

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 981

**ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS BASEADA  
NA APLICAÇÃO DO MODELO DO LEADER BIDIRECIONAL**

**RAPHAEL BATISTA BORGES LOURO**

DATA DA DEFESA: 31/05/2017

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**ANÁLISE DA FORMAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS  
BASEADA NA APLICAÇÃO DO MODELO DO LEADER  
BIDIRECIONAL**

**RAPHAEL BATISTA BORGES LOURO**

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

Maio de 2017

L892a

Louro, Raphael Batista Borges.

Análise da formação de descargas atmosféricas baseada na aplicação do modelo do leader bidirecional [manuscrito] / Raphael Batista Borges Louro. – 2017.

127 f., enc.: il.

Orientador: Silvério Visacro Filho.

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

Apêndices: f. 121-127.

Bibliografia: f. 118-120.

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)

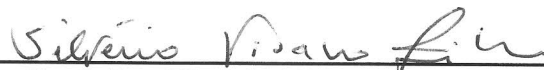
**"Análise da Formação de Descargas Atmosféricas Baseada na  
Aplicação do Modelo do Leader Bidirecional"**

**RAPHAEL BATISTA BORGES LOURO**

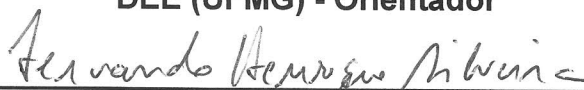
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 31 de maio de 2017.

Por:



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



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



**Prof. Dr. Rafael Silva Alípio  
Engenharia Elétrica (CEFET/MG)**

# AGRADECIMENTO

À minha família pelo apoio, dedicação e paciência, especialmente nestes dois anos de trabalho.

Ao meu orientador, Silvério Visacro Filho, pelos conhecimentos, ideias e dicas compartilhadas, além de suas contribuições ao trabalho.

A todos os professores do *Lightning Research Center* pela atenção, disciplinas ministradas e conhecimentos valiosos repassados. Particularmente, agradeço ao Clever Pereira, por permitir minha permanência no PROTLab para o término de minha dissertação.

A todos os colegas e amigos que fiz neste período de estudo.

A todas as pessoas que me incentivaram desde a graduação, aconselhando a seguir carreira acadêmica e pelos votos de confiança.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

*"Há grandes homens que fazem com que todos se sintam pequenos.*

*Mas o verdadeiro grande homem é aquele que faz com que todos se sintam grandes"*

*Gilbert Keith Chesterton*

# RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo para a predição da formação do canal de descarga nuvem-solo baseado no modelo do *leader* bidirecional.

Após uma revisão bibliográfica, desenvolveram-se rotinas computacionais, baseadas no método de simulação de cargas, para a simulação da evolução do canal da descarga. A ferramenta computacional elaborada, adaptada da formulação básica do trabalho de Mazur e Ruhnke, possui um menor custo computacional na representação do sistema físico para o cálculo das grandezas elétricas associadas ao processo de formação da descarga. Além disso, a ferramenta implementada usa uma formulação diferenciada para ter em conta o efeito do relevo irregular do solo.

A ferramenta foi aplicada para simular a formação dos canais de descarga até o *attachment*, e para analisar grandezas associadas à evolução dos canais, notadamente o campo elétrico, em situações de interesse prático, que incluem a presença de torre, canal ascendente e ramificações no canal descendente negativo em condições de relevo plano ou relevo similar ao da região da Estação do Morro do Cachimbo.

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

# ABSTRACT

This work shows a study about the prediction of a cloud-to-ground discharge formation based on the bidirectional leader model.

After a literature review, computational routines were developed based on the charge simulation method to simulate the evolution of the discharge channel. It should be noted that the computational tool, adapted from the basic formulation of Mazur and Ruhnke's work, has a lower computational cost in the representation of the physical system due to the methodology developed for the estimation of the electric quantities associated to the process. Furthermore, the tool uses a distinct formulation to include the effect of an irregular soil relief.

The tool was applied to simulate the lightning channel formation until the attachment process, and to analyze situations of practical interest such as the presence of tower, upward leader and branches in the stepped leader in conditions of plane relief and similar to the region around the Morro do Cachimbo Station.

**Keywords:** Lightning, Charge Simulation Method, Bidirectional Leader Model.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação do início da descarga atmosférica nuvem-solo, descarga de retorno e descarga subsequente para o modelo com centro de cargas - baseado em [9] .....	33
Figura 2.2 – Descarga representada como um elipsoide alongado e inserida no campo elétrico da nuvem - adaptado de [1] .....	34
Figura 2.3 – Distribuição de cargas e do potencial considerando (a) o modelo de nuvem de tempestade de Simpson e Wilson, (b) no caso de uma descarga intranuvem e (c) de uma descarga nuvem-solo antes e (d) após a descarga de retorno - adaptado de [14].....	35
Figura 3.1 – Mudança no campo elétrico ao nível do solo com a passagem da nuvem de tempestade, notação física - baseado em [8].....	40
Figura 3.2 – (a) Representação tridimensional da nuvem e (b) campo elétrico ao nível do solo com a passagem da nuvem de tempestade, notação física - baseado em [7].....	42
Figura 3.3 – Esquema para o cálculo do potencial em um ponto $p$ devido à presença de cargas elétricas pontuais - baseado em [23].....	44
Figura 3.4 – Esquema para o cálculo do potencial em um ponto $p$ considerando o efeito das imagens .....	45
Figura 3.5 – Interface do programa de nome <i>myThundercloud</i> desenvolvido para simular o modelo escolhido de nuvem de tempestade.....	47
Figura 3.6 – Fluxograma do programa <i>myThundercloud</i> desenvolvido com a presença de cargas para representar a camada da ionosfera .....	47
Figura 3.7 – Distribuição uniforme de cargas utilizadas para simulação, em que (a) é a camada superior positiva, (b) a camada exterior e interior negativa, (c) a camada exterior negativa e interior positiva e (d) a camada da ionosfera.....	48
Figura 3.8 – Visualização tridimensional e em corte das cargas da nuvem de tempestade simuladas .....	49
Figura 3.9 – Distribuição de potencial elétrico, considerando a presença da ionosfera à 25 km de altitude, para distâncias iguais a (a) 50, (b) 700, (c) 2500 e (d) 5000 m do eixo axial da nuvem de tempestade.....	49
Figura 3.10 – Distribuição do campo elétrico, considerando a presença da ionosfera à 25 km de altitude, para distâncias iguais a (a) 50, (b) 700, (c) 2500 e (d) 5000 m do eixo axial da nuvem de tempestade.....	50

