d), a variação de campo consolida a mudança de perfil e apresenta o menor valor observado, $50 V/m$ durante a corrente de retorno.

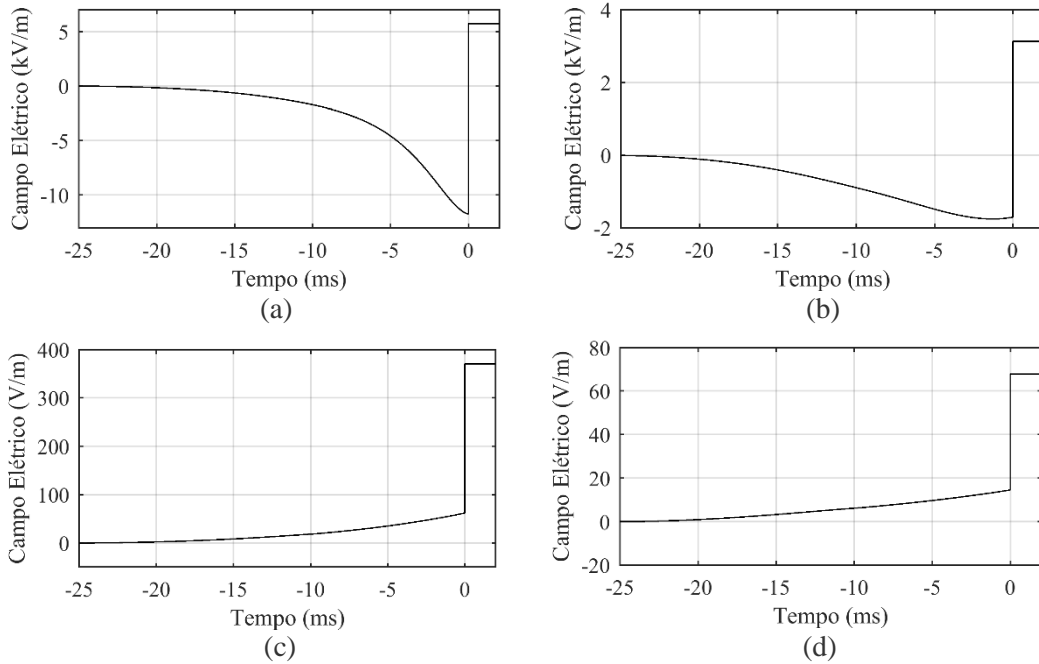


Figura 5.6 - Campo Elétrico ao nível do solo para 700 m (a), 2 km (b), 10 km (c) e 20 km (d) de distância da torre.

O campo elétrico médio 1 m acima da torre foi calculado a partir do potencial elétrico obtido em vários pontos num segmento de 10 centímetros. O resultado desse cálculo é mostrado na Figura 5.7a. A partir do instante de surgimento do canal ascendente, a taxa de crescimento do campo elétrico é aumentada. Na Figura 5.7b, é mostrada a carga total do DNL durante os 25 ms simulados. Tal carga está armazenada na porção inferior do canal bipolar (que se inicia a 5,4 km de altitude), como mostra a Figura 5.4. Nos instantes finais precedentes ao *attachment*, estão distribuídos 1,87 C de carga negativa ao longo do DNL.

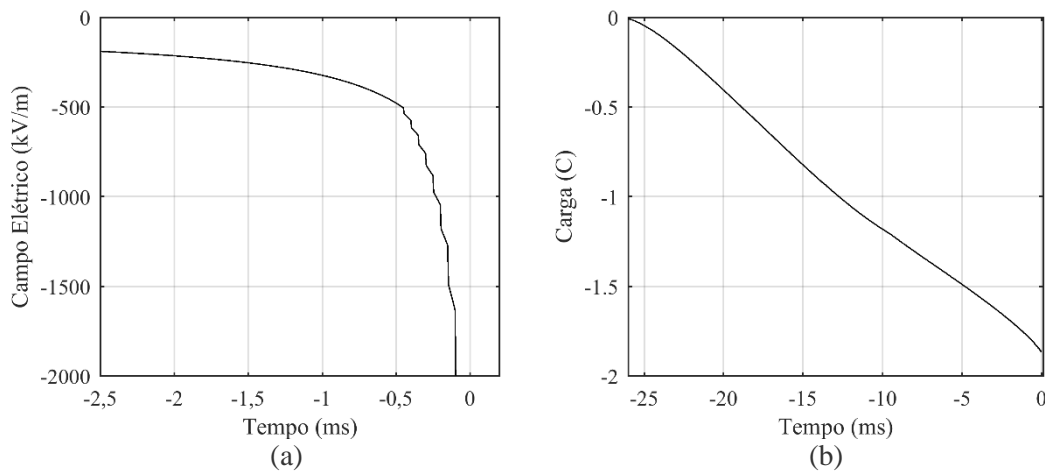


Figura 5.7 - Campo Elétrico 1 m acima da torre (a) e Carga Elétrica armazenada no DNL (b).

A Figura 5.8 mostra a curva de carga total acumulada na torre, e no conjunto torre e canal ascendente, após o surgimento do mesmo. O valor máximo de carga positiva armazenado no conjunto é igual a 14 mC , muito inferior à carga máxima armazenada no DNL, indicada anteriormente. Esse valor apresenta ordem de grandeza semelhante aos valores obtidos em MCS, nos casos das descargas nas proximidades da estação, que dão origem à canais ascendentes na torre [Visacro *et al.*, 2013b].

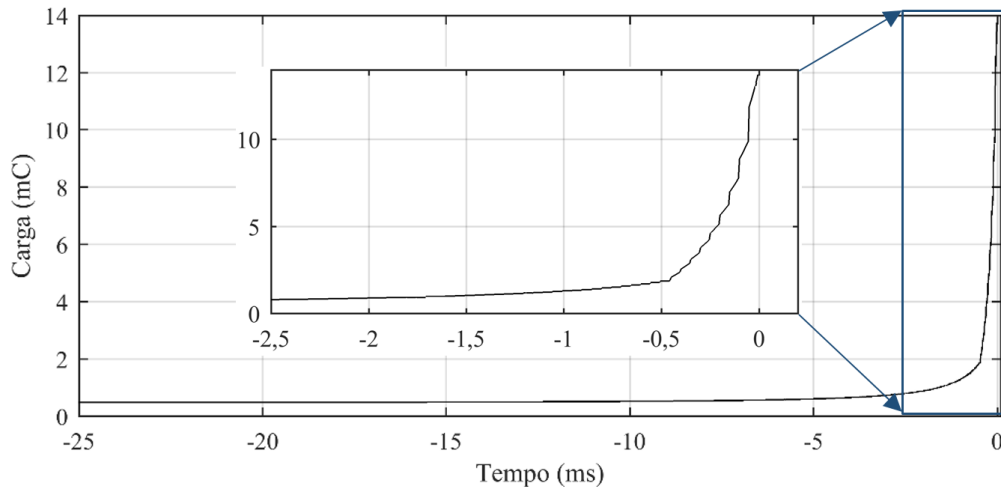


Figura 5.8 - Carga total na estrutura aterrada, somada à carga do UCL após seu surgimento.

O perfil da corrente média que flui na estrutura aterrada é obtido através da diferença de carga armazenada no conjunto torre e canal ascendente entre passos consecutivos dividida pelo intervalo de tempo correspondente (equação 3.10). Os resultados mostrados na Figura 5.9 indicam a presença de pulsos unipolares de corrente durante a evolução do DNL, que correspondem à resposta da torre à aproximação do canal descendente. Após o surgimento do UCL, percebe-se um crescimento exponencial de uma componente contínua de corrente superposta aos pulsos induzidos, associado ao crescimento contínuo do UCL positivo. Para a condição desta simulação, logo após o surgimento do UCL, a corrente contínua atinge um valor igual a $6,4 \text{ A}$, que é aumentado na sequência, alcançando $48,1 \text{ A}$ antes do *attachment*. O maior pulso de corrente registrado tem amplitude de $400,1 \text{ A}$.

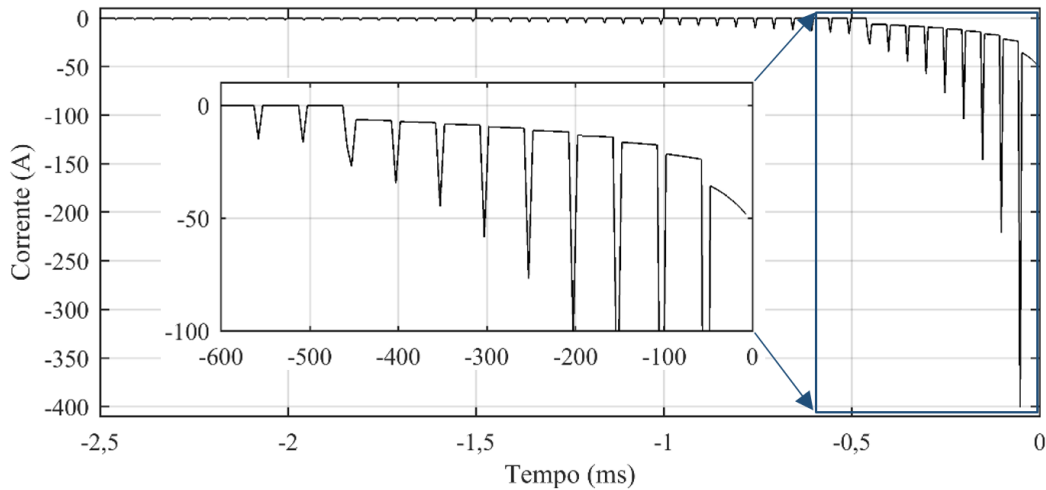


Figura 5.9 - Perfil de corrente elétrica que flui ao longo da estrutura aterrada.

5.3.2 Carga transferida pela corrente de retorno

A equação 3.7 pode ser utilizada numa condição posterior ao *attachment* e ao fluxo da corrente de retorno para o cálculo da carga total transferida. Para obtenção desse valor, são calculadas as cargas transferidas do solo para o canal na condição de que o seu potencial nulo fosse levado até à sua extremidade superior na nuvem. A Figura 5.10 exibe a distribuição de cargas provida pela corrente de retorno, para que se atinja a condição de potencial resultante nulo no canal. A distribuição final de cargas é positiva, resultado consistente com o potencial negativo resultante do *leader*. A quantidade de cargas transferida pelo processo da descarga também é positiva e apresenta uma distribuição não uniforme a distâncias inferiores a 2 km das extremidade do canal.

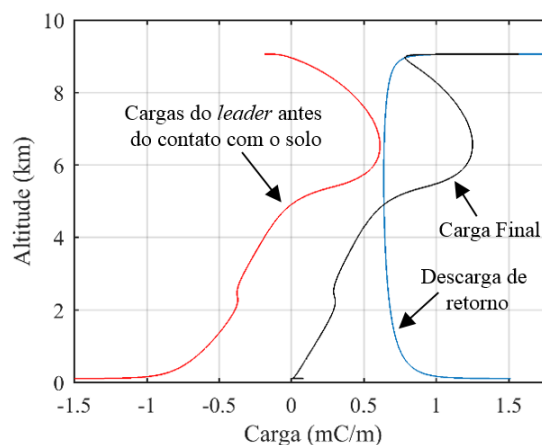


Figura 5.10 - Cargas induzidas no canal de descarga antes do contato com o solo e após a descarga de retorno.

A carga total transferida, dada pelo somatório de cargas pontuais da descarga de retorno, para a condição simulada nesta seção é igual a 6,105 C. A Figura 5.11 mostra,

de forma estilizada, o esquema de transferência de carga pela descarga negativa nuvem solo implementada na simulação computacional, indicando a distribuição de cargas no canal nuvem-solo, as cargas providas pela descarga de retorno e a distribuição final.

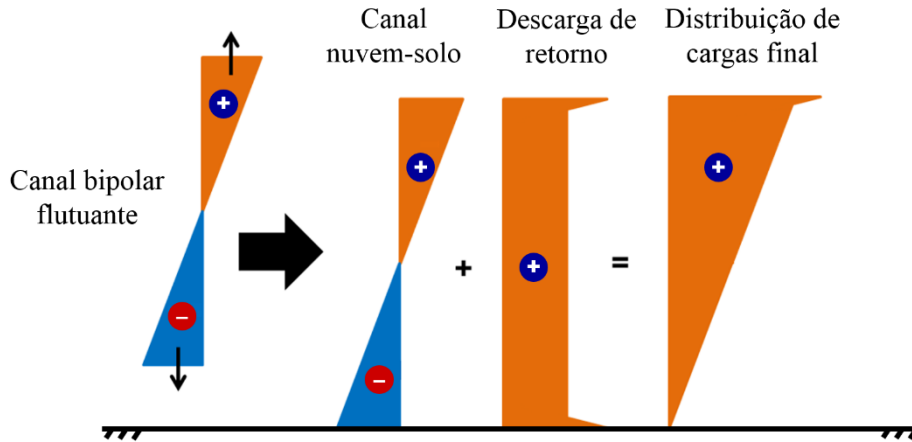


Figura 5.11 - Distribuição de cargas no canal antes e logo após a corrente de retorno. Adaptado de Mazur e Ruhnke [1998].

Os resultados obtidos para o caso básico mostram-se consistentes com aqueles reportados por Mazur e Ruhnke [1998]. Os resultados relativos ao perfil de corrente média induzida na estrutura aterrada são consistentes com os resultados de medições reais reportadas na literatura, como em Visacro *et al.* [2010].

5.4 Análise de sensibilidade dos parâmetros de entrada

A partir do caso base apresentado na seção anterior, foram realizadas variações nos parâmetros de entrada do código computacional, de modo a verificar como as variáveis de saída são afetadas. Em dois conjuntos de simulações distintos, foram avaliados os efeitos das alterações do raio dos canais (descendente e ascendente) e da altura da nuvem de tempestade.

5.4.1 Efeito do raio do canal

Nesta etapa, é empregado o mesmo esquema de posicionamento da nuvem (ilustrado na Figura 5.1) com a base a 2,4 km de altitude. A torre de 60 m possui raio e separação de cargas pontuais fixos e iguais a 20 cm, enquanto os raios dos canais descendente e ascendente são alterados.

Como a configuração do ambiente simulado é a mesma, optou-se por determinar o início do canal ascendente no mesmo instante em que ele é observado na simulação do caso básico, independentemente do valor de campo elétrico momentâneo. De tal modo, nessa análise de sensibilidade, os canais ascendentes se iniciam quando a extremidade inferior do DNL se encontra a 190 m de altura. Para a avaliação do efeito do canal ascendente, mantém-se o raio do canal descendente igual ao raio do canal no caso base (1 m). Na verificação do efeito do raio do canal descendente, o raio do canal ascendente permanece fixo em 20 cm.

A Figura 5.12 exibe os valores obtidos para o campo elétrico próximo (calculado ao nível do solo, a 50 metros da estrutura aterrada), ao se variar o raio do canal descendente. O campo elétrico no instante de iniciação do UCL varia entre 46,4 e 79,7 kV/m, enquanto o campo elétrico máximo observado vai de 77,8 kV/m a 133,9 kV/m. O aumento do raio ocasiona uma elevação nos valores das cargas depositadas ao longo de seu comprimento, o que, por sua vez, eleva o módulo de campo elétrico na superfície.

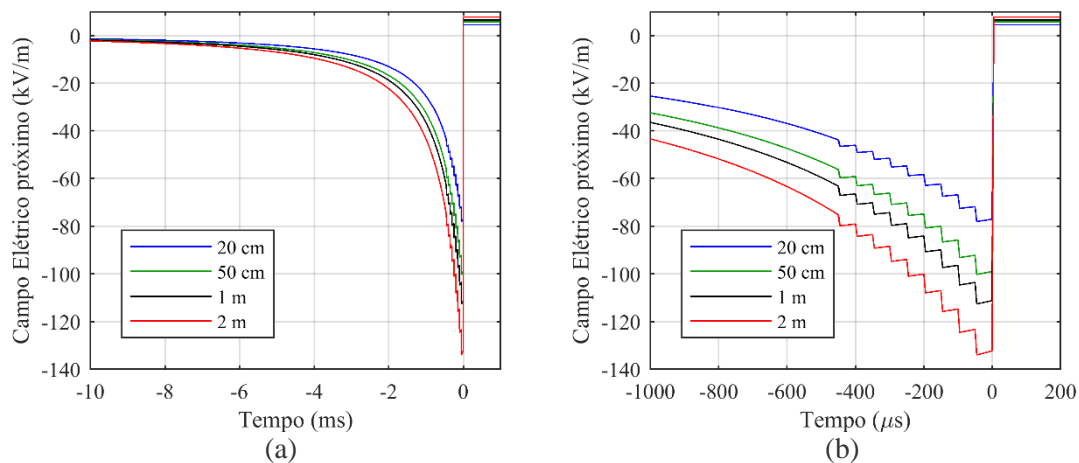


Figura 5.12 - Campo elétrico calculado a 50 m da torre para diferentes raios do DNL. Janela de 10 ms (a) e de 1 ms (b).