Figura 4.1 – Ilustração esquemática para o raciocínio de cálculo do potencial no canal da descarga nuvem-solo para o caso de um solo plano e CEP ...	55
Figura 4.2 - Ilustração esquemática para o raciocínio de cálculo do potencial (a) no canal da descarga nuvem-solo e (b) na torre/canal ascendente para o caso de um solo plano e CEP .....	56
Figura 4.3 – Ilustração da posição das cargas pontuais no solo para a manutenção do potencial nulo na região desejada.....	57
Figura 4.4 – Potencial elétrico devido à nuvem de tempestade a 1 m de distância do eixo axial antes e após a consideração do efeito do solo .....	58
Figura 4.5 – Fluxograma com a ideia para consideração do relevo do solo nas simulações .....	59
Figura 4.6 – (a) Relevo correspondente a região do MCS, (b) com destaque e foco à torre instrumentada e a pontos de medição de campo elétrico ao nível do solo.....	60
Figura 4.7 – (a) Representação do solo do MCS utilizado nas simulações, (b) com foco na região com o relevo original.....	60
Figura 4.8 – Potencial elétrico devido à nuvem de tempestade no relevo final considerado.....	61
Figura 4.9 – Interface do programa <i>myLightning</i> , baseado no CSM para simulação do desenvolvimento da descarga atmosférica .....	64
Figura 4.10 – Potencial elétrico da descarga nuvem-solo calculado à 1 m do eixo axial da nuvem de tempestade.....	65
Figura 4.11 – Carga induzida por unidade de comprimento no canal da descarga nuvem-solo com 1 m de raio obtida pela média aritmética a cada 18 pontos .....	66
Figura 4.12 – Carga induzida por unidade de comprimento no canal da descarga nuvem-solo com 1 m de raio obtida diretamente pelo CSM.....	66
Figura 4.13 – Potencial elétrico da descarga nuvem-solo calculado à 1 m do eixo axial da nuvem de tempestade com o último passo tocando o solo.....	67
Figura 4.14 – Carga induzida por unidade de comprimento no canal da descarga nuvem-solo com 1 m de raio obtida pela média aritmética a cada 18 pontos e com o último passo tocando o solo.....	68
Figura 4.15 – Carga induzida por unidade de comprimento no canal da descarga nuvem-solo com 1 m de raio obtida diretamente pelo CSM e com o último passo tocando o solo .....	68
Figura 4.16 – Campo elétrico ao nível do solo medido à 50 m de distância do eixo axial da nuvem de tempestade.....	69

Figura 4.17 – Campo elétrico ao nível do solo medido a 50 m do eixo axial da nuvem de tempestade para o caso de descarga nuvem-solo com canal ascendente de 3 m de altura .....	70
Figura 4.18 – Campo elétrico ao nível do solo medido a (a) 50 m e (b) 700 m do eixo axial da nuvem de tempestade para o caso de descarga nuvem-solo com torre de 60 m de altura .....	71
Figura 4.19 – Ilustração de todos os casos simulados na Seção 4.3, sendo (a) a condição sem torre e canal ascendente, (b) sem torre e com canal ascendente de 3 m de altura e (c) com torre de 60 m e canal ascendente de 90 m de altura .....	72
Figura 5.1 – Representação do caso base utilizado para avaliação do efeito da variação do raio do canal da descarga nuvem-solo .....	76
Figura 5.2 – (a) Diferença de potencial entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo e (b) campo médio entre a extremidade inferior do canal e o solo para o caso base.....	76
Figura 5.3 – Carga induzida nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal em formação da descarga nuvem-solo para o caso base (último passo de simulação com o canal a 1 m do solo) .....	77
Figura 5.4 – Cargas induzidas no canal da descarga nuvem-solo no instante anterior ao contato com o solo (1 m acima deste), na descarga de retorno e após o fim do processo para o caso base.....	78
Figura 5.5 – (a,b) Diferença de potencial entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo e (c) campo elétrico médio entre a extremidade inferior do canal e o solo para os casos avaliados .....	79
Figura 5.6 – Carga induzida nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal em formação da descarga nuvem-solo para os casos avaliados (último passo de simulação com o canal a 1 m do solo).....	80
Figura 5.7 – Representação do problema utilizado para avaliação do efeito da introdução de uma torre instrumentada.....	82
Figura 5.8 – (a) Diferença de potencial entre o canal da descarga nuvem-solo e o topo da estrutura aterrada e (b) campo elétrico médio entre a extremidade inferior do canal e o topo da torre para o caso com torre instrumentada.....	83
Figura 5.9 – Carga induzida nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal em formação da descarga nuvem-solo para a introdução de torre instrumentada (último passo para os casos com e sem torre, respectivamente, a 40 m da torre e a 50 m do solo) .....	84

Figura 5.10 – Perfil do campo elétrico ao nível do solo à 50 m de distância do ponto de incidência da descarga nuvem-solo (último passo para os casos com e sem torre, respectivamente, a 1 m da torre e a 1 m do solo) .....	85
Figura 5.11 – Perfis de campo elétrico ao nível do solo a 50 e 700 m, 2,5 e 10 km de distância do ponto de incidência da descarga nuvem-solo para (a) condição sem e (b) condição com torre (último passo para os casos com e sem torre, respectivamente, a 1 m da torre e a 1 m do solo) .....	87
Figura 5.12 – Representação do problema avaliado considerando o relevo do solo	88
Figura 5.13 – (a) Diferença de potencial entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo e (b) campo elétrico médio para os casos avaliados .....	88
Figura 5.14 – Carga induzida nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal em formação da descarga nuvem-solo para os casos avaliados (último passo de simulação com o canal a 1 m do topo da torre) .....	89
Figura 5.15 – Perfil do campo elétrico ao nível do solo à 50 m de distância do ponto de incidência da descarga nuvem-solo (último passo de simulação com o canal a 1 m do topo da torre) .....	91
Figura 5.16 – Representação do problema avaliado considerando o relevo do solo	92
Figura 5.17 – (a) Diferença de potencial entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo e (b) campo elétrico médio para os casos avaliados .....	93
Figura 5.18 – (a) Carga induzida nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal em formação da descarga nuvem-solo (último passo de simulação com o canal a 1 m da extremidade superior do canal ascendente) .....	94
Figura 5.19 – Perfil do campo elétrico ao nível do solo à 50 m de distância do ponto de incidência da descarga nuvem-solo (último passo de simulação com o canal a 1 m da extremidade superior do canal ascendente) .....	96
Figura 5.20 – Representação do problema avaliado considerando o relevo do solo	97
Figura 5.21 – (a) Diferença de potencial entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo e (b) campo elétrico médio para os casos avaliados .....	98
Figura 5.22 – (a) Carga induzida nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal em formação da descarga nuvem-solo (último passo de simulação com o canal a 1 m da extremidade superior do canal ascendente) .....	99
Figura 5.23 – Perfil do campo elétrico ao nível do solo à 50 m de distância do ponto de incidência da descarga nuvem-solo (último passo de simulação com o canal a 1 m da extremidade superior do canal ascendente) .....	101
Figura 5.24 – Representação dos casos avaliados para o solo plano e com o cômputo do seu relevo .....	103
Figura 5.25 – (a) Diferença de potencial entre o canal da descarga nuvem-solo e a torre e (b) campo elétrico médio para os casos avaliados .....	104

Figura 5.26 – Campo elétrico medido a 50 cm, 1 m, 2m, 5m e 10 m acima do topo da torre para os casos (a) com solo plano na condição 1 e (b) 2 e (c) com o cômputo do relevo do solo na condição 1 e (d) 2.....	106
Figura 5.27 – Intensidade de campo elétrico ao nível do solo calculado a 50 m de distância da torre para os casos avaliados .....	107
Figura 5.28 – Relação entre o campo elétrico em diferentes posições acima do topo da torre: (a) 50 cm, (b) 1 m, (c) 2m, (d) 5 m e (e) 10 m e aquele medido a 50 m da torre ao nível do solo .....	109
Figura 5.29 – Representação da densidade de carga para um caso sem torre, com destaque para o aumento das cargas na extremidade do canal descendente negativo na descarga de retorno .....	114
Figura 5.30 – Representação esquemática da densidade de carga no canal da descarga nuvem-solo para um caso sem torre que evidencia o aumento das cargas nas extremidades do canal na descarga de retorno e na distribuição de cargas final após o processo.....	114

# LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resumo com a comparação das principais ideias propostas pelos modelos originais de formação e evolução do canal da descarga atmosférica.....	37
Tabela 5.1 – Resumo dos resultados de carga do caso base para a análise da variação do raio do canal de uma descarga nuvem-solo .....	78
Tabela 5.2 – Resumo dos resultados de d.d.p. e campo elétrico médio do caso base para a análise da variação do raio do canal de uma descarga nuvem-solo.....	80
Tabela 5.3 – Resumo dos resultados de carga do caso base para a análise da variação do raio do canal de uma descarga nuvem-solo .....	81
Tabela 5.4 – Resumo dos resultados de carga associados a parâmetros do caso com torre comparados à condição sem torre .....	84
Tabela 5.5 – Resumo dos resultados de carga associados a parâmetros do caso com solo plano e com relevo análogo ao presente em MCS .....	90
Tabela 5.6 – Resumo dos resultados de carga associados a parâmetros do caso com solo plano e com relevo análogo ao presente em MCS .....	95
Tabela 5.7 – Resumo dos resultados de carga associados a parâmetros do caso com solo plano e com relevo análogo ao presente em MCS .....	100
Tabela 5.8 – Resumo dos resultados de d.d.p. e campo elétrico médio para os casos avaliados .....	104
Tabela 5.9 – Resumo dos campos elétricos finais em diferentes pontos acima do topo da torre para os casos avaliados.....	106
Tabela 5.10 – Intensidade de campo elétrico ao nível do solo a 50 m de distância na torre no último passo de simulação.....	107
Tabela 5.11 – Valores da relação entre o campo elétrico acima do topo da torre em diferentes posições e aquele a 50 m da torre ao nível do solo.....	109

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ACE</b>	<i>Algoritmo Alternating Conditional Expectation</i>
<b>ATP</b>	<i>Alternative Transient Program</i>
<b>CEP</b>	Condutor elétrico perfeito
<b>CSM</b>	Método da Simulação de Cargas
<b>d.d.p.</b>	Diferença de potencial
<b>LRC</b>	Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas da UFMG
<b>MCS</b>	Estação do Morro do Cachimbo
<b>VHF</b>	<i>Very High Frequency</i>

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>26</b>
1.1 Relevância da investigação.....	26
1.2 Objetivos do trabalho .....	27
1.3 Metodologia.....	28
1.4 Organização do texto .....	28
<b>CAPÍTULO 2 - MODELOS DE FORMAÇÃO DO CANAL DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E A MEDIÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO COMO FERRAMENTA PARA ESTUDO DO FENÔMENO .....</b>	<b>30</b>
2.1 Introdução .....	30
2.2 Principais modelos de formação do canal de descargas atmosféricas .....	31
2.2.1 Considerações preliminares .....	31
2.2.2 Modelo de Schonland.....	31
2.2.3 Modelo de Kasemir ou do <i>leader</i> bidirecional.....	33
2.3 Comparação dos modelos de formação do canal de descargas atmosféricas....	36
2.4 A importância das medições de campo elétrico para o estudo das descargas atmosféricas .....	37
2.5 Considerações finais .....	38
<b>CAPÍTULO 3 - REPRESENTAÇÃO DE NUVEM DE TEMPESTADE PARA A ESTIMATIVA DA EVOLUÇÃO DO CANAL DE DESCARGA NUVEM-SOLO.....</b>	<b>39</b>
3.1 Introdução .....	39
3.2 Representação de nuvem de tempestade para a descarga nuvem-solo .....	40
3.2.1 Considerações sobre a representação de nuvem de tempestade .....	40
3.2.2 Arranjo final da nuvem de tempestade escolhida.....	41
3.2.3 Formulação das grandezas elétricas envolvidas no problema .....	43
3.3 Desenvolvimento de programa para simular a nuvem de tempestade e resultados .....	46
3.4 Considerações finais .....	51

<b>CAPÍTULO 4 - IMPLEMENTAÇÃO DE CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA ESTIMATIVA DA EVOLUÇÃO DO CANAL DE UMA DESCARGA NUVEM-SOLO PELO MODELO DO LEADER BIDIRECIONAL .....</b>	<b>52</b>
4.1 Introdução .....	52
4.2 A evolução do canal precursor da descarga atmosférica pelo modelo do <i>leader</i> bidirecional .....	53
4.2.1 Considerações sobre a evolução do canal de uma descarga atmosférica.....	53
4.2.2 Conceitos utilizados nas simulações a partir do modelo do <i>leader</i> bidirecional	54
4.2.3 Formulação das grandezas elétricas envolvidas no problema .....	62
4.3 Desenvolvimento de programa para comparação de resultados com aqueles apresentados no artigo de Mazur e Ruhnke [7].....	64
4.4 Considerações finais .....	72
<b>CAPÍTULO 5 - APLICAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CASOS DE INTERESSE PRÁTICO .....</b>	<b>74</b>
5.1 Introdução .....	74
5.2 Apresentação dos casos avaliados .....	74
5.3 Representação do raio do canal da descarga nuvem-solo .....	75
5.3.1 Caso básico.....	75
5.3.2 O efeito do raio do canal .....	79
5.4 Representação da presença de torre instrumentada .....	81
5.5 Representação do relevo do solo na evolução do canal da descarga nuvem-solo .....	87
5.5.1 Simulação da evolução do canal na presença da torre sobre um solo como o relevo das proximidades de MCS.....	87
5.5.2 O efeito do canal ascendente no caso de uma descarga nuvem-solo com presença de torre .....	92
5.5.3 O efeito da ramificação no caso de uma descarga nuvem-solo com presença de torre e canal ascendente .....	97
5.5.4 O cômputo do relevo e o seu impacto sobre o campo elétrico.....	102
5.6 Considerações finais .....	111
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....</b>	<b>115</b>
6.1 Conclusões gerais.....	115

6.2 Propostas de continuidade .....	116
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>118</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>121</b>

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

---

### 1.1 Relevância da investigação

A descarga atmosférica é um fenômeno natural responsável por diversos problemas graves, como os que envolvem distúrbios em sistemas elétricos e eletrônicos, danos em equipamentos e até morte de seres vivos. A intensidade destes efeitos é considerável no Brasil devido ao seu alto índice de incidência de descargas atmosféricas.