Alterando-se o raio do UCL, obtêm-se as formas de onda ilustradas pela Figura 5.13. Nessa situação, a variação de campo elétrico só acontece após a iniciação do UCL, e é bem menos significativa, representando menos de 9 % do valor do campo no caso básico.

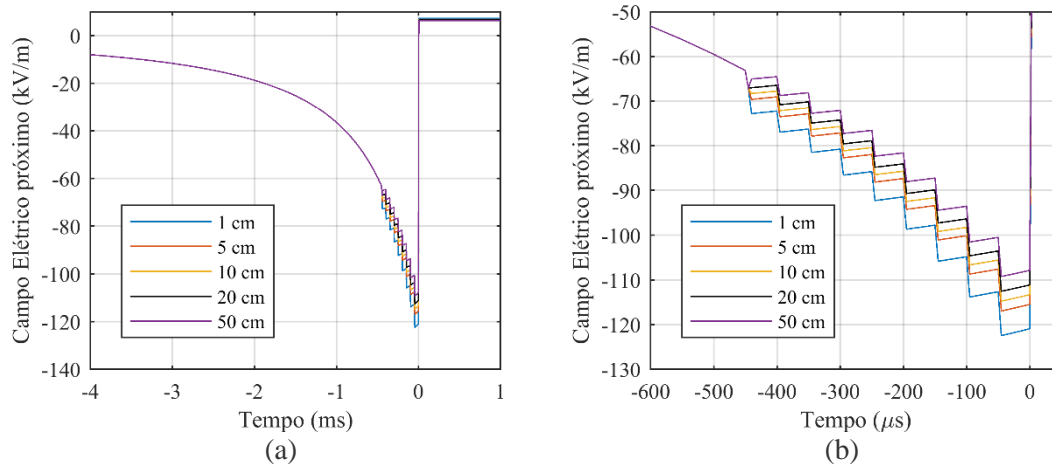


Figura 5.13 - Campo elétrico calculado a 50 m da torre para diferentes raios do UCL. Janela de 4 ms (a) e de 600 μs (b).

A Figura 5.14 apresenta o campo elétrico calculado ao longo de um segmento de 10 cm no ponto que está 1 m acima da torre. Nesse caso, assim como no registro de campo próximo, as variações do raio do DNL (a) afetam fortemente o campo elétrico observado. Entretanto, na variação do raio do UCL (b), ocorrem alterações súbitas no valor de campo elétrico, o que não é detectado na análise de campo próximo.

As análises realizadas a partir deste resultado mostram que, após o surgimento do UCL, quando seu raio é menor que o raio da torre (1 cm, 5 cm e 10 cm), o módulo de campo elétrico diminui bruscamente. No caso em que este raio é maior que o raio da torre (50 cm), ocorre um aumento severo do valor de campo elétrico. Este efeito pode ser explicado a partir da mudança do volume por unidade de comprimento do canal ascendente e, portanto, de sua capacidade de armazenar cargas, se comparado à torre. Além disso, após o surgimento do UCL, o ponto de cálculo do campo está sempre 1 m acima dele, se afastando da extremidade da torre. Dessa forma, um UCL que possua um raio menor que o raio da torre (que é considerada um cilindro perfeitamente condutor pelo modelo) drenará, em seu estágio inicial, menos carga que a extremidade dessa estrutura. O contrário acontece no caso em que o UCL possui um raio maior que a estrutura aterrada.

Como indica a Figura 5.14b, após alguns passos do canal descendente, a intensificação de campo elétrico acima do UCL supera o efeito supracitado e o campo elétrico retoma seu crescimento. Dessa forma, para uma análise coerente com o desenvolvimento físico da iniciação do UCL, utiliza-se um canal ascendente que possua o mesmo raio da estrutura aterrada.

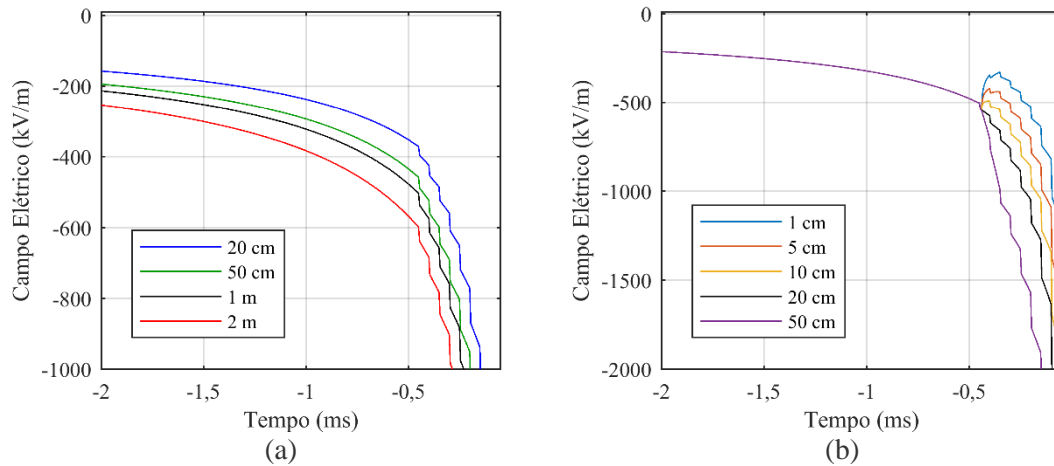


Figura 5.14 - Campo elétrico calculado 1 m acima da torre para diferentes raios do DNL (a) e do UCL (b).

Os resultados obtidos na análise de campo elétrico estão resumidos na Tabela 5.2. Para todos os casos simulados, mostra-se o módulo do campo elétrico próximo e o campo elétrico 1 m acima da torre na iniciação do UCL. São calculadas as variações percentuais que esses valores apresentam em relação ao caso básico. Como abordado anteriormente, o campo elétrico a 50 m possui uma dependência muito mais significativa do raio do DNL do que do raio do UCL, com diferenças da ordem de 30 %. Da mesma forma, o campo elétrico a 1 m da torre para uma mesma altura do DNL também é fortemente afetado pelo raio do canal descendente. Entretanto, para um mesmo raio do canal ascendente a variação percentual dos campos observados em relação ao caso básico é muito similar.

Tabela 5.2 - Campo elétrico observado para variações no raio descendente e ascendente.

Caso	Raio do canal descendente	Raio do canal ascendente	$E_{SOLO(50m)}^1$ (kV/m)	Variação percentual	$E_{TOPO(1m)}^2$ (kV/m)	Variação percentual
1 ³	1 m	20 cm	67,0	--	536,6	--
2	20 cm	20 cm	46,4	-30,7 %	395,7	-26,3 %
3	50 cm		59,6	-11,0 %	488,3	-9,0 %
4	2 m		79,4	+18,5 %	638,5	+19,0 %
5	1 m	1 cm	67,0	--	536,6	--
6		5 cm	67,0	--	536,6	--
7		10 cm	67,0	--	536,6	--
8		50 cm	67,0	--	536,6	--

¹ campo elétrico ao nível do solo 50 m distante da estrutura no início do UCL

² campo elétrico 1 m acima da estrutura no início do UCL

³ caso base

Considerando-se a porção inferior do canal bipolar, determina-se a somatória de cargas acumuladas no DNL. A Figura 5.15 mostra os valores obtidos para a carga total

ao longo da simulação, na alteração do raio do DNL (a) e do UCL (b). Como esperado, o valor de carga é consideravelmente influenciado pelo raio do DNL, variando entre 1,4 e 2,0 C, no momento do *attachment*, e praticamente não se altera quando se modifica o raio do UCL (menos de 0,05 % de diferença).

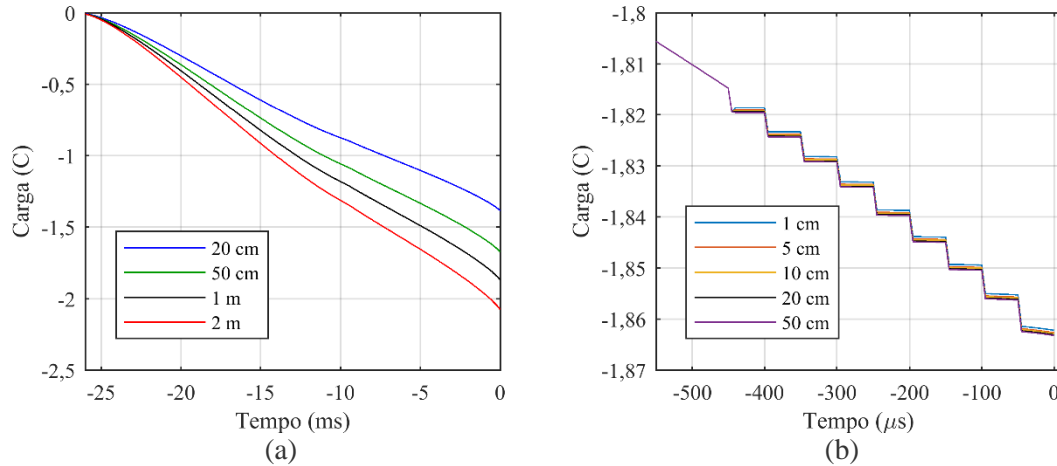


Figura 5.15 - Carga armazenada no canal descendente negativo, para variação do raio do DNL (a) e do UCL (b).

A Figura 5.16 exibe a carga total armazenada na torre, somada à carga do UCL, quando da sua existência. Neste caso, as variações de ambos os raios exercem notória influência na grandeza analisada. Um aumento do raio do canal descendente eleva a concentração de cargas negativas no DNL, que, por sua vez, induzem mais cargas positivas no UCL. De maneira análoga, a partir do aumento do raio do UCL, mais cargas são depositadas na torre e no UCL.

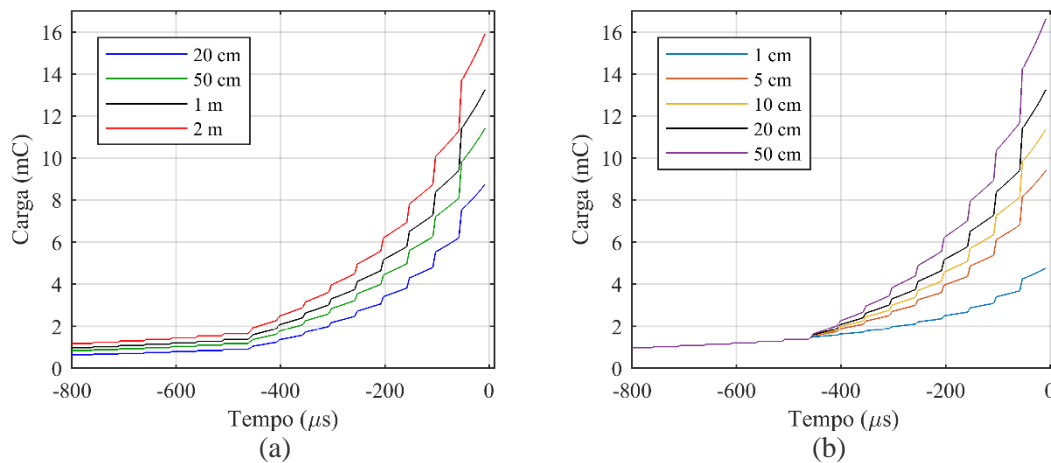


Figura 5.16 - Carga armazenada na torre e torre + UCL, para variação do raio do DNL (a) e do UCL (b)

A corrente elétrica que flui na estrutura aterrada está apresentada na Figura 5.17. Os pulsos de corrente elétrica induzidos na torre possuem amplitudes diferentes, na variação do raio do canal descendente, como visto em (a) e ampliado em (b), bem como o valor da componente contínua correspondente ao desenvolvimento do canal ascendente, que, na iteração final, varia de 32 a 58 A. No segundo caso de avaliação, mostrado nas partes (c) e (d) da Figura 5.17, a alteração o raio do UCL apresenta o mesmo efeito verificado no estudo da carga da estrutura. O último pulso induzido tem valor que varia entre 107 e 511 A e a componente contínua atinge valores entre 13 e 62 A.

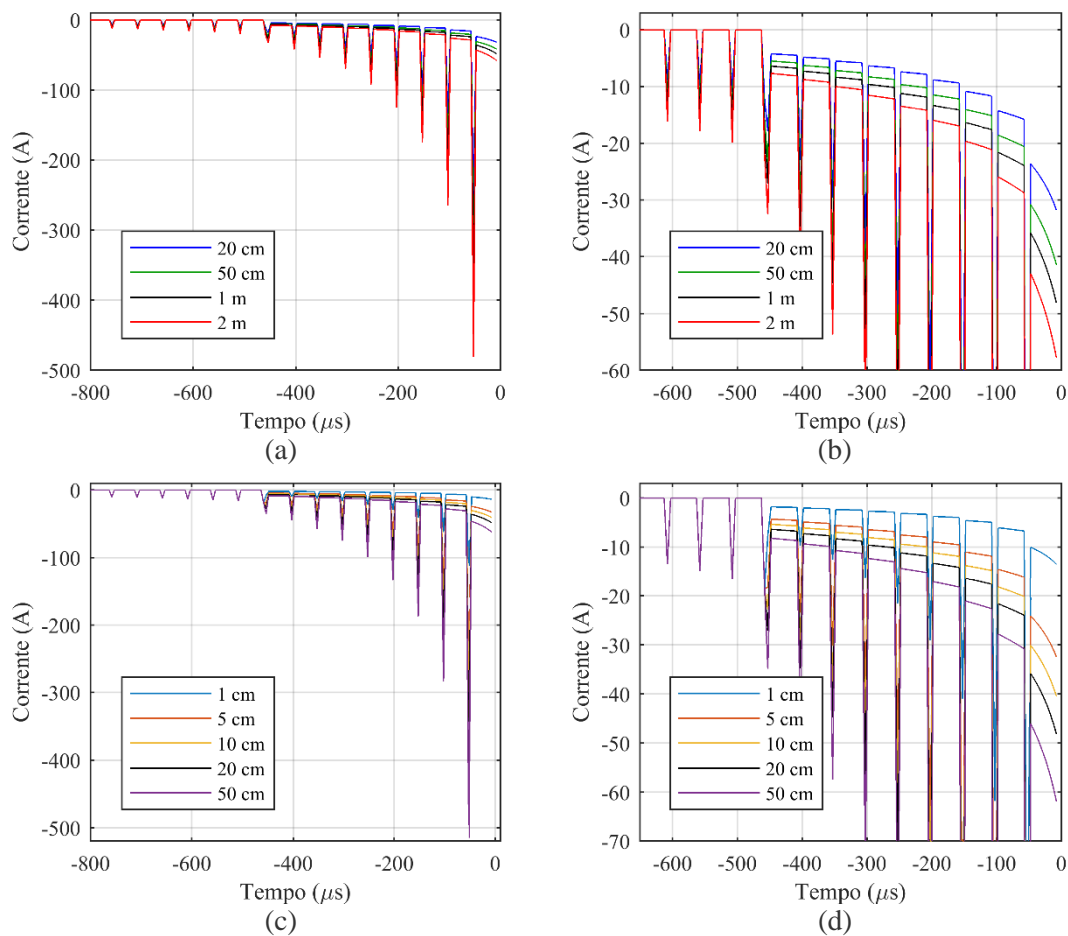


Figura 5.17 - Corrente elétrica na torre para variações do raio do DNL (a) e (b) e do UCL (c) e (d).

Calculou-se o valor da carga total transferida para o solo para cada um dos casos considerados. Os resultados obtidos, mostrados na Tabela 5.3, confirmam uma dependência relativamente considerável do raio do canal descendente, e praticamente nenhuma dependência do raio do canal ascendente. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato do canal descendente armazenar muito mais cargas no processo se comparado ao canal ascendente, como ilustrado na Figura 5.15 e na Figura 5.16. No caso

básico, a carga total transferida é de 6,11 C. Enquanto as variações percentuais obtidas na alteração do raio do UCL não excedem 0,2 %, a modificação do raio do DNL nas condições estabelecidas promove variações de até 22,9 %.