Como abordado em [1], o entendimento completo dos diversos estágios da descarga ainda não foi alcançado. As contribuições requeridas para modificar este quadro e para superar os desafios envolvidos no tema demandam, necessariamente, a disponibilidade de dados experimentais relativos às grandezas relacionadas à formação e evolução da descarga atmosférica.

A Estação do Morro do Cachimbo (MCS), parte integrante do LRC (Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas da UFMG ou *Lightning Research Center*), dispõe de recursos únicos para obtenção de tais grandezas. Como descrito em [2] e [3], tais recursos possibilitam a aquisição de registros simultâneos de alta qualidade de corrente, campo elétrico, luminosidade e vídeos de alta velocidade de descargas incidentes na torre de MCS.

Destacadamente, os registros de corrente têm resolução de 16 ns e os *frames* de vídeos são obtidos, atualmente, com intervalos de 25  $\mu$ s.

Na última década, as atividades adicionais de medição de parâmetros associados às descargas atmosféricas desenvolvidas no LRC tem se somado a investigação dos processos físicos envolvidos na formação das descargas para melhor entendimento do fenômeno e de seus efeitos, notadamente no seu estágio final, que compreende a evolução do canal precursor de descarga até a ocorrência do *attachment*. Nesta perspectiva, foram desenvolvidos alguns importantes trabalhos recentes no centro de pesquisa, com realce para alguns tópicos, notadamente a fase imediatamente anterior à descarga de retorno que compreende a indução de pulsos unipolares de corrente [3], as peculiaridades das componentes M [4], as características específicas de canais ascendentes de regiões temperadas [5] e a evolução dos canais negativos descendentes e positivos ascendentes [6].

Neste contexto, o presente trabalho pretende auxiliar na interpretação de dados disponíveis de medições no MCS, particularmente no que concerne aos campos elétricos medidos ao nível do solo, e contribuir para o entendimento dos processos físicos relativos à formação e evolução das descargas atmosféricas.

Pela singularidade dos dados disponíveis das medições de MCS, acredita-se que a dissertação proposta tenha potencial para desenvolver contribuições para o melhor entendimento do fenômeno físico.

## 1.2 Objetivos do trabalho

O principal objetivo do trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo computacional para análise do processo de formação do canal da descarga no que concerne à evolução das grandezas relacionadas, notadamente do campo elétrico, a partir de uma abordagem eletrostática por passos. Esta realização constituiria o embrião de uma ferramenta que permitisse buscar melhor entendimento do processo de formação do canal de descarga, a partir do uso dos dados de medição obtidos em MCS.

Vale ressaltar que se almeja tão somente desenvolver a estrutura básica da ferramenta computacional e validar a representação consistente dos componentes

envolvidos no processo, tais quais os canais descendentes e ascendentes, o relevo e a torre instrumentada.

### **1.3 Metodologia**

A primeira etapa do trabalho consistiu na realização de uma revisão bibliográfica que contemplou aspectos discutidos na literatura, referentes à caracterização das grandezas envolvidas na formação do canal de descargas atmosféricas. Paralelamente, faz-se a identificação de lacunas ou pontos questionáveis na interpretação dos processos físicos relativos ao fenômeno. Isso permite a identificação dos domínios prioritários de abordagem nas análises a serem desenvolvidas na dissertação.

Após a revisão bibliográfica, apresenta-se a modelagem do problema proposto baseado nos desenvolvimentos de Mazur e Ruhnke [7] e as rotinas computacionais implementadas para permitir a simulação da evolução por passos do canal. Os casos avaliados pelas simulações podem gerar interpretações para os processos envolvidos nos domínios selecionados de investigação e elaborar o correspondente conhecimento com o objetivo de divulgação (publicação) das conclusões que contribuam para o aprimoramento do entendimento do fenômeno descarga atmosférica.

### **1.4 Organização do texto**

Esta dissertação é dividida em cinco capítulos, incluindo este de introdução, e um apêndice.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o assunto em estudo. Apresentam-se os principais modelos existentes na literatura sobre a formação e evolução do canal da descarga nuvem-solo, além do uso da medição de campo elétrico como provedor de informações para o estudo do fenômeno atmosférico.

Mostram-se ainda trabalhos realizados pela equipe do LRC relacionados às medições de campo elétrico ao nível do solo de descargas nuvem-solo.

O Capítulo 3 tem foco na representação de uma nuvem de tempestade para estimar a evolução do canal da descarga e seus parâmetros elétricos associados. A nuvem representada possui seu arranjo definido como apresentado em [7]. Apresenta-se o método de simulação de cargas e seu uso na rotina computacional da nuvem de tempestade desenvolvida.

O Capítulo 4 compreende a análise da evolução do canal da descarga atmosférica pelo modelo do *leader* bidirecional. Apresentam-se suas características e valores utilizados em parâmetros associados à sua evolução. Ademais, estabelece-se uma metodologia para diminuir a necessidade de memória utilizada nas simulações pelo método de simulação de cargas tradicional sem a perda de consistência física do problema, além de uma aproximação de engenharia para o cômputo do relevo do solo nas simulações. Resultados preliminares são mostrados com o intuito de validar a rotina computacional elaborada.

O Capítulo 5 apresenta uma análise de sensibilidade de grandezas elétricas associadas à descarga nuvem-solo. O programa desenvolvido estima e quantifica a variação de parâmetros na simulação, notadamente os associados ao campo elétrico. Destaca-se a comparação de simulações com solo plano com aquelas que consideram o cômputo do relevo do solo em função da presença de torre instrumentada, canal ascendente e ramificação no canal da descarga nuvem-solo.

O Apêndice A mostra o impacto da introdução da camada da ionosfera para o modelo de nuvem de tempestade considerado.

# Capítulo 2

## MODELOS DE FORMAÇÃO DO CANAL DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E A MEDIÇÃO DO CAMPO ELÉTRICO COMO FERRAMENTA PARA ESTUDO DO FENÔMENO

---

### 2.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma breve revisão dos dois principais modelos de formação do canal de descargas atmosféricas encontrados na literatura. Apresentam-se seus aspectos mais relevantes e consequências relativas às concepções adotadas por cada um. O capítulo também realça a importância das medições de campo elétrico na interpretação dos parâmetros elétricos associados ao fenômeno atmosférico.

Este capítulo fornece a base de conceitos e definições utilizada no decorrer do trabalho, além das considerações e suposições realizadas para as representações e os modelos utilizados nas simulações computacionais.

## 2.2 Principais modelos de formação do canal de descargas atmosféricas

### 2.2.1 Considerações preliminares

Nesta seção, apresentam-se os dois modelos de formação do canal de descargas atmosféricas com maior destaque na literatura: o modelo com centro de cargas, também conhecido como modelo do Schonland, e o modelo do *leader* bidirecional. Os mecanismos de descarga são mostrados seguindo sua ordem cronológica. Na apresentação dos modelos, considera-se a formação das descargas do tipo nuvem-solo negativas, foco deste trabalho.

Os dois modelos contemplam a evolução do *leader* (canal precursor da descarga), mas seguindo diferentes abordagens. Como apresentado em [8], no caso de uma descarga nuvem-solo negativa, o *streamer* consiste em ramificações filamentosas constituídas a partir do efeito corona induzido por pulso de campo elétrico, que antecede a formação de um canal de plasma, o *leader*. Este evolui a partir de disrupções sucessivas no ar, que caracterizam a evolução do *leader* negativo por passos.

### 2.2.2 Modelo de Schonland

O modelo com centro de cargas de B. F. J. Schonland [9], publicado em 1938, foi concebido após uma série de três artigos que descrevem resultados obtidos por câmeras a respeito da incidência de descargas atmosféricas no solo [10], [11], [12].

Segundo Schonland, a nuvem de tempestade possui regiões com acúmulo de cargas elétricas de certo valor, conhecidos como centros de cargas. De forma concisa, o modelo de Schonland assume que a descarga tem origem em um dos centros de carga da nuvem como um canal unipolar e unidirecional. Este evolui devido à transferência de cargas do centro de cargas da nuvem, que são distribuídas ao longo da extensão do canal.

A justificativa para as hipóteses anteriores é descrita em [9]. Em suas observações, a descarga sempre se inicia no sentido descendente ou nuvem-solo, o que corroboraria ao entendimento de que o *leader* tem caráter unidirecional. Além

disso, admite-se que o fenômeno se desenvolve de forma similar a descargas geradas por eletrodos. Neste caso, a teoria de ionização em gases explicaria a formação do processo a partir de um cátodo (polo negativo) ou ânodo (polo positivo).

Como a maioria das observações feitas na pesquisa indica que as descargas possuem carga total negativa transportada para o solo, a base da nuvem pode ser avaliada como um cátodo. A partir das medições de campo elétrico, observou-se que este possui mudanças lentas no período da descarga de retorno e, devido ao seu sinal e proporcionalidade com as cargas elétricas do processo, houve a interpretação de que o evento diminui as cargas negativas presentes no centro de cargas da nuvem.

Outra conclusão das observações é a de que cada uma das descargas sucessivas ou parciais que contemplam um evento completo para o solo se apresenta em dois estágios: o primeiro é o *leader* nuvem-solo, que é sucedido pelo segundo estágio, o retorno solo-nuvem. Este ocorre após a conexão do canal da descarga com o solo. Tais processos são definidos por Schonland, respectivamente, como a fase do *leader* e da descarga de retorno.

Para ilustrar o processo de formação de uma descarga nuvem-solo negativa, a Figura 2.1 apresenta uma nuvem de tempestade e a sequência de passos no desenvolvimento do fenômeno atmosférico. O passo 1 consiste na formação do *leader* de carga negativa e a distribuição desta pelo canal condutor desenvolvido, o que inclui suas ramificações. Percebe-se ainda a carga positiva induzida no solo devido aos centros de carga negativa presentes na nuvem e no canal da descarga. No passo 2, a aproximação do *leader* nuvem-solo concentra um maior número de cargas positivas em uma região do solo, o que provoca um forte campo elétrico e possibilita a indução e formação de canais ascendentes (solo-nuvem). O passo 3 contempla a conexão do *leader* principal com o canal ascendente induzido no solo e apresenta a transferência de cargas negativas para o solo na descarga de retorno. Enquanto o canal principal se neutraliza, o passo 4 indica a disrupção no interior de outro centro de cargas, representado na nuvem de tempestade da Figura 2.1. O novo canal se aproxima das ramificações intranuvem do anterior, que não possui mais conexão com o solo. No momento do contato entre o canal novo e o anterior, há a redistribuição de cargas negativas ao longo de seu percurso e indução de novos canais ascendentes no solo devido à sua proximidade. No passo 5, percebe-se a inexistência de ramificações no canal principal, característico de um *dart leader*.

A descarga subsequente se conecta ao solo e uma nova descarga de retorno é apresentada no passo 6.