Tabela 5.3 – Carga total transferida para o solo.

Caso	Raio do canal descendente	Raio do canal ascendente	Carga (C)	Varição percentual em relação ao caso base
1 ¹	1 m	20 cm	6,105	--
2	20 cm	20 cm	4,705	-22,90 %
3	50 cm		5,567	-8,81 %
4	2 m		6,694	+8,80 %
5	1 m	1 cm	6,114	+0,15 %
6		5 cm	6,109	+0,07 %
7		10 cm	6,107	+0,03 %
8		50 cm	6,104	-0,02 %

¹ caso base

5.4.2 Efeito da altura da nuvem de tempestade

Foi verificado neste trabalho como o posicionamento vertical da nuvem de tempestade afeta as principais variáveis de estudo, para comparação com o caso básico apresentado na seção 5.3. A Figura 5.18 apresenta o diagrama de cada uma das situações avaliadas. Em todas elas, o ponto de iniciação do canal de descarga se dá no ponto máximo de campo elétrico dentro da nuvem, ou seja, 3,6 km, 5,0 km e 6,0 km, respectivamente para os casos (a), (b) e (c).

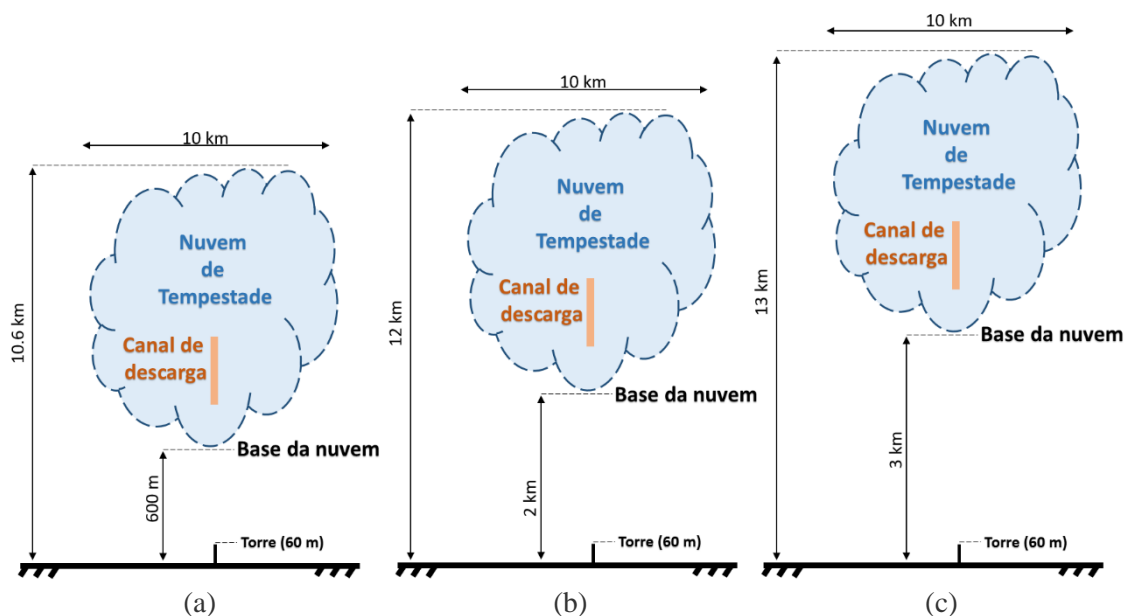


Figura 5.18 - Esquema de posicionamento da nuvem de tempestade em diferentes casos (a), (b) e (c) considerados.

Nesse conjunto de simulações, assim como na subseção anterior, foram verificados, no momento de iniciação do canal ascendente, o módulo do campo elétrico obtido a 50 m de distância da torre e a 1 m acima da torre. Em todos os casos, o início do UCL se dá quando o DNL se encontra a 190 m do solo e, portanto, 130 m da ponta da estrutura aterrada.

Um sumário com os resultados dessas simulações está apresentado na Tabela 5.4. A principal diferença ocasionada pela mudança da altura da nuvem de tempestade é notada na carga total transferida pela descarga. Considerando-se uma mesma nuvem, um canal de descarga de comprimento maior drenará mais cargas do solo na ocorrência da corrente de retorno. A maior variação observada ocorre na situação em que a nuvem é colocada a 600 m de altitude. Neste caso, a carga total transferida é igual a 4,73 C, e a diferença em relação à carga no caso base corresponde a 22,6 %.

Já os valores de campo elétrico medidos a 50 metros são pouco influenciados pela altura da nuvem, com variações observadas entre 1,3 % e 3,3 %. Uma alteração de ordem mais significativa pode ser observada para o campo elétrico a 1 m, no momento de início do canal ascendente. Neste caso, existe uma variação máxima de 9 % observada para o caso 2, em relação ao caso básico.

Tabela 5.4 - Resumo dos resultados obtidos ao se variar a altura da nuvem de tempestade.

Parâmetro	Caso base 2,4 km	Caso 2 600 m	Caso 3 2 km	Caso 4 3 km
Campo elétrico a 50 m (kV/m) (início do UCL)	67,0	64,0	66,1	68,3
Campo elétrico a 50 m (kV/m) (antes do <i>attachment</i>)	112,5	108,7	111,4	114,3
Campo elétrico a 1 m (kV/m) (início do UCL)	536,6	483,5	515,6	557,4
Carga total transferida	6,11 C	4,73 C	5,84 C	6,46 C

5.4.3 Considerações adicionais

Avaliada a sensibilidade das grandezas rastreadas ante a variação de alguns dos parâmetros geométricos de entrada, o código desenvolvido pode ser empregado para o estudo de diversos casos utilizando as estruturas implementadas.

Os resultados obtidos para o caso básico são consistentes com dados de registros reais obtidos na literatura [Guimarães, 2017; Visacro et al., 2017a-2018]. Os parâmetros de raio dos canais de descarga e altura da nuvem utilizados no caso básico são mantidos para todas as simulações adiante neste trabalho.

5.5 Estimativa do quociente da amplitude dos campos elétricos acima da estrutura e ao nível do solo a 50 m desta (R_E)

O processo de iniciação e evolução do canal ascendente é governado pelo campo elétrico acima do topo da estrutura aterrada. A determinação do valor limiar deste campo requerido para o início da propagação do UCL por meios experimentais é uma tarefa extremamente complexa e aparentemente inviável.

Recentemente, Guimarães et al. [2018] apresentaram, pela primeira vez na literatura, campos elétricos ao nível do solo registrados na iniciação do UCL, a 50 m da torre de MCS. De acordo com os resultados experimentais, a média geométrica e o desvio padrão do limiar de campo nessa situação são, respectivamente, para o valor total de campo, 64,2 kV/m e 4,8 kV/m, e, apenas para a parcela de variação rápida do campo, 63 kV/m e 8,4 kV/m. A disponibilidade deste dado, em adição ao conhecimento do quociente R_E , possibilita estimar-se o limiar de campo sobre a estrutura associado à iniciação do UCL.

Utilizando o modelo computacional desenvolvido, nesta seção, avalia-se tal quociente, considerando-se estruturas de 10 e 60 m posicionadas sobre um solo plano, correspondentes a um poste de sistema de distribuição e à torre de MCS, respectivamente [Arcanjo et al., 2018b].

5.5.1 Campo elétrico sem considerar a presença do canal ascendente

A Figura 5.19a mostra o campo elétrico calculado acima do topo de ambas estruturas (valor médio ao longo de um elemento vertical de 10 cm de comprimento) em função da altura da ponta do DNL em relação ao solo, enquanto o *leader* se aproxima da estrutura aterrada. As posições (alturas) da ponta do DNL correspondentes ao limiar de 530 kV/m, presumivelmente associadas ao início do início do *leader* positivo ascendente, são indicadas por marcadores na Figura 5.19b.

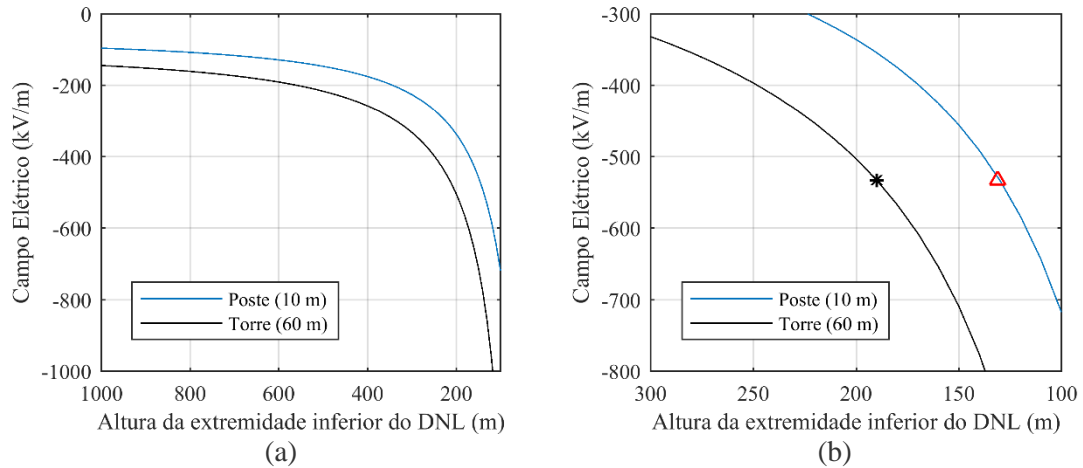


Figura 5.19 - Campo elétrico 1 m acima das estruturas aterradas para uma ampla (a) e curta (b) variação da altura da extremidade inferior do DNL.

Analisando-se as alturas do canal descendente, para o limiar de 530 kV/m , observa-se que o campo atinge tal valor quando a extremidade do DNL está a 130 m de altura, no caso do poste, enquanto que, para a torre, este valor é igual a 190 m . Dessa forma, a existência de um canal ascendente ocorreria primeiramente numa torre de 60 m , como esperado.

Nas mesmas simulações apresentadas acima, calcula-se o campo elétrico próximo, cujo perfil é exibido na Figura 5.20. À direita (b), estão marcados os valores de campo elétrico nos instantes em que o DNL está respectivamente em 190 e 130 metros de altura, nos casos da torre e do poste.

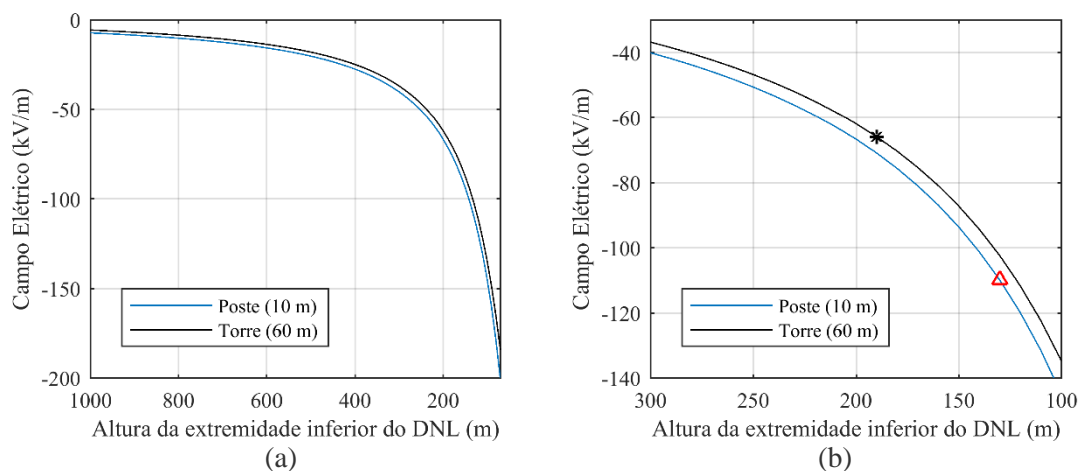


Figura 5.20 - Campo elétrico ao nível do solo para uma ampla (a) e curta (b) variação da altura da extremidade inferior do DNL.

Como observado na Figura 5.19, o campo elétrico acima das duas estruturas apresenta valores bem distintos para uma mesma altura do DNL. Por outro lado, como mostra a Figura 5.20, a diferença entre os campos elétricos calculados ao nível do solo é muito pequena. Tais resultados estão associados às diferentes distâncias entre a extremidade do DNL e o ponto de cálculo de campo acima das duas estruturas e à distância semelhante no cálculo do campo no solo a 50 m das estruturas. Quando o campo acima das estruturas atinge o limiar de 530 kV/m, o campo elétrico no solo vale 67 kV/m para a torre e de 110 kV/m para o poste, em decorrência de maior aproximação do DNL no segundo caso.

A distância da extremidade do DNL ao topo da estrutura aterrada na iniciação do canal ascendente é designada *striking distance* (SD), segundo o conceito definido por Golde [1945]. Os valores estimados de SD para as duas estruturas analisadas são 120 m para o poste e 130 m para a torre, considerando o início do UCL no instante em que o campo elétrico acima da torre ultrapassa o limiar de 530 kV/m. Espera-se que tal distância seja maior à medida em que se aumenta a altura da estrutura em consideração, como verificado na simulação realizada.

5.5.2 Determinação de R_E

A Figura 5.21 apresenta o valor do quociente R_E para os casos da torre (a) e do poste (b), ao longo de uma faixa estreita de valores da altura do canal descendente, presumível para a iniciação do UCL. Nota-se que a alteração dos valores do quociente de campo elétrico nessa faixa é praticamente insignificante, variando de 4,85 a 4,95 para o poste e de 8,0 a 8,2 para a torre. Essa variação representa, em ambos os casos, apenas 2% da média do valor encontrado.

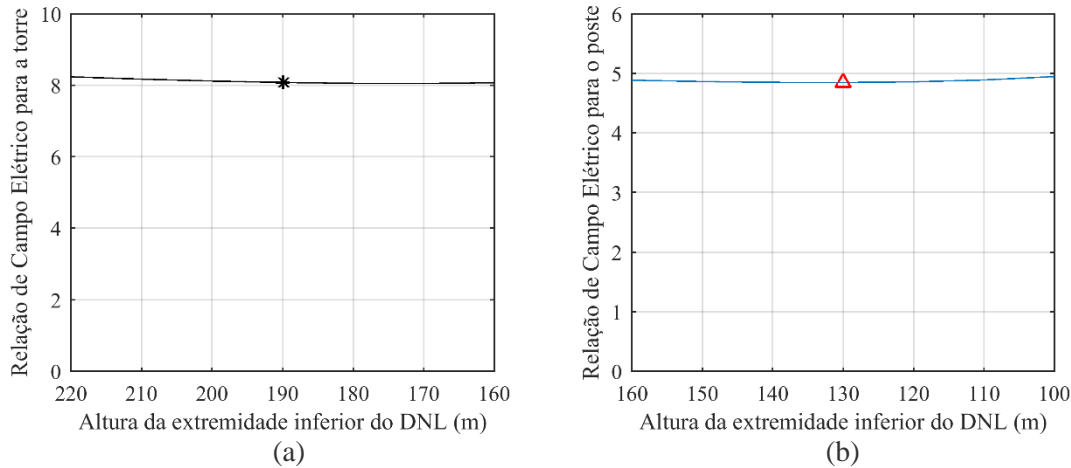


Figura 5.21 - Razão de campo elétrico para a torre (a) e para o poste (b).

Os valores obtidos na comparação realizada para o poste e a torre na iniciação do UCL estão resumidos na Tabela 5.5. A razão de campo elétrico observada é de 4,85 para o poste e 8,05 para a torre, quase dobrando de valor, ao se considerar uma estrutura com altura seis vezes superior.

Tabela 5.5 - Resumo dos resultados de estimativas da razão de campo elétrico na iniciação do UCL

Estrutura	Altura do DNL	<i>Striking distance</i>	Campo elétrico 1 m acima da estrutura	Campo elétrico 50 m distante da estrutura	Quociente R_E
Poste (10 m)	130 m	120 m	533,5 kV/m	110 kV/m	4,85
Torre (60 m)	190 m	130 m	539,4 kV/m	67 kV/m	8,05

5.5.3 Resultados considerando a representação do canal ascendente

A última etapa de simulação realizada nesse caso considerou a incorporação do canal ascendente a partir dos pontos determinados na subseção anterior. Todos os parâmetros da simulação, geométricos e dinâmicos, permanecem os mesmos do caso básico e o mérito em análise desta subseção é a comparação dos resultados obtidos para as diferentes estruturas aterradas.