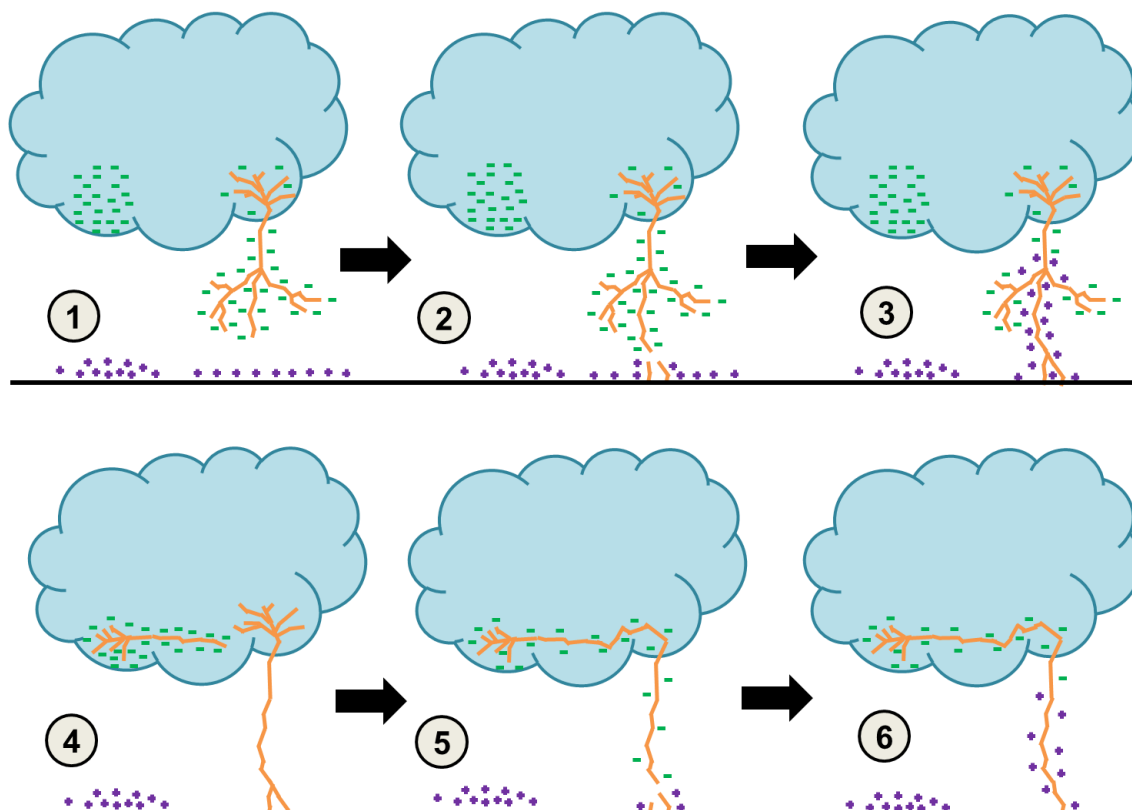


Figura 2.1 – Representação do início da descarga atmosférica nuvem-solo, descarga de retorno e descarga subsequente para o modelo com centro de cargas - baseado em [9]

### 2.2.3 Modelo de Kasemir ou do *leader* bidirecional

O modelo do *leader* bidirecional, proposto por H. W. Kasemir [13], em 1950, se respalda na teoria eletrostática para explicar a evolução e formação do canal da descarga atmosférica. As principais ideias do autor são apresentadas em [14], que é a referência utilizada nesta seção para explicar os fundamentos do modelo.

O modelo de Kasemir indica o início da descarga atmosférica a partir de uma disrupção na região de maior campo elétrico no interior da nuvem de tempestade. O canal da descarga possui evolução bidirecional, ou seja, desenvolve a partir de sua origem para os sentidos descendente e ascendente. Além disso, a distribuição de cargas no canal é governada pelo potencial elétrico do ambiente ao seu redor. Outra característica do canal é a soma líquida nula de suas cargas.

O autor indica que a formação do canal de descarga se processa sem a presença de corpos considerados condutores, cujo termo em inglês é *electrodeless*

*discharge*, e que sua progressão se deve ao campo elétrico da nuvem de tempestade. Este determina se a descarga se desenvolve ou não, o que depende de leis como às da eletrodinâmica e da ionização em meios gasosos [14].

Por conta da evolução por passos do canal da descarga nuvem-solo, a hipótese eletrostática pode ser aplicada nos instantes em que ocorre cada passo. Desta forma, a teoria da superposição pode ser utilizada para a análise do problema.

O modelo do *leader* bidirecional supõe que a distribuição de cargas na nuvem de tempestade produz um campo elétrico intenso em alguma região de seu volume. Este campo é capaz de promover uma ruptura elétrica na região, constituindo um corpo alongado de plasma, e que pode evoluir para uma descarga atmosférica. De forma simplificada, pode-se representar tal corpo como um elipsoide alongado inserido no campo elétrico criado pela nuvem de tempestade, ilustrado na Figura 2.2

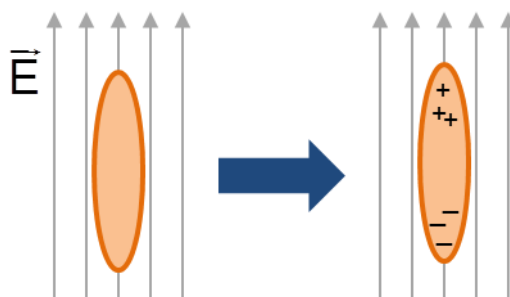


Figura 2.2 – Descarga representada como um elipsoide alongado e inserida no campo elétrico da nuvem - adaptado de [1]

O campo elétrico da nuvem induz cargas com sinais diferentes nas extremidades do corpo, criando um dipolo elétrico. Essa situação pode resultar na intensificação do campo elétrico nas extremidades do elipsoide suficiente para a ruptura. O campo total resulta da superposição provocada pelo campo devido à nuvem de tempestade (campo de fundo ou *background field*) com aquele gerado pelas cargas do canal da descarga. Este processo determina o desenvolvimento do *leader* até sua conexão ao solo.

A compreensão da distribuição de potenciais  $\Phi$  e cargas  $Q$  no canal da descarga é auxiliada pela Figura 2.3, que considera a presença de uma nuvem de tempestade representada por três cargas pontuais. As curvas de potenciais apresentadas na Figura 2.3 (b), (c) e (d), mostradas como linhas azuis pontilhadas, são as definidas pelas cargas da nuvem de tempestade da Figura 2.3 (a).

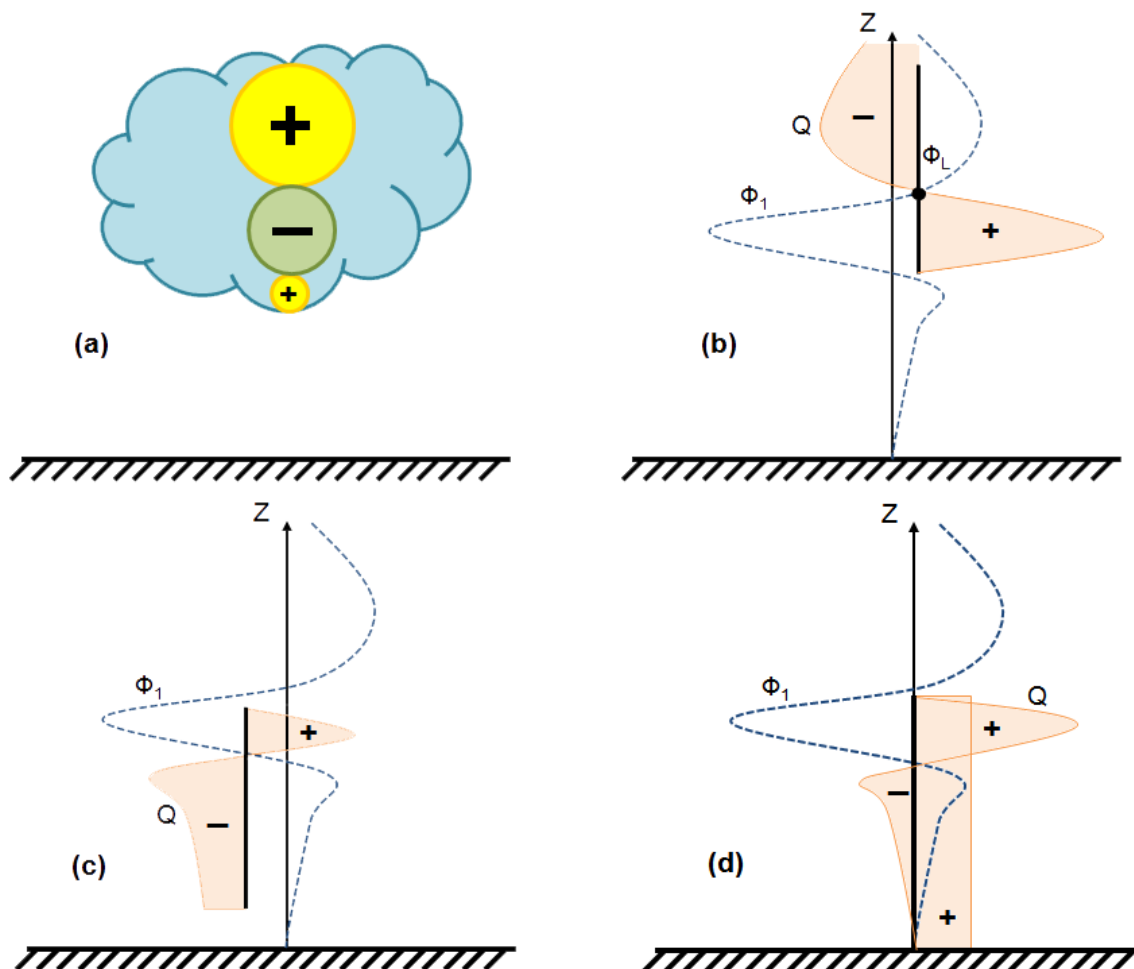


Figura 2.3 – Distribuição de cargas e do potencial considerando (a) o modelo de nuvem de tempestade de Simpson e Wilson, (b) no caso de uma descarga intranuvem e (c) de uma descarga nuvem-solo antes e (d) após a descarga de retorno - adaptado de [14]

A Figura 2.3 (a) ilustra um modelo de nuvem de tempestade baseado nos resultados de G. Simpson [15] e C. T. R. Wilson [16]. O modelo consiste em uma nuvem dividida em três camadas: a superior com carga positiva, a do meio é negativa e a inferior formada por um pequeno bolsão de carga positiva. A nuvem de tempestade cria no ambiente uma distribuição de potencial  $\Phi_1$ , presente nos itens (b), (c) e (d). A Figura 2.3 (b) possui uma linha vertical em negrito, que representa o potencial elétrico  $\Phi_L$  na superfície do canal de uma descarga intranuvem, cuja distribuição de cargas é denotada por Q. O potencial  $\Phi_L$  é igual ao potencial médio definido pelas cargas da nuvem ao longo da extensão do canal da descarga intranuvem, sendo que o ponto de interseção entre o potencial  $\Phi_L$  e  $\Phi_1$  corresponde ao ponto de origem da descarga intranuvem. Seu desenvolvimento será bidirecional e só cessará no momento em que a diferença de potencial entre o canal e a nuvem for insuficiente para continuar o processo de ruptura no ar – campo elétrico inferior

ao de ruptura no meio. Quando isso ocorre, há a limitação de uma das extremidades do canal, enquanto a outra pode continuar progredindo devido à dependência de sua evolução com a diferença de potencial entre o canal e o ambiente. A polaridade da descarga é determinada pela distribuição de cargas no canal. Pode-se concluir que, por exemplo, uma descarga será considerada negativa devido à sua extremidade inferior ter um acúmulo de cargas negativas. Ademais, a extremidade negativa do canal induzirá cargas de polaridade positiva no solo.

A Figura 2.3 (c) apresenta a distribuição de cargas e o potencial de um canal de uma descarga nuvem-solo, que é originada na interseção do potencial  $\Phi_L$  em sua superfície e aquele  $\Phi_1$  definido no ambiente pelas cargas da nuvem de tempestade. Há a presença de cargas negativas na extremidade inferior do canal, enquanto cargas positivas se concentram na extremidade superior. Esta característica da distribuição de cargas é reflexo do potencial  $\Phi_1$  definido pelas cargas da nuvem de tempestade na região.

A evolução do canal de descarga nuvem-solo resultará em sua conexão ao solo, representada na Figura 2.3 (d). O potencial final após o processo de descarga de retorno ao longo da extensão do canal deve ser nulo, pois este é o potencial elétrico do solo. A distribuição de cargas no canal da descarga nuvem-solo é bipolar no instante anterior à sua conexão ao solo. Como o potencial final ao longo da extensão do canal é nulo e seu potencial antes da descarga de retorno é  $\Phi_L$ , o potencial definido pelas cargas transferidas para o solo no processo, considerando a superposição, será igual a  $-\Phi_L$ . Assim, devido ao processo de descarga de retorno, as cargas transferidas para o solo terão distribuição uniforme e com sinal positivo, como ilustrado na Figura 2.3 (d). A distribuição de cargas final após o processo de descarga de retorno será a superposição daquelas no instante anterior à descarga de retorno com aquelas transferidas para o solo.

## **2.3 Comparação dos modelos de formação do canal de descargas atmosféricas**

Com o objetivo de resumir as principais ideias dos modelos originais dos autores, a Tabela 2.1 apresenta uma comparação dos dois modelos em relação aos

pontos mais relevantes das etapas de formação e evolução do canal de descargas atmosféricas.

Tabela 2.1 – Resumo com a comparação das principais ideias propostas pelos modelos originais de formação e evolução do canal da descarga atmosférica

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

## 2.4 A importância das medições de campo elétrico para o estudo das descargas atmosféricas

Os processos elétricos que contemplam uma descarga atmosférica possuem relação com as cargas elétricas envolvidas no fenômeno. O campo elétrico produzido pelas cargas é o principal parâmetro utilizado para a detecção e medição das etapas presentes na descarga atmosférica. Suas medições são fundamentais, por exemplo, para compreender a distribuição de cargas na nuvem de tempestade e perceber fenômenos como a componente M [8].

Percebe-se que, além de sua relação direta com as cargas elétricas, a medição do campo elétrico possui certas vantagens, pois pode ser avaliada ao nível do solo, através de equipamentos específicos, como o *field mill*, e no interior das nuvens de tempestade, por meio de balões ou aviões, como descrito em [8].

Os trabalhos que envolvem medição de campos elétricos associados às descargas atmosféricas no LRC se iniciaram com [17]. Nesta dissertação, são apresentados registros de campo elétrico com variação lenta e rápida ao nível do solo obtidos a partir de medições em MCS para incidências próximas à torre instrumentada. Destaca-se que a medição de variação lenta tem o objetivo de registrar o aumento e o decréscimo do campo elétrico no ambiente, o que permite

uma visão global do fenômeno atmosférico como um todo. Por outro lado, a medição de campo elétrico com variação rápida fornece detalhes de fenômenos que ocorrem em um curto período de tempo na descarga, especialmente no estágio de descarga de retorno. Percebe-se que, apesar de [17] ser o primeiro trabalho com medições de campo elétrico, estudos anteriores, como [18], apresentam resultados que possibilitaram a melhoria da detecção dos parâmetros elétricos associados às descargas atmosféricas em MCS.