A Figura 5.22a mostra o perfil do campo elétrico próximo, para as duas situações em análise, em uma janela de 10 milissegundos. O instante de *attachment* de ambos os casos foi colocado em $t = 0$. Como o *attachment* acontece em alturas diferentes, um mesmo instante de tempo corresponde a diferentes alturas da extremidade do DNL de cada canal.

A Figura 5.22b mostra um detalhe do perfil de campo elétrico, indicando um valor máximo de $112,5 \text{ kV/m}$ para a torre e $218,2 \text{ kV/m}$ para o poste. Esses valores são bem inferiores aos valores máximos observados na situação em que não se considera a presença do UCL (respectivamente $184,2 \text{ kV/m}$ e 355 kV/m).

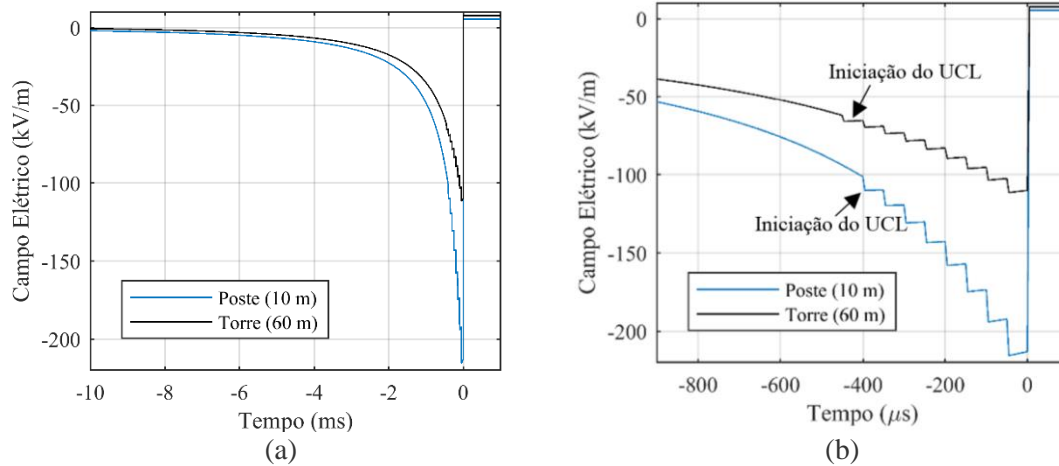


Figura 5.22 - Campo elétrico próximo para a torre e o poste considerando a presença do UCL. Janela de 10 ms (a) e de $900 \mu\text{s}$ (b).

Tendo em vista o tempo de duração da evolução dos canais ascendentes, é possível calcular seu comprimento. Nos casos em análise, o UCL da torre atinge um comprimento máximo de 45 metros antes do passo final para o *attachment*, praticamente o mesmo valor apresentado para o UCL do poste, que é igual a 40 metros.

Calculando-se o campo elétrico 1 m acima da estrutura antes do início do UCL e 1 m à sua frente após seu surgimento, obtém-se o perfil ilustrado na Figura 5.23. Note que não há consistência na comparação das amplitudes de campo num mesmo instante de tempo. Como as extremidades inferiores dos DNLs não estão à uma mesma altura em um mesmo instante de tempo, o valor de campo elétrico no poste supera, em módulo, o valor do campo na torre, um pouco após o surgimento do canal ascendente. Assim como ressaltado anteriormente, antes do início do canal ascendente, o módulo de campo elétrico para o caso do poste é sempre inferior aos valores observados para o caso da torre, já que o ponto de medição do primeiro caso se encontra mais próximo do nível do solo.

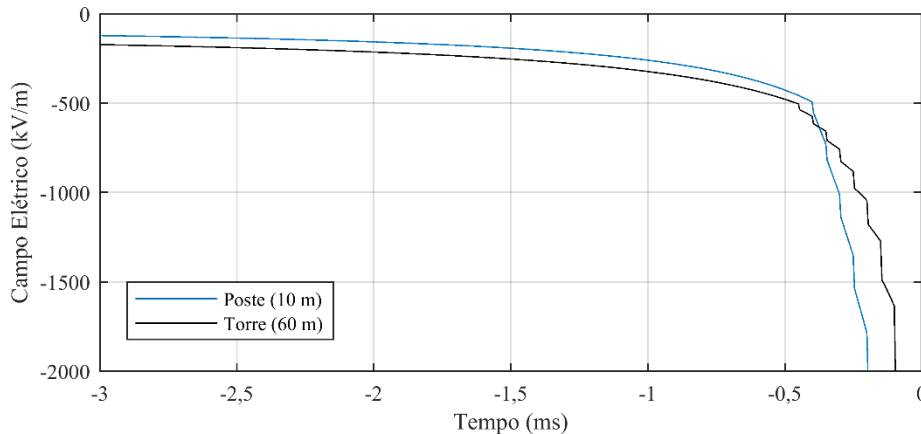


Figura 5.23 - Campo Elétrico a 1 m da extremidade da torre e do poste, ao longo do tempo.

5.6 Evolução dos canais verticais na condição de relevo de MCS

Nas avaliações anteriores, buscou-se determinar o comportamento das grandezas elétricas durante a propagação do *leader* bipolar vertical em direção ao solo plano condutor. Definiram-se os parâmetros geométricos do sistema a simular, a partir das análises de sensibilidade desenvolvidas.

O código computacional permite a representação de relevos genéricos do solo. Nesta seção, introduz-se a condição de relevo de MCS nas simulações.

5.6.1 Características do relevo da Estação Morro do Cachimbo

A representação do relevo nas proximidades de MCS foi discutida na seção 3.5, incluindo a disposição geométrica das cargas e a variação da densidade e profundidade destas à medida que se afasta da torre.

O posicionamento dos componentes utilizados para a simulação contemplando o solo de MCS é mostrado na Figura 5.24. Nessa configuração, a base da nuvem de tempestade continua a 2,4 km de altitude. A base da torre está sobre o topo do morro, a uma altitude aproximada de 1,4 km. Como a estrutura possui 60 metros, o ponto extremo de seu topo está posicionado a 1461 metros do nível do mar.

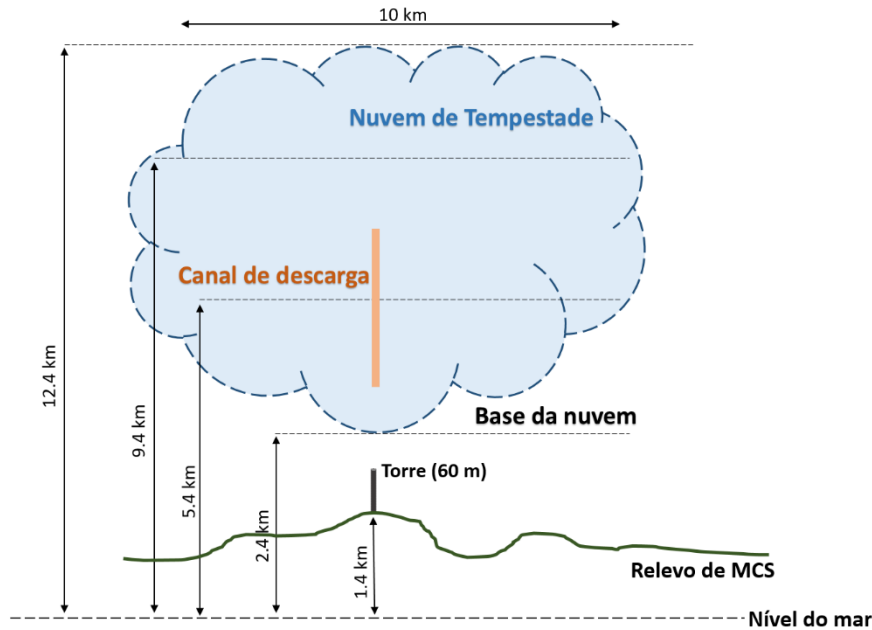


Figura 5.24 - Esquema de posicionamento das estruturas simuladas na consideração do relevo de MCS.

As simulações realizadas consideram o início do *leader* flutuante vertical a 5,4 km de altitude e a propagação deste com velocidade média de $0,2 \text{ m}/\mu\text{s}$ em cada direção. O limiar de campo elétrico adotado para o início do canal ascendente foi de $530 \text{ kV}/\text{m}$. Os raios de 1 m e 20 cm foram assumidos respectivamente para os canais descendente e ascendente, repetindo as condições do caso base.

5.6.2 Resultados

A distribuição vertical de potencial e campo elétrico antes da iniciação do *leader* bipolar é mostrada na Figura 5.25. Nota-se que o formato da curva de distribuição do potencial de fundo, mostrado em (a), tem alguma similaridade com aquele obtido para o caso do solo plano. Entretanto, para a mesma altitude, os valores de potencial são inferiores no primeiro caso. O campo elétrico vertical (b) indica o valor máximo de campo elétrico a 5,4 km de altitude. Nesta altitude admite-se o ponto de iniciação do *leader* flutuante.

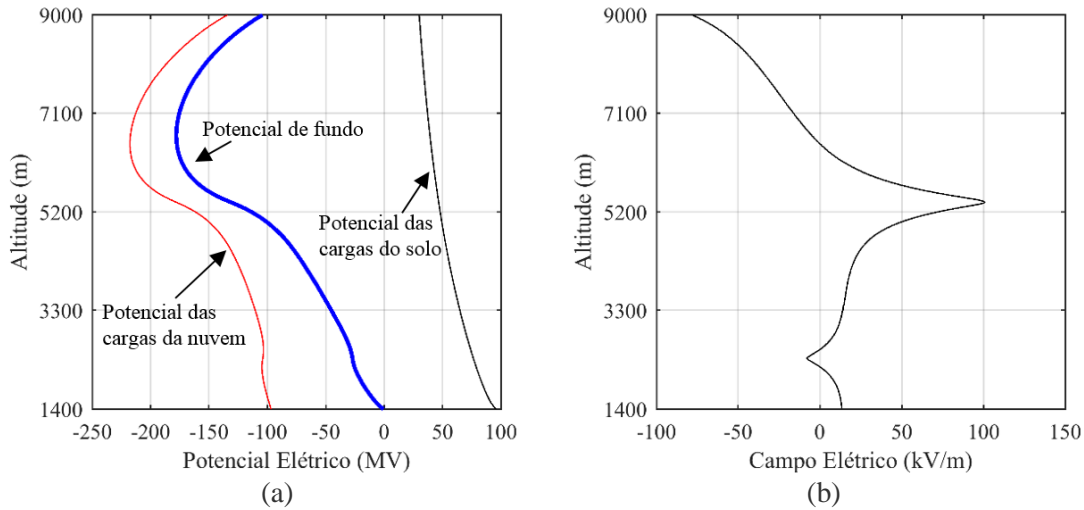


Figura 5.25 - Potencial elétrico vertical (a) e campo elétrico vertical (b) para o caso do solo de MCS.

A Figura 5.26 apresenta os resultados de campo elétrico ao nível do solo. Em (a), é mostrada uma janela de 15 ms para o campo obtido a 50 m de distância, e em (b), os 2,5 ms que antecedem o *attachment*. A Figura 5.27 (a) e (b) mostra as mesmas janelas de tempo para a forma de onda do campo calculado a 700 m de distância da torre instrumentada de MCS. Pode-se verificar que o campo elétrico atinge valores máximos de 99,3 e 10,8 kV/m, para 50 e 700 m, respectivamente, enquanto na iniciação do canal ascendente, esses valores são iguais a 63,9 e 10,1 kV/m.

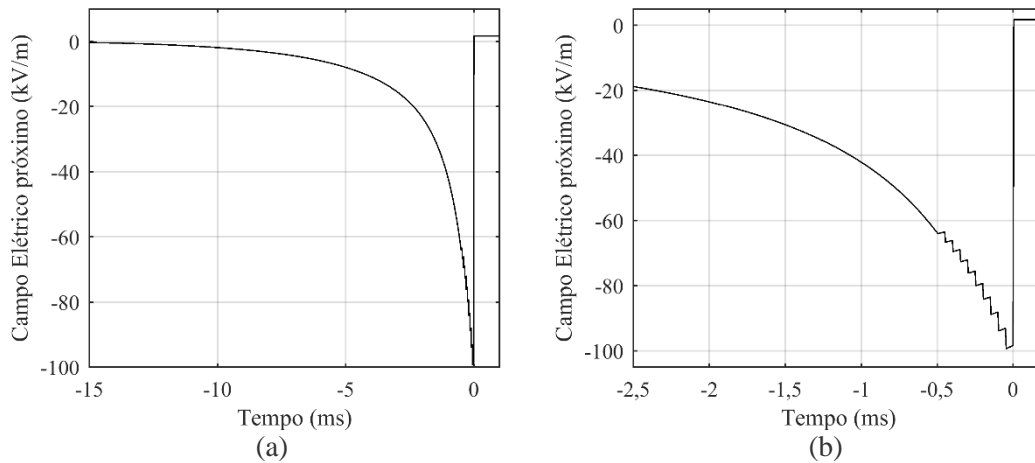


Figura 5.26 - Campo elétrico a 50 m de distância da torre de MCS. Janela de 15 ms (a) 2,5 us (b).

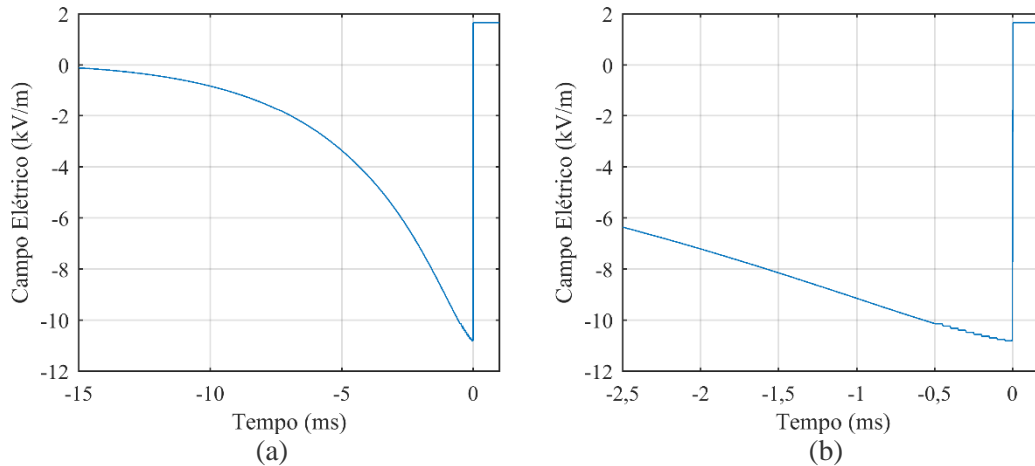


Figura 5.27 - Campo elétrico a 700 m de distância da torre de MCS. Janela de 15 ms (a) 2,5 μ s (b).

O campo elétrico acima da torre, nos 2,5 ms finais antes do *attachment*, é mostrado na Figura 5.28. Embora o campo adotado para o início do canal ascendente nos casos anteriores tenha sido de 530 kV/m , na simulação desta seção, este atinge um valor de 542,3 kV/m , devido aos passos implementados. Se comparado ao perfil obtido para o solo plano, uma diferença notável do campo elétrico alguns ms antes do *attachment* é percebida: enquanto no caso do solo plano o campo tem amplitude em torno de 188,2 kV/m em $t = -2,5 ms$, esse valor aumenta para 265,5 kV/m no caso do relevo de MCS, um aumento de 41 % comparado ao caso básico. Portanto, a elevação de altura da estrutura aterrada combinada à mudança do perfil de solo aumenta o campo elétrico em sua extremidade.

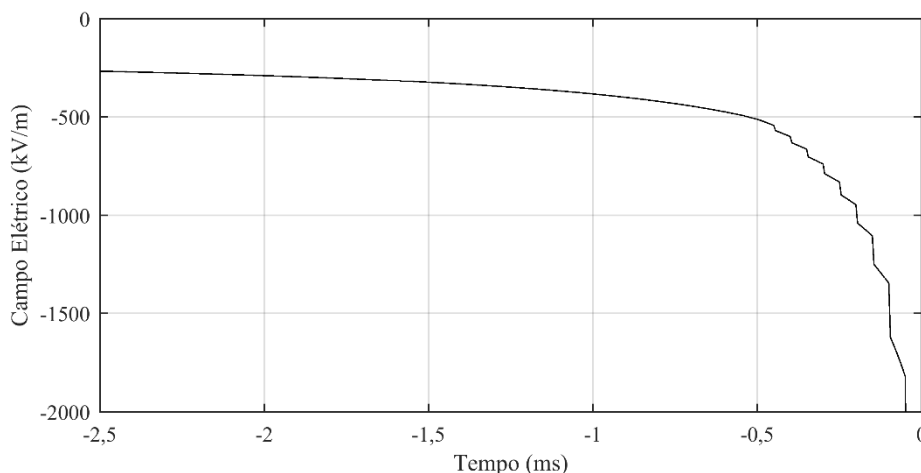


Figura 5.28 - Campo Elétrico 1 m acima da torre.

Dos valores calculados, determina-se, no início do UCL, o quociente R_E entre os valores de campo elétrico a 1 m acima da torre e no solo, a 50 m desta. Tal valor, igual a

8,49, é 5,5 % maior que aquele obtido para o caso do solo plano (8,05). O aumento dessa relação indica o aumento da atratividade de estruturas instaladas em elevações.

A Figura 5.29 exibe as curvas de carga acumulada no *leader* descendente (a) e no conjunto torre e canal ascendente (b), quando da existência deste canal. No último passo, o DNL possui uma carga negativa igual a 1,6 C, enquanto a torre e o UCL possuem uma carga positiva de 16,6 mC.

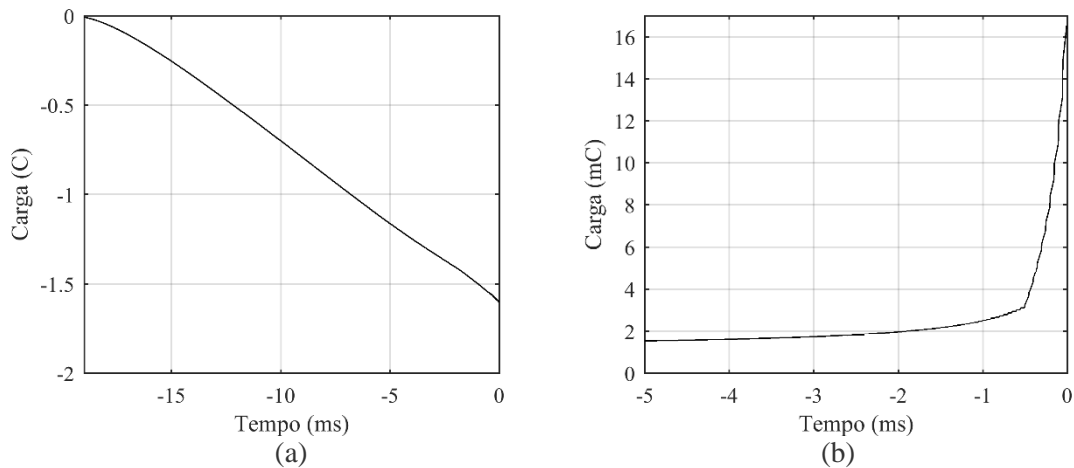


Figura 5.29 - Carga Elétrica armazenada no DNL (a) e no conjunto Torre+UCL (b).

A corrente elétrica média na torre, estimada na fase anterior à corrente de retorno, é mostrada na Figura 5.30. Os passos do canal descendente são espaçados de 50 μ s. Após o início do canal ascendente, em $t = -490 \mu$ s, a corrente elétrica parte de 9 A e apresenta um crescimento similar a uma curva exponencial, até atingir o valor de 40,5 A. Os pulsos induzidos na torre, superpostos à componente contínua de corrente, apresentam valores crescentes à medida em que o DNL se aproxima da torre, alcançando um máximo de 352,5 A.

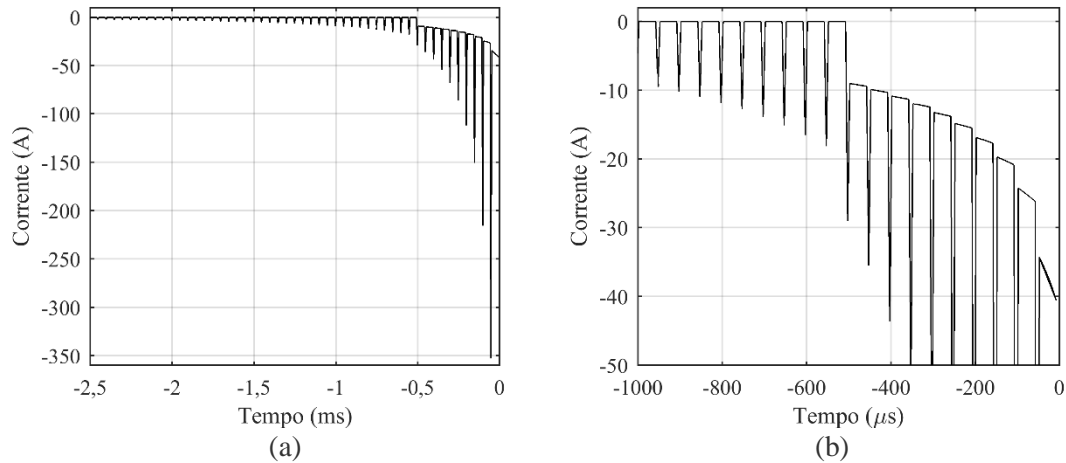


Figura 5.30 - Corrente elétrica que flui pela torre. Janela de 2,5 ms (a) de 1000 μs (b) antes do *attachment*.

A simulação da condição descrita nesta seção resultou em uma carga total transferida de 5,51 C contra 6,11 C no caso básico. O fator possivelmente mais relevante para explicar essa diminuição da carga total transferida é a diminuição do tamanho do canal de descarga, em consequência da elevação da estrutura.

A Tabela 5.6 apresenta uma comparação dos valores de diversas grandezas em análise, considerando o caso básico e o caso que contempla o relevo de MCS. Os campos elétricos obtidos mostram-se consistentes com o observado em MCS [Guimarães et al., 2018]. É importante salientar novamente que as análises desenvolvidas nesta seção fixaram o início do canal ascendente no instante em que o campo acima da torre supera o limiar de 530 kV/m.

O valor da componente contínua de corrente observado após o início do UCL sofre um aumento de 40%, de aproximadamente 6,4 para 9 A. Entretanto, a componente contínua no último passo não apresenta variação tão acentuada (48,1 e 40,5 A), bem como o valor observado para os pulsos induzidos na torre. Em ambos os casos simulados, o UCL possui o mesmo comprimento no fim da simulação.

Tabela 5.6 - Comparação dos resultados do caso base (solo plano) e do relevo de MCS

Parâmetro	Caso base	Caso com relevo de MCS	Variação percentual
Campo elétrico a 50 m (início do UCL)	67,0 kV/m	63,9 kV/m	-4,6 %
Campo elétrico a 50 m (valor máximo)	112,5 kV/m	99,3 kV/m	-11,7 %
Campo elétrico a 1 m (início do UCL)	536,6 kV/m	542,3 kV/m	+1,1 %
Quociente R_E no início do UCL	8,05	8,49	+5,5 %
Carga negativa armazenada no DNL no último passo	1,86 C	1,60 C	-14,0 %
Carga armazenada no conjunto torre + UCL no último passo	13,8 mC	16,6 mC	+20,3 %
Valor da componente contínua de corrente logo após o surgimento do UCL	6,4 A	9,0 A	+40,6 %
Valor da componente contínua de corrente no último passo	48,1 A	40,5 A	-15,8 %
Valor do maior pulso induzido de corrente registrado	400,1 A	352,8 A	-11,8 %
Carga total transferida	6,11 C	5,51 C	-9,8 %

5.6.3 Considerações adicionais sobre o cômputo do relevo no modelo computacional

A representação do relevo no modelo aumenta consideravelmente o tempo total da simulação, uma vez que a matriz de coeficientes de potencial incorpora todos os pontos de carga do solo. Na utilização do método das imagens, essa matriz possui aproximadamente $7 * 10^7$ elementos, enquanto na incorporação do relevo na simulação a matriz possui cerca de $2 * 10^8$ elementos. O tempo de simulação médio para todas as condições geométricas possíveis na simulação de um caso completo de solo plano (em torno de 600 iterações) é de 5 horas, enquanto no caso do solo real (por volta de 500 iterações), esse valor aumenta para 15 horas.

Contudo, considera-se válido o investimento em tal custo computacional, pois possibilita ao modelo processar condições mais próximas da realidade, que admitem a representação de qualquer relevo.

5.7 Simulação das condições de uma descarga real em MCS

O modelo computacional desenvolvido permite a representação das tortuosidades do canal de descarga e de sua velocidade real. Esta seção considera a aplicação do modelo nas condições de canal de uma descarga real, adotando-se as mesmas configurações para os demais elementos, como relevo do solo e nuvem, da seção anterior.

5.7.1 Características gerais do evento modelado

No dia 25 de fevereiro de 2015, houve intensa atividade atmosférica nos arredores da Estação do Morro do Cachimbo, registrada através da medição de campo elétrico. Às 20:16:49 GMT, ocorreu a incidência de uma descarga com duas correntes de retorno na torre. O evento foi filmado pela câmera ultrarrápida e registrado pelos sistemas de medição de corrente, campo elétrico e luminosidade de MCS.

Dois quadros específicos do vídeo obtidos pela câmera ultrarrápida para este evento estão mostrados na Figura 5.31, um antes e outro após o *attachment*. Na primeira imagem, é possível observar que o canal de descarga apresenta duas ramificações, sendo a ramificação da direita responsável pelo fechamento do canal de descarga. O evento apresentou uma amplitude de corrente de retorno igual a $20,24 \text{ kA}$, valor relativamente baixo se comparado a outras incidências em MCS. Contudo, a carga transferida, de $5,88 \text{ C}$, tem valor relativamente próximo ao da mediana dos registros obtidos em MCS, que é igual a $6,2 \text{ C}$.

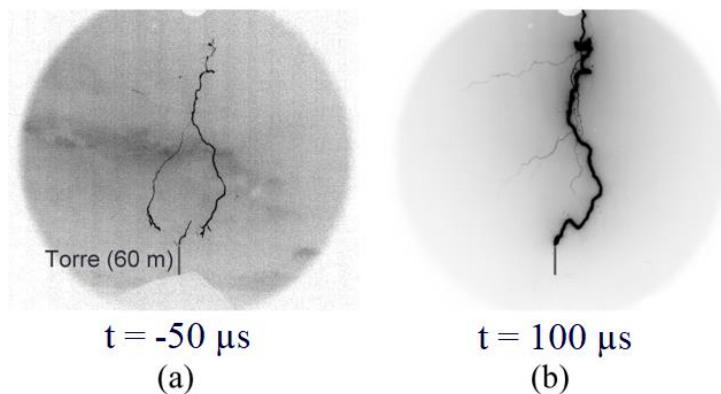


Figura 5.31 - Imagens dos canais estabelecidos no evento antes (a) e após (b) o *attachment*. Adaptado de [Guimarães, 2017].

A Figura 5.32 mostra o perfil de corrente elétrica registrado antes do *attachment*, juntamente com perfil de campo elétrico a 50 m (a) e a 700 m (b) da torre. Nota-se as características típicas discutidas na seção 2.3: pulsos unipolares induzidos pelos passos do canal descendente, superpostos a uma componente contínua que se intensifica nas últimas centenas de microssegundos que antecedem o início da descarga de retorno.

As curvas de campo elétrico exibem claramente o efeito da aproximação do canal descendente negativo do solo, discutido na seção 2.4. Os valores medidos a 700 m são inferiores, já que o canal está mais próximo da torre de MCS. O valor máximo observado

pelo sistema principal foi de 85 kV/m , enquanto os níveis não ultrapassaram $13,4 \text{ kV/m}$ na área secundária de MCS, a 700 m , junto ao abrigo da câmara. A intensidade de campo elétrico próximo à torre no instante de iniciação do canal ascendente mostrou-se próxima de 65 kV/m . Se for considerada a variação de campo elétrico registrada em MCS, ou seja, o campo elétrico devido ao efeito apenas da aproximação do canal negativo, os valores máximo e na iniciação do UCL caem, respectivamente, para 77 kV/m e 57 kV/m . A partir das gravações de vídeo, determinou-se a velocidade média do canal descendente nos instantes finais e do canal ascendente, respectivamente iguais a $0,24 \text{ m}/\mu\text{s}$ e $0,10 \text{ m}/\mu\text{s}$.

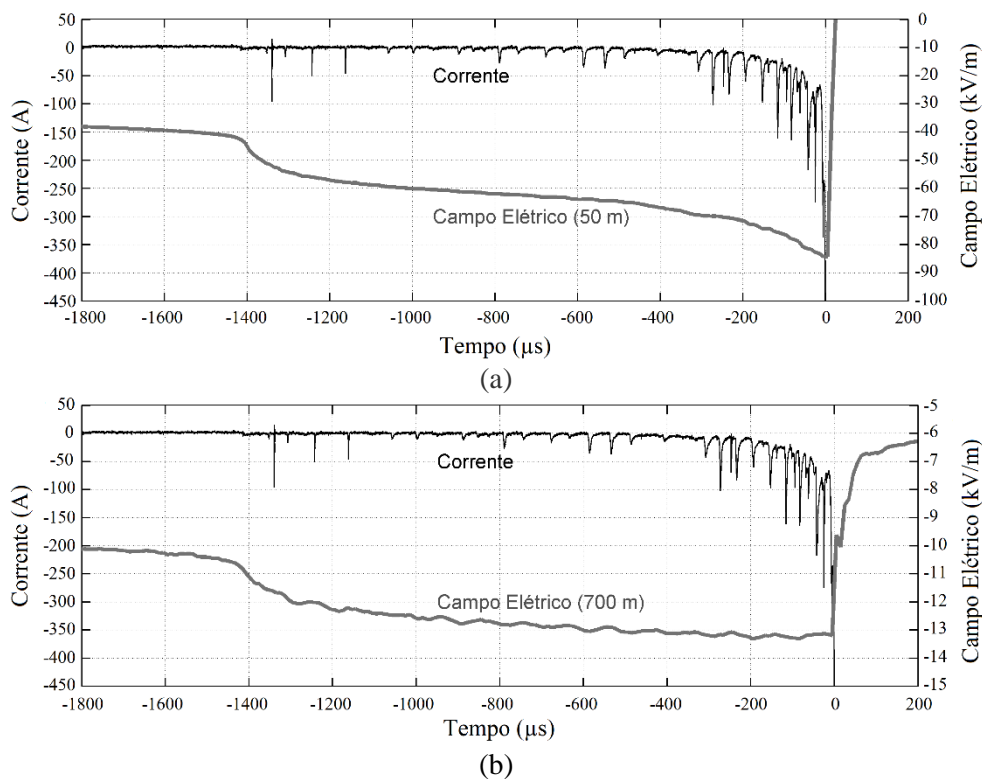


Figura 5.32 - Corrente e campo elétrico medido a (a) 50 m e (b) 700 m de distância da torre de MCS para o evento. Adaptado de [Guimarães, 2017].

5.7.2 Implementação da representação do canal

A Figura 5.33 ilustra a forma do canal de descarga utilizado no modelo (a) e o último quadro antes do *attachment* registrado pela câmara de MCS (b).

A implementação do canal descendente no modelo considerou um mapeamento dos pontos iniciais e finais do DNL em cada quadro registrado pela câmara e adotou sua velocidade média real (e não o valor médio de $0,24 \text{ m}/\mu\text{s}$) a cada prolongamento com passos de $50 \mu\text{s}$. No caso do canal ascendente, foi adotada a velocidade média do canal

($0,10 \text{ m}/\mu\text{s}$) em todos os prolongamentos em passos de $5 \mu\text{s}$. Como a câmera só fornece uma perspectiva bidimensional do evento, na representação da propagação do canal, as duas ramificações foram colocadas no mesmo plano, juntamente com a torre instrumentada.