Para auxiliar na avaliação dos resultados de medição de campos elétricos medidos, foi desenvolvida em [8] uma abordagem do comportamento deste parâmetro elétrico a partir de simulação computacional. A nuvem é representada por um modelo simplificado formado por três cargas pontuais: uma superior e outra inferior com sinal positivo e uma central, com sinal negativo. A carga central negativa é subtraída de um valor igual a  $-5\text{ C}$  que é deslocada continuamente em direção ao solo. Os perfis de campo elétrico ao nível do solo obtidos para várias distâncias pela simulação apresentam comportamento semelhante aos obtidos com medições.

## 2.5 Considerações finais

Neste capítulo, realizou-se uma breve apresentação das ideias referentes aos dois principais modelos da literatura que contemplam a formação do fenômeno, além de destacar a importância das medições de campo elétrico para a interpretação dos processos associados às descargas atmosféricas.

Abordou-se, em particular, o modelo do *leader* bidirecional para a compreensão e desenvolvimento de uma ferramenta computacional que possibilite a estimação da formação de uma descarga nuvem-solo, baseada no artigo de Mazur e Ruhnke [7].

# Capítulo 3

## REPRESENTAÇÃO DE NUVEM DE TEMPESTADE PARA A ESTIMATIVA DA EVOLUÇÃO DO CANAL DE DESCARGA NUVEM-SOLO

---

### 3.1 Introdução

Neste capítulo, apresenta-se a representação da nuvem de tempestade para o cálculo dos potenciais da descarga atmosférica nuvem-solo. Tal representação, elaborada a partir de dados experimentais encontrados na literatura, se baseia no artigo de Mazur e Ruhnke [7]. Consideram-se os aspectos relacionados à formulação e dados utilizados na rotina computacional para o cálculo dos potenciais gerados pelas cargas da nuvem de tempestade.

## 3.2 Representação de nuvem de tempestade para a descarga nuvem-solo

### 3.2.1 Considerações sobre a representação de nuvem de tempestade

Um modelo representativo de uma nuvem de tempestade deve buscar reproduzir valores similares aos das grandezas envolvidas no processo de evolução do canal da descarga. A maioria dos modelos se baseia em sondagens de balões, que determinam o valor do campo elétrico e, a partir deste, estimam as cargas no interior da nuvem de tempestade. Destaca-se que todos os modelos possuem uma característica em comum: a estrutura tripolar de cargas [7].

O modelo de nuvem com estrutura tripolar de cargas se divide em uma região negativa no meio da estrutura, uma positiva sobre esta e outra pequena porção positiva na base inferior. Tal modelo contempla um comportamento visto em medições de campo elétrico ao nível do solo que é a mudança do seu sinal com a passagem da nuvem de tempestade pelos sensores. A Figura 3.1 representa tal comportamento para uma convenção física do campo elétrico, ou seja, um campo elétrico de sentido ascendente no solo é considerado positivo [8]. Destaca-se que a porção inferior com cargas positivas possui maior impacto no campo elétrico ao nível do solo quando esta passa pelo ponto de medição. Quando a nuvem se desloca lateralmente, o ponto de medição percebe uma carga equivalente da nuvem predominantemente negativa. Para distâncias maiores, percebe uma carga equivalente positiva.

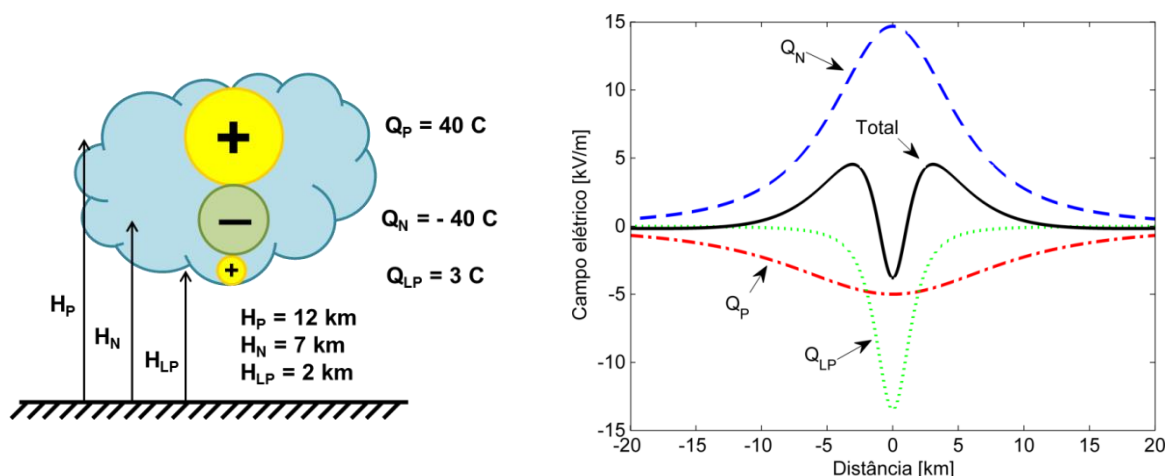


Figura 3.1 – Mudança no campo elétrico ao nível do solo com a passagem da nuvem de tempestade, notação física - baseado em [8]

Destaca-se que a inferência das cargas a partir de medições fora da nuvem é prejudicada devido à formação de uma fina camada de cargas negativas acima da camada superior de cargas positivas. Essa camada negativa tem o efeito de blindar as cargas positivas em regiões acima da nuvem de tempestade, o que falseia medições realizadas nesses pontos. Assim, os valores calculados para as cargas são inferiores ao que deveriam ser.

Existem trabalhos que sugerem um modelo tetrapolar ao invés de um tripolar para a nuvem de tempestade, como o apresentado em [19]. A principal diferença entre os dois é a presença da fina camada negativa na parte superior da nuvem, a qual tem o efeito de blindar as cargas da região. Tal modelo tetrapolar não é levado em conta neste trabalho.

### 3.2.2 Arranjo final da nuvem de tempestade escolhida

Utilizou-se como modelo final de nuvem de tempestade neste trabalho o apresentado em [7], que possui formato cilíndrico, com quatro regiões de cargas bem definidas, mas que mantém sua característica tripolar. A Figura 3.2 ilustra as cargas empregadas no modelo de nuvem de tempestade considerado no item (a), enquanto no item (b) apresenta-se a distribuição do campo elétrico ao nível do solo para diversas distâncias, similar à Figura 3.1. Na Figura 3.2 (b),  $Q_P$  representa o campo elétrico ao nível do solo devido às cargas pontuais da camada positiva superior da nuvem,  $Q_N$  às cargas negativas da camada inferior da nuvem,  $Q_{LP}$  às cargas positivas no interior da camada inferior da nuvem e  $Q_{NP}$ , àquelas negativas com valor de -10 C no interior da camada inferior da nuvem de tempestade.

As diferenças na distribuição do campo na Figura 3.2 em relação