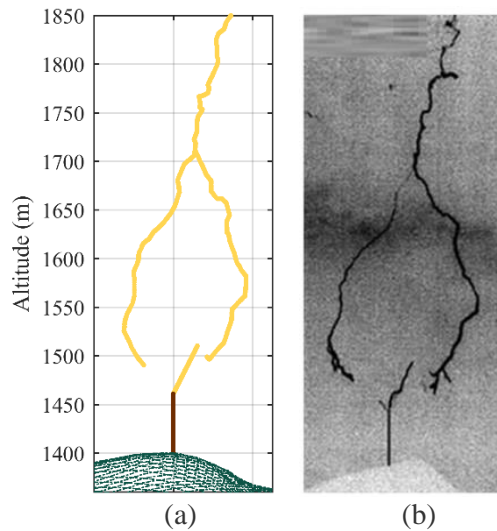


Figura 5.33 - Formato da descarga implementado no modelo (a) e correspondente ao evento real (b).

Embora os quadros correspondentes a este evento tenham sido obtidos a cada $50 \mu\text{s}$, no modelo implementado, após a ramificação do DNL (que ocorre quando sua extremidade está a 1700 m de altitude), optou-se por realizar uma propagação alternada dos ramos do canal, ou seja, a cada $25 \mu\text{s}$ ocorre o aumento do comprimento de uma das ramificações. Após o aumento da taxa de aquisição do sistema de vídeo em MCS, de 20.000 FPS para 40.000 FPS , confirmou-se que, nas descargas negativa nuvem-solo medidas, os passos correspondentes à extensão das ramificações do canal de descarga não se desenvolvem simultaneamente. A adoção de prolongamentos alternados das ramificações na simulação objetiva uma aproximação dessa característica.

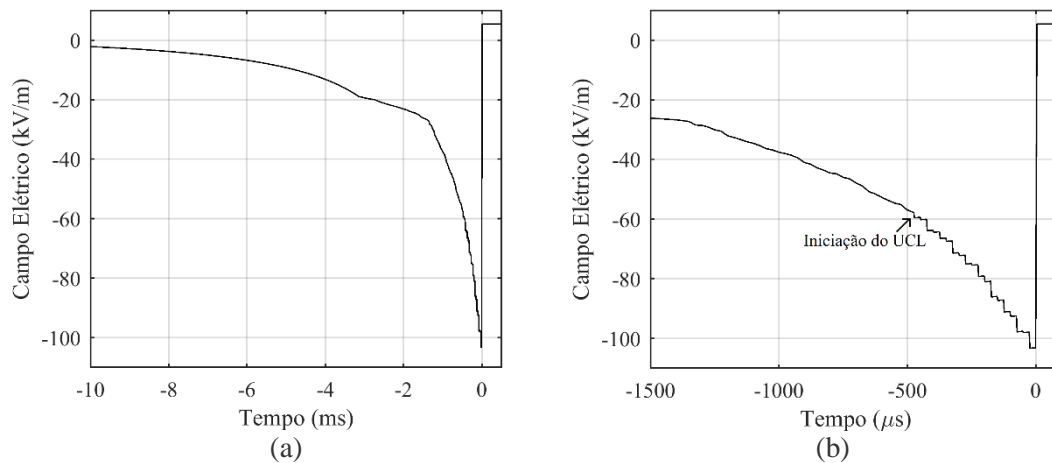
Adota-se a mesma dinâmica do surgimento do canal ascendente da seção 4.3. Vale ressaltar que, no intervalo entre passos consecutivos do canal descendente, ocorrem vários prolongamentos do canal ascendente. O formato utilizado para o canal ascendente é de uma reta inclinada e seu ponto final também foi extraído do quadro do vídeo correspondente a $-50 \mu\text{s}$.

5.7.3 Resultados

A Figura 5.34 apresenta o campo elétrico ao nível do solo, determinado em pontos a 50 e 700 metros de distância da torre de MCS. Em (a) são mostrados os 10 ms que antecedem o *attachment*. Pode-se perceber que, em -3 ms, ocorre uma mudança no formato de crescimento do campo elétrico. Este é justamente o instante em que o modelo passa a considerar a propagação do DNL observada no registro de vídeo, e não a propagação vertical com velocidade média de $0,2$ m/ μ s implementada anteriormente.

O perfil apresentado em (b) mostra maior similaridade com aqueles de eventos reais, inclusive o crescimento em degraus nas últimas centenas de microssegundos pode ser atribuído à contribuição dos prolongamentos dos diferentes ramos do canal descendente. O valor de campo calculado no solo na iniciação do UCL é igual a $59,5$ kV/m, contra 57 kV/m registrado em MCS. Já o valor máximo de campo é igual a $103,2$ kV/m, mais de 30 % maior que o valor registrado para o evento, 77 kV/m.

Em (c) e (d) são exibidos resultados de campo elétrico calculados a 700 m de distância da torre, no ponto do abrigo da câmera. Neste caso, o campo no início do UCL é igual a $13,3$ kV/m e o campo máximo calculado é de 14 kV/m, valores muito próximos aos $13,4$ kV/m registrados em MCS.



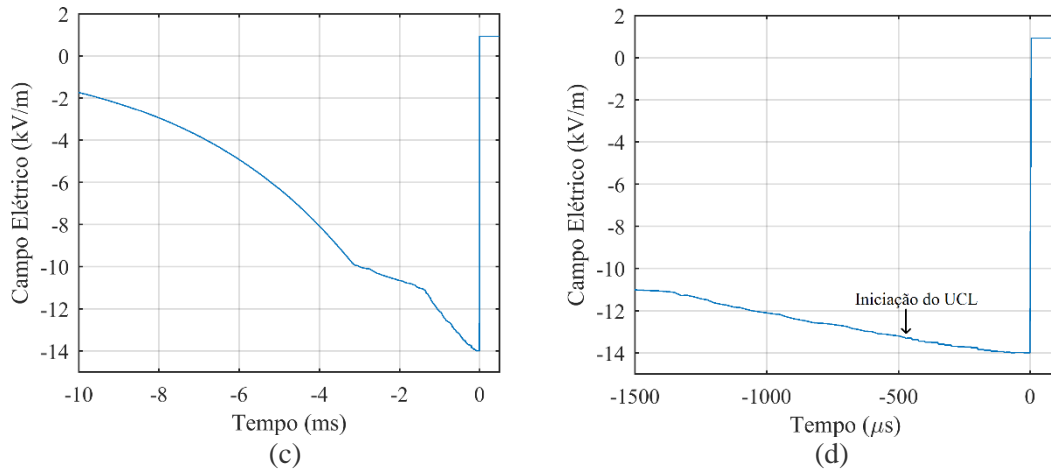


Figura 5.34 - Campo elétrico ao nível do solo de MCS, 50 m (a) e (b) e 700 m (c) e (d) de distância da torre.

A Figura 5.35 ilustra o campo elétrico acima da torre nos 10 ms antes do *attachment* (a) e nos 2,5 ms finais (b). Na implementação deste caso, o início do canal ascendente leva em conta o instante de tempo verificado para o evento real, e não o limiar de 530 kV/m estabelecido nos casos anteriores. Adotou-se um valor de 579,7 kV/m para o campo elétrico na iniciação do UCL, de acordo com o instante de tempo em que foi verificado o limiar de 4 A de corrente contínua no evento real [Visacro et al., 2017b]. Tal valor leva a um quociente R_E de 9,7, consideravelmente maior do que o obtido pela simulação com canal vertical da seção anterior (8,49).

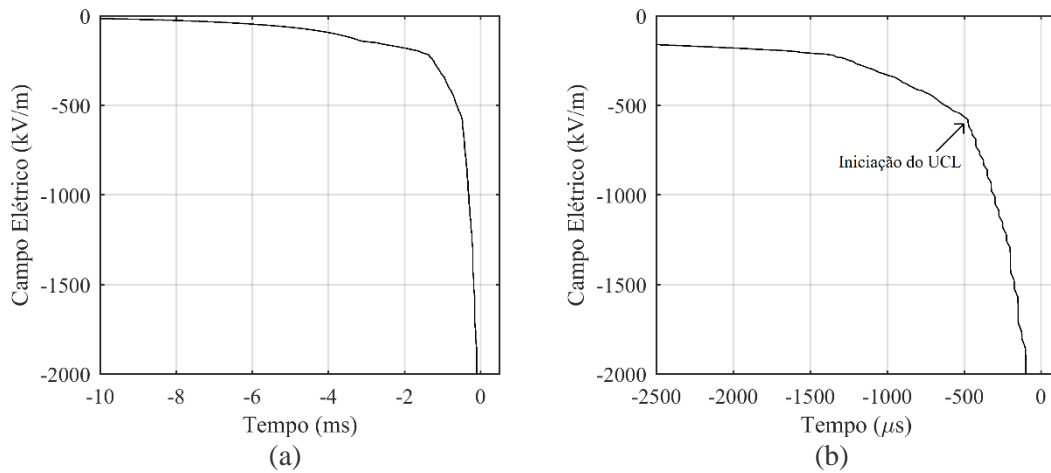


Figura 5.35 - Campo Elétrico 1 m acima da torre. Janela de 10 ms (a) e 2,5 ms (b).

A Figura 5.36a mostra a corrente elétrica na torre na fase inicial da descarga. Em $t = -1,35\text{ ms}$ o canal de descarga se divide e, a partir de então, ao invés de pulsos de corrente a cada 50 μs , são observados pulsos a cada 25 μs . Cada um dos pulsos intercalados corresponde a uma das ramificações se aproximando. Na Figura 5.36b o

perfil de corrente está ampliado, numa janela de $600 \mu\text{s}$. O início do canal ascendente ocorre em $t = -475 \mu\text{s}$ e, nesse instante, a componente contínua de corrente parte de $14,7 \text{ A}$. O comportamento da corrente contínua é compatível com aquele de eventos reais, e o valor desta corrente, de aproximadamente 50 A no penúltimo passo antes do attachment ($-50 \mu\text{s}$), tem a mesma ordem de grandeza daquela do evento real, como indica a Figura 5.32.

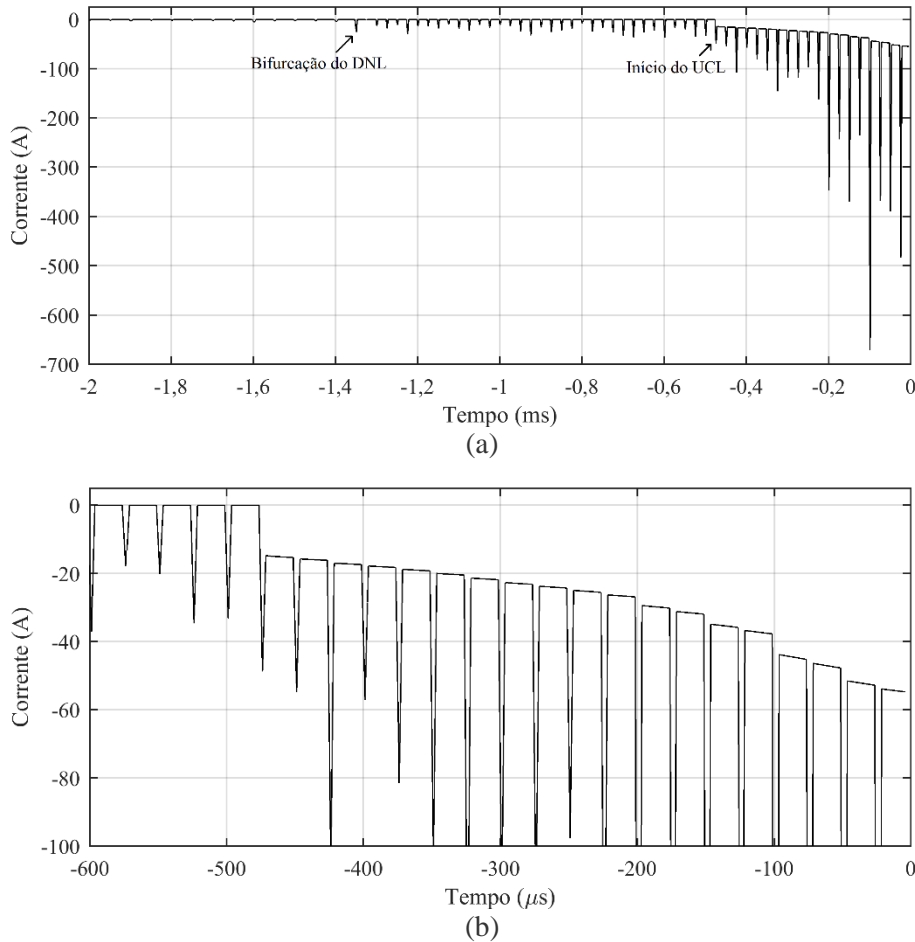


Figura 5.36 - Corrente elétrica que flui pela torre. Janela de 2 ms (a) de $600 \mu\text{s}$ (b) antes do *attachment*.

A carga total transferida pela corrente de retorno calculada é igual a $5,98 \text{ C}$, valor bem próximo ao total registrado em MCS ($5,88 \text{ C}$). O campo elétrico máximo no solo determinado pela aplicação do modelo ($103,2 \text{ kV/m}$) é bem superior àquele medido no evento real (77 kV/m). Aparentemente, tal resultado poderia ser parcialmente atribuído ao efeito da distribuição tridimensional do canal na descarga real. Esta hipótese ensejou o desenvolvimento de uma análise preliminar dos efeitos do deslocamento tridimensional do canal de descarga, apresentada no item seguinte.

5.7.4 Efeito da tridimensionalidade do canal: análise preliminar

Registros de vídeo de descargas atmosféricas realizados por uma única câmera não permitem identificar o trajeto tridimensional do canal de descarga. Para se avaliar preliminarmente o efeito desta característica, assumiu-se, nas avaliações desta seção, o afastamento de um dos ramos do canal de descarga simulado na seção anterior, segundo a direção ortogonal ao plano do vídeo.

Lu et al. [2015] mostram que a relação entre a velocidade tridimensional e bidimensional de uma descarga pode variar de 1 a 3 em pequenos intervalos de tempo, e possui um valor médio de 1,4. Na simulação desta seção, optou-se por realizar o deslocamento de um dos ramos do canal de descarga, com um ângulo de 45° em relação ao plano no vídeo, denominado ZY. A partir do momento de bifurcação do canal descendente, o ramo apresenta um afastamento no eixo invisível (X) igual ao seu deslocamento vertical, como mostra a Figura 5.37. Essa relação de deslocamento produz uma velocidade tridimensional para o ramo igual a $V_{3D} = \sqrt{2}V_{2D}$, condizente com as observações de *Lu et al.* [2015].

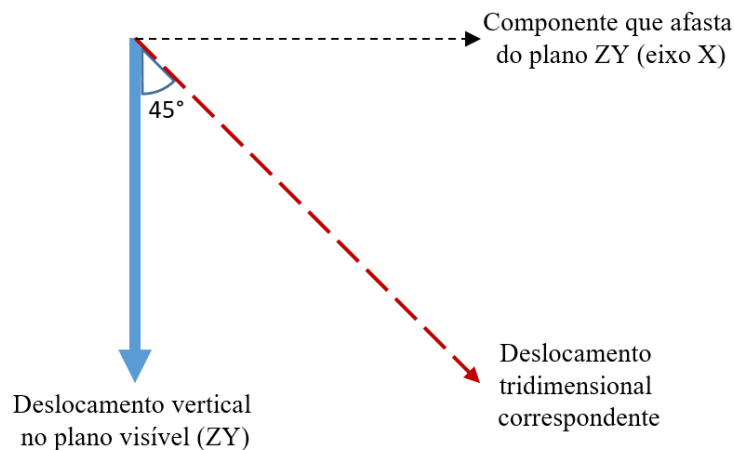


Figura 5.37 - Componente de afastamento do ramo do canal de descarga, considerando ângulo de 45° .

No registro de vídeo do evento, em sua fase final, o ramo que se supôs afastar-se da torre foi capaz de induzir a formação de um novo canal ascendente na torre, o que sugere uma aproximação deste ramo nesta fase. Assim, optou-se por interromper o afastamento, da extremidade do canal negativo quando este atingiu uma altura de 1550 m, mantendo-se o canal a uma distância de 200 m da torre (no eixo X). Nos instantes finais, reconduz-se o canal a uma aproximação da torre, com um trajeto com ângulo de -45° . Os cortes bidimensionais do canal descendente após tais modificações

são mostrados na Figura 5.38. Na figura, foi suprimida a visualização do solo e do canal ascendente para dar ênfase ao afastamento do ramo do DNL.

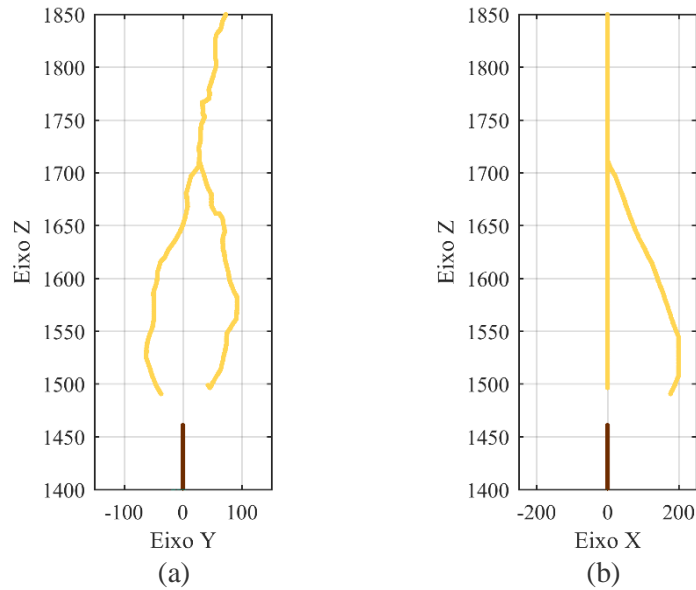
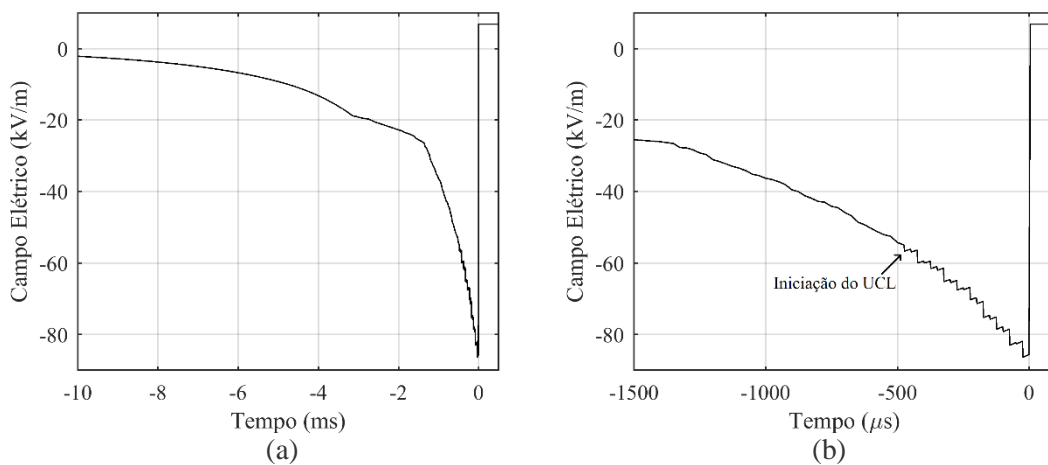


Figura 5.38 - Corte bidimensional para visualização do canal de descarga. Plano ZY (a) e plano ZX (b).

Após a implementação do novo trajeto do canal, as simulações foram realizadas novamente. A Figura 5.39 apresenta os perfis de campo elétrico a 50 m e a 700 m da torre. Como esperado, há redução no valor do campo elétrico no solo na iniciação do UCL para $56,6 \text{ kV/m}$ (contra o valor de $59,5 \text{ kV/m}$ da simulação com o canal bidimensional). Também houve redução o valor máximo atingido para $86,3 \text{ kV/m}$ (contra $103,2 \text{ kV/m}$). A 700 m, na figura mostrada em (c) e (d), os valores praticamente não se alteram, $12,8 \text{ kV/m}$ na iniciação do UCL e 13 kV/m no instante de valor máximo.



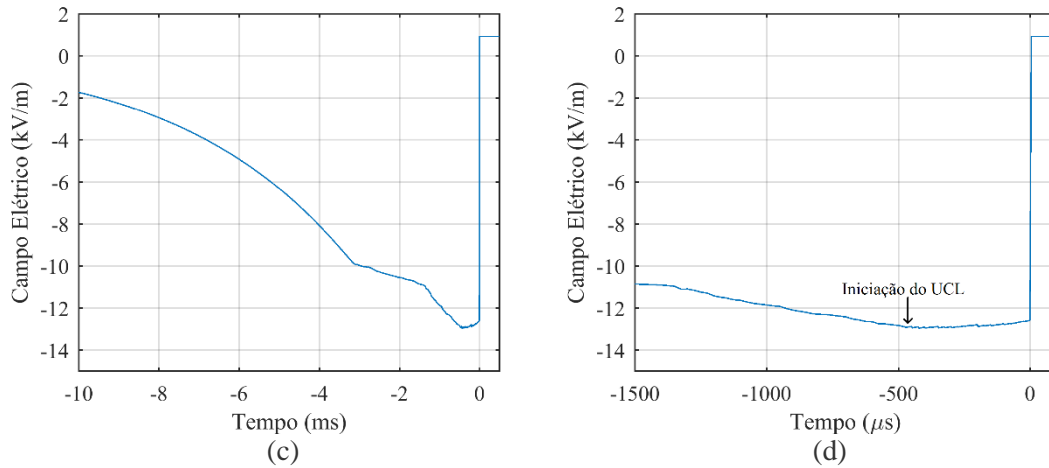


Figura 5.39 - Campo elétrico ao nível do solo de MCS, 50 m (a) e (b) e 700 m (c) e (d) de distância da torre.

A Figura 5.40 ilustra o campo elétrico obtido 1 m acima da torre. Assim como na simulação anterior, o UCL é iniciado de acordo com o instante em que se atinge o limiar de 4 A, sem considerar o limiar de campo elétrico estabelecido nas simulações das seções anteriores. Para este caso, o valor obtido na iniciação do UCL torna-se 510 kV/m, valor inferior àquele obtido na simulação do canal bidimensional (579,7 kV/m). O quociente R_E é também reduzido, alcançando um valor de 9,01, não muito diferente do valor obtido com o canal bidimensional, que é igual a 9,7.

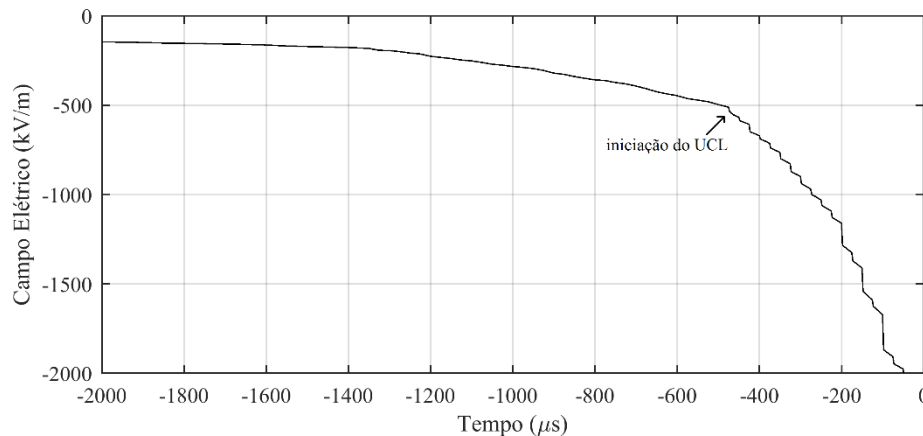


Figura 5.40 - Campo elétrico 1 m acima da torre.

O deslocamento de um dos ramos do canal de descarga para longe da torre sugere a diminuição do valor dos pulsos de corrente induzidos devido à propagação deste ramo. Tal característica foi observada nessa simulação e pode ser confirmada após uma análise da Figura 5.41, que contém os registros de corrente elétrica obtidos, colocados juntamente com a forma de onda de corrente na torre da simulação anterior, em uma janela de 600 μs.

Primeiramente, nota-se uma diminuição na amplitude da maioria dos pulsos, sobretudo daqueles associados ao canal deslocado. A componente de corrente contínua logo após o surgimento do UCL também apresenta valor inferior, igual a 8,8 A. O maior pulso registrado é de 654 A, e a corrente contínua atinge 53,6 A antes do *attachment*.

Medições recentes em MCS que usam maior resolução de tempo indicam significativa aceleração do canal ascendente nos instantes finais (nos últimos 200 μs). Presume-se que o aumento da velocidade associado resultaria no crescimento significativo da corrente contínua observada na torre.

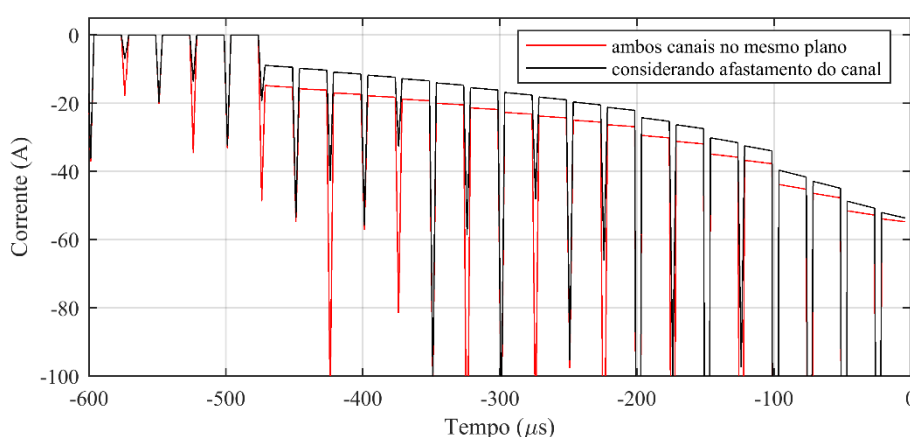


Figura 5.41 - Efeito do deslocamento tridimensional de uma das ramificações observado na corrente média na torre.

O deslocamento da ramificação aumenta o comprimento do canal de descarga e altera ligeiramente a carga total transferida, que passa a valer 6,22 C. Os resultados mais relevantes para esse caso estão resumidos na Tabela 5.7 e são comparados aos dados reais registrados em MCS. A análise desses resultados mostra que a aplicação do modelo computacional nesta condição reduziu as diferenças em relação aos valores obtidos na simulação anterior e se aproximou dos resultados medidos no evento real.

Tabela 5.7 - Comparação dos resultados da simulação com valores medidos em MCS

Parâmetro	Valor medido em MCS	Valor obtido em simulação	Variação percentual
Campo elétrico a 50 m (início do UCL)	57,0 kV/m	56,6 kV/m	-0,7 %
Campo elétrico a 50 m (máximo)	77,0 kV/m	86,3 kV/m	+12,1%
Campo elétrico a 700 m (máximo)	13,4 kV/m	13,0 kV/m	-3,0 %
Campo elétrico a 1 m (início do UCL)	--	510 kV/m	--
Quociente R_E no início do UCL	--	9,01	--
Carga total transferida	5,88 C	6,22 C	-5,8 %

5.8 Considerações finais

Neste capítulo, aplicou-se o modelo computacional desenvolvido para o monitoramento de diversas grandezas de interesse no desenvolvimento do canal de descarga nuvem-solo, notadamente o campo elétrico ao nível do solo e acima da estrutura aterrada, além da corrente elétrica que flui pela estrutura. Também foram verificadas distribuições de cargas nas estruturas do sistema e a carga total transferida pela corrente de retorno.

Primeiramente, representou-se um caso básico semelhante ao realizado por *Mazur e Ruhnke* [1998] e posteriormente implementado por *Louro* [2017], consistindo na incidência em um solo condutor plano, porém com a adição da torre instrumentada. Em seguida, desenvolveram-se análises de sensibilidade para definição de alguns parâmetros geométricos do sistema, verificando como tais parâmetros afetam as grandezas monitoradas na rotina computacional. Os casos seguintes buscaram aproximar as condições de aplicação do modelo de situações mais próximas da realidade, em particular, da Estação Morro do Cachimbo (MCS), sobretudo no que concerne ao relevo do solo local. Na sequência, incorporou-se a representação de uma descarga real registrada em MCS, inicialmente considerando um trajeto bidimensional do canal de descarga e o desenvolvimento intercalado das ramificações do mesmo. Finalmente, procedeu-se a uma avaliação preliminar do efeito da tridimensionalidade do canal de descarga.

Preliminarmente podem ser consideradas algumas observações das simulações realizadas, listadas a seguir:

- Com relação ao raio do canal descendente, este é responsável por variações máximas da ordem de 20% das grandezas avaliadas, em relação ao caso básico, notadamente, da carga total transferida e do campo elétrico próximo. De modo geral, o aumento deste raio possibilita maior acúmulo de cargas no canal, o que eleva os campos elétricos observados e a carga total transferida.

- O raio do canal ascendente apresenta influência muito menor no campo elétrico e praticamente nenhuma na carga total transferida. Todavia, trata-se de um parâmetro muito significativo na determinação da corrente contínua observada na estrutura aterrada e nos pulsos de corrente induzidos na torre, após sua formação.

- A altura do conjunto de cargas que representa a nuvem de tempestade pouco afeta os campos elétricos obtidos. Por outro lado, a carga transferida depende desse parâmetro, uma vez que essa altura é fator determinante na quantidade de cargas armazenadas ao longo do canal bipolar.

- No estudo de estruturas aterradas de diferentes alturas, nota-se que o campo elétrico acima dessas estruturas está diretamente relacionado com a proximidade que elas estão da extremidade do DNL, enquanto o campo elétrico a 50 metros de distância praticamente não se altera. O surgimento do canal ascendente é responsável por uma diminuição no valor de campo elétrico próximo, se comparado ao caso de sua inexistência.

- De modo geral, a inclusão da representação do relevo de MCS resultou no aumento do campo elétrico acima da estrutura aterrada, e também elevou o quociente entre esse campo elétrico e o campo próximo (R_E). Por outro lado, diminuiu a carga total transferida em relação ao caso base.

- A representação dos elementos geométricos relativos a uma descarga real incidente na torre de MCS possibilitou a comparação dos resultados obtidos da aplicação do modelo do modelo desenvolvido com resultados reais registrados, obtendo-se resultados qualitativos satisfatórios. Mesmo com a dificuldade de modelagem tridimensional do canal de descarga, verificou-se qualitativamente que o afastamento de um dos ramos do canal diminui o campo elétrico próximo. Quantitativamente, foram obtidos valores similares aos medidos.

- Especificamente, um resultado de maior interesse prático constitui no quociente dos valores de campo elétrico acima da estrutura aterrada e a 50 m de distância desta (R_E). O valor de R_E possibilita, através de uma medição real de campo elétrico ao nível do solo, a estimativa do valor de campo acima da estrutura aterrada. Considerando-se as simulações realizadas com a torre de 60 m, no caso do solo plano e canal bipolar vertical observou-se $R_E = 8,05$. Tal valor se eleva para 8,49 quando é considerado o mesmo tipo de canal vertical, mas na incidência na torre no topo do morro de MCS. As implementações que consideram o formato de uma descarga real de MCS, por sua vez, apresentaram valores de $R_E = 9,7$ para o caso do canal bidimensional, e $R_E = 9,01$ para o caso do canal tridimensional.

6 Conclusões

6.1 Conclusões gerais

Esta dissertação de mestrado apresentou o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a simulação da formação do canal de descarga nuvem-solo negativa, baseada no modelo do *leader* bidirecional e na sua evolução por passos a partir da nuvem de tempestade. Tal ferramenta possibilita monitorar o comportamento de grandezas elétricas envolvidas na formação do canal, durante a evolução destes.

A representação do sistema físico simulado pela ferramenta, compreendendo a nuvem eletrificada, os canais descendente e ascendente, o solo e estruturas aterradas (indicada no capítulo 3), foi baseada no conhecimento atualizado sobre tais elementos (como discutido no capítulo 2). Adotou-se uma abordagem de processamento que discretiza o processo de evolução dos canais por passos de tempo muito reduzidos, da ordem de microssegundos, assumindo-se uma condição eletrostática no intervalo entre passos. A cada intervalo consecutivo era aplicado o método de simulação de cargas, que, para a condição geométrica dos elementos do sistema no intervalo específico, determinava o estado das grandezas elétricas, notadamente dos potenciais elétricos, das cargas (da distribuição destas) e dos campos elétricos ao nível do solo e sobre estruturas aterradas.

A ferramenta implementada foi aplicada inicialmente a um caso básico, correspondente à condição de um canal bipolar vertical se propagando a partir da nuvem eletrificada em direção ao solo plano. Posteriormente, foi aplicada a casos cujas condições se aproximavam por passos de situações de incidência de descargas reais. No último caso, foi simulada uma condição correspondente a uma descarga recente em MCS e os resultados obtidos foram comparados com aqueles da medição desta descarga. Os resultados qualitativos são considerados muito satisfatórios e os resultados quantitativos são consistentes com os dados de medição.

Com relação a tais resultados, pode-se destacar:

- Efetivamente, a ferramenta é capaz de reproduzir qualitativamente o comportamento observado ao nível do solo das grandezas elétricas associadas à formação do canal de descarga, notadamente dos campos elétricos. Por conseguinte, admite-se que outras grandezas elétricas, fontes deste campo, são reproduzidas, sobretudo as cargas elétricas e sua distribuição nos canais durante a evolução do leader;

- As análises de sensibilidade desenvolvidas indicam como os parâmetros geométricos dos elementos que compõem o sistema físico simulado afetam os resultados da aplicação da ferramenta. Por tais análises, verifica-se, por exemplo, que a carga elétrica transferida pela descarga não é muito afetada pelo raio dos canais ascendente e descendente, mas tem forte dependência do comprimento do canal bipolar. Assim, é possível ajustar tais parâmetros para gerar resultados quantitativos de simulação consistentes.

Desta forma, a ferramenta pode ser usada para reproduzir os resultados esperados de uma descarga real desde que seja provida a configuração geométrica tridimensional dos canais desta. O trabalho apresenta um vasto conjunto de resultados quantitativos relativos aos casos simulados e discute a consistência destes resultados.

Um resultado geral importante refere-se ao quociente R_E entre os valores de campo elétrico acima da estrutura aterrada e no solo a 50 m de distância desta, ao nível do solo. Este praticamente não varia no intervalo de tempo no entorno do instante de início de propagação do canal ascendente para uma condição definida de canal de descarga descendente, da estrutura e relevo. Entretanto, R_E varia significativamente, quando qualquer destas estruturas é modificada. Pelo interesse prático, vale mencionar que, para a configuração mais próxima de um evento real simulada neste trabalho (canal tridimensional e torre de 60 m sobre relevo equivalente ao de MCS), tal quociente se aproxima de 9. Considerando o valor da média geométrica do campo elétrico próximo, tal resultado sugere um valor limiar da ordem de 513 kV/m para o campo elétrico médio 1 m acima da torre para início da propagação do leader ascendente.

Uma característica destacável do modelo é o seu elevado potencial de aplicação acadêmica, como recurso didático no ensino das descargas atmosféricas.

6.2 Propostas de Continuidade

Embora os resultados obtidos neste trabalho confirmem a capacidade da ferramenta desenvolvida para análise qualitativa dos processos de formação dos canais da descarga atmosférica negativa nuvem-solo e possibilite seu uso para melhor entendimento desses processos, cabem ainda aprimoramentos, sobretudo na representação dos elementos do sistema físico simulado, para melhoria dos resultados quantitativos providos pela ferramenta.

Neste sentido, torna-se importante a aplicação da ferramenta em outros casos que possuam dados de medição para referência, de forma a possibilitar melhor ajuste dos parâmetros geométricos usados na representação dos elementos do sistema simulado. Um aspecto físico que requer uma abordagem específica corresponde à forma de se ter em conta o efeito da camada de corona ao nível do solo.

Por outro lado, em termos de continuidade do trabalho, as investigações que apresentam maior potencialidade correspondem às muitas aplicações da ferramenta para estimativa da distância de atratividade de estruturas (*striking distance*) em condições muito diversas, envolvendo variação da forma, altura, altitude, relevo próximo de estruturas aterradas, inclusive de elementos energizados. Tais investigações podem gerar resultados impactantes em termos de proteção de estruturas.

7 Referências Bibliográficas

ARAÚJO, L., “**Avanços na Investigação de componentes M e de Descargas Atmosféricas Ascendentes por meio de registros sincronizados de Campo Elétrico, de Corrente e de Vídeos**”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, agosto, 2013.

ARCANJO, M.; GUIMARÃES, M.; BERTOLIM, G.; MATTIOLI, P.; VISACRO, S., “**On the interpeak interval of early phase of negative CG lightning currents**”, XIV SIPDA – International Symposium on Lightning Protection, Natal, Brazil, 2017.

ARCANJO, M.; DIAS, R.; VISACRO, S.; “**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, 2018a.

ARCANJO, M.; GUIMARÃES, M.; MAZALA, K.; e VISACRO, S., “**Estimating the electric field above the top of grounded structures upon UCL initiation in CG lightning from close E-field measured over the ground**”, artigo aceito para apresentação em: ICLP - International Conference on Lightning Protection, Rzeszow - Poland., 2018b.

BAZELYAN, E. M.; RAIZER, “**Lightning Physics and Lightning Protection**”, Taylor & Francis, 2000.

BAZELYAN, E. M.; RAIZER, Y. P.; ALEKSANDROV N. L., “**The effect of space charge produced by corona at ground level on lightning attachment to high objects**”, Atmos. Res., vol. 153, pp. 74–86, Feb. 2015.

BECERRA, M.; COORAY, V., “**A Simplified Physical Model to Determine the Lightning Upward Connecting Leader Inception**”, IEEE transactions on power delivery, Vol. 21, No. 2, April, 2006.

BECERRA, M.; COORAY, V.; SOULA, S.; CHAUZY, S., “**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., 112, D12205, doi:10.1029/2006JD008308, 2007.

BIAGI, C.; JORDAN, D.; UMAN, M.; HILL, J.; BEASLEY, W.; HOWARD, J., “**Highspeed video observations of rocket-and-wire initiated lightning**”, Geophys. Res. Lett., 36(15), n/a-n/a, doi:10.1029/2009GL038525, 2009.

BIAGI, C.; UMAN, M.; HILL, J.; JORDAN, D.; RAKOV, V.; DWYER, J., “**Observations of stepping mechanisms in a rocket-and-wire triggered lightning flash**”, J. Geophys. Res. Atmos., 115(23), 2–7, doi:10.1029/2010JD014616, 2010.

BIAGI, C.; UMAN, M.; HILL, J.; JORDAN, D., “**Observations of the initial, upward-propagating, positive leader steps in a rocket-and-wire triggered lightning discharge**”, Geophys. Res. Lett., 38(24), 1–5, doi:10.1029/2011GL049944, 2011.

BIAGI, C.; UMAN, M.; HILL, J.; JORDAN, D., “**Negative leader step mechanisms observed in altitude triggered lightning**”, J. Geophys. Res. Atmos., 119(13), 8160–8168, doi:10.1002/2013JD020281, 2014.

CAMPOS, L.; SABA, M.; WARNER, T.; PINTO, O.; KRIDER, E.; ORVILLE, R., “**High-speed video observations of natural cloud-to-ground lightning leaders - A statistical analysis**”, Atmospheric Research, 135–136, 285–305, doi:10.1016/j.atmosres.2012.12.011, 2014.

CAMPOS, L., “**On the mechanisms that lead to multiple ground contacts in lightning**”, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), maio, 2016.

GOLDE, R., “**The frequency of occurrence and the distribution of lightning flashes to transmission lines. Electrical Engineering**”, 64(12), 902–910. <https://doi.org/10.1109/EE.1945.6441405>, 1945.

GUIMARÃES, M.; ARAÚJO, L.; PEREIRA, C.; MESQUITA, C.; VISACRO, S., “**Assessing currents of upward lightning measured in tropical regions**”, Atmospheric Research (Print), v. 149, p. 324-332, 2014.

GUIMARÃES, M., “**Observação e modelagem dos processos físicos envolvidos na formação das descargas atmosféricas**”, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, julho, 2017.

GUIMARÃES, M.; ARCANJO, M.; VALE, M.; VISACRO, S., “**Unusual features of negative leaders’ development in natural lightning, according to simultaneous records of current, electric field, luminosity, and high-speed video**”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* , v. 122, p. 2325-2333, 2017.

GUIMARÃES, M.; VALE, M.; VISACRO, S., “**Electric Field During Upward Connecting Leader Initiation in Negative Cloud-to-Ground Lightning Measured at a 50-m Distance**” em *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. PP, n. 99, pp. 1-4. doi: 10.1109/TEMPC.2018.2801565, 2018.

HILL, J.; UMAN M.; JORDAN D., “**High-speed video observations of a lightning stepped leader**”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 116(16), 1–8, doi:10.1029/2011JD015818, 2011.

KARUNARATHNA, N.; MARSHALL, T.; KARUNARATHNE, S.; STOLZENBURG, M., “**Initiation locations of lightning flashes relative to radar reflectivity in four small Florida thunderstorms**”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 6565–6591, doi:10.1002/2017JD026566, 2017.

KASEMIR, H., “**Qualitative Übersicht uber Potential-, Feld- und Ladungsverhältnisse bei einer Blitzentladung in der Gewitterwolke**”, H. Israel, Ed. Leipzig: Akad. Verlagsges, pp. 112–126, 1950.

KASEMIR, H., “**A Contribution to the Electrostatic Theory of a Lightning Discharge**”. *J. Geophys. Res.*, v. 65, no. 7, pp. 1873–1878, 1960.

KASEMIR, H., “**Static discharge and triggered lightning**”, In: MAZUR, V.; RUHNKE, L. (Ed.). *Heinz-Wolfram Kasemir: His collected works*. 1. ed. Wash. DC: American Geophysical Union, chap. 4.3, p.418-428. ISBN 978-0-87590-737-6, 2012.

LOURO, R.; GUIMARÃES, M.; VISACRO, S., “**Evolution Of The Lightning Channel And Related Electrical Quantities Based On The Bidirectional Leader Model**”, Em GROUND’2016 & 7th LPE - International Conference on Grounding and Earthing & 6 th International Conference on Lightning Physics and Effects, 2016.

LOURO, R., “**Análise da formação de descargas atmosféricas baseada na aplicação do modelo do leader bidirecional**”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

LU, W.; GAO, Y.; CHEN, L.; QI, Q.; YING, M.; YANG, Z.; CHEN, S.; YAN, X.; CHEN, C.; YIJUN, Z., “**Three-dimensional propagation characteristics of the leaders in the attachment process of a downward negative lightning flash**”. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, <http://dx.doi.org/10.1016/j>, 2015.

MALAN, D.; COLLENS, H., “**Progressive Lightning. III. The Fine Structure of Return Lightning Strokes**”. A Math. Phys. Eng. Sci., v. 162, pp. 175–203, 1937.

MALIK, N., “**A Review of the Charge Simulation Method and its Applications**”, IEEE Trans. Electr. Insul., v. 24, no. 1, pp. 3–20, 1989.

MAZUR, V.; RUHNKE, L., “**Model of electric charges in thunderstorms and associated lightning**”, J. Geophys. Res., v. 103, no. D18, pp. 23299–23308, 1998.

MAZUR, V., “**Principles of Lightning Physics**”, IOP Publishing, 2016.

OLIVEIRA, R., “**Sistema para Medição de Parâmetros de Canais Ascendentes de Descargas Atmosféricas na Estação de Pesquisas do Morro do Cachimbo**”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

VAN DER VELDE, O.; MONTANYA, J., “**Asymmetries in bidirectional leader development of lightning flashes**”, J. Geophys. Res. Atmos., 118, 13,504–13,519, doi:10.1002/2013JD020257, 2013.

PROCTOR, D., “**Regions where lightning flashes began**”, J. Geophys. Res., 96, 5099-5112, 1991.

QI, Q.; LU, W.; MA, Y.; CHEN, L.; ZHANG, Y.; RAKOV, V., “**High-speed video observations of the fine structure of a natural negative stepped leader at close distance**”, *Atmos. Res.*, 178–179, 260–267, doi:10.1016/j.atmosres.2016.03.027, 2016a.

QI, Q.; WANG, D.; LU, W.; CHEN, L.; RAKOV, V.; MA, Y.; YAN, X.; ZHANG, Y., “**Two basic leader connection scenarios observed in negative lightning attachment process**”, *High Volt.*, 1(1), 11–17, doi:10.1049/hve.2016.0002, 2016b.

RAKOV, V.; UMAN, M., “**Lightning Physics and Effects**”, University Press, Cambridge, 2003.

SABA, M.; SCHUMANN C.; WARNER, T.; HELSDON, J.; ORVILLE, R., “**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*, <https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2014.06.002>, 2015.

SABA, M.; PAIVA, A.; SCHUMANN C.; FERRO, M.; NACCARATO, K.; SILVA, J.; SIQUEIRA, F.; CUSTÓDIO, D., “**Lightning attachment process to common buildings**”, *Geophysical Research Letter*, doi:10.1002/2017GL072796, 2017.

SCHONLAND, B., “**Progressive Lightning IV - The Discharge Mechanism**”, *A Math. Phys. Eng. Sci.*, v. 164, no. 916, pp. 132–150, 1938.

SCHONLAND, B.; COLLENS, H., “**Progressive Lightning**”, *A Math. Phys. Eng. Sci.*, v. 143, no. 850, pp. 654–674, 1934.

SCHONLAND, B.; MALAN, D.; COLLENS, H., “**Progressive Lightning – II**”, *A Math. Phys. Eng. Sci.*, v. 152, no. 877, pp. 595–625, 1935.

SCHROEDER, M., “**Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas e Corrente de Descarga Atmosférica: Aplicação às Medições da Estação do Morro do Cachimbo**”, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.

SINGER, H.; STEINBIGLER, H.; WEISS, P., “**A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields**”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-93, no. 5, pp. 1660-1668 doi: 10.1109/TPAS.1974.293898, 1974.

STOLZENBURG, M.; MARSHALL, T., “**Electric field and charge structure in lightning-producing clouds. In H.-D. Betz**”, U. Schumann & P. Laroche (Eds.), *Lightning: principles, instruments and applications* (pp. 57–82). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9079-0_3, 2009.

TRAN, M.; RAKOV, V., “**Initiation and propagation of cloud-to-ground lightning observed with a high-speed video camera**”, em *Nature, Scientific Reports*, <http://dx.doi.org/10.1038/srep39521>, 2016.

UMAN M., “**Lightning**”, Westinghouse Research Laboratories. Pittsburgh, Pennsylvania, 1969.

VISACRO, S.; SOARES, A.; SCHROEDER, M.; CHERCHIGLIA, L.; SOUSA, V., “**Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station**”, *Journal Geophysical Research*, v. 109, no. D01105, pp. 1–11, 2004.

VISACRO, S., “**Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem em Engenharia**”, Artliber Editora Ltda, São Paulo, SP, 2005.

VISACRO, S.; VALE, M.; CORREA, G.; TEIXEIRA, A., “**Early phase of lightning currents measured in a short tower associated with direct and nearby lightning strikes**”, *J. Geophysical. Res.*, v. 115, no. D16104, pp. 1–11, 2010.

VISACRO, S.; MESQUITA, C.; DE CONTI, A.; SILVEIRA, F., “**Updated statistics of lightning currents measured at Morro do Cachimbo Station**”, *Atmospheric Research*, v.117, p.55-63, 2012.

VISACRO, S.; ARAUJO, L.; GUIMARÃES, M; VALE, M. “**M-component currents of first return strokes in natural negative cloud-to-ground lightning**”. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 118, p. 12, 132-12, 138, 2013a.

VISACRO, S.; ARAUJO, L.; GUIMARÃES, M; ARCANJO, M.; “**Lightning Currents of Upward Leaders in Negative Downward Events**”. Em: *Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL 2013)*, Jun. 26-28, Seoul, Korea, 2013b.

VISACRO, S.; GUIMARÃES, M.; VALE, M., “**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*, 122, 12,786–12,800. doi:10.1002/2017JD027016, 2017a.

VISACRO, S.; GUIMARÃES, M.; VALE; M., “**Striking distance determined from high-speed videos and measured currents in negative cloud-to-ground lightning**”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 13,356–13,369. <https://doi.org/10.1002/2017JD027354>, 2017b

VISACRO, S.; ARCANJO; M., VALE, M.; GUIMARÃES, M., “**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.

WARNER, T.; SABA, M.; SCHUMANN, C.; HELSDON Jr., J.; ORVILLE, R., “**Observations of bidirectional lightning leader initiation and development near positive leader channels**”, em *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 9251–9260, doi:10.1002/2016JD025365, 2016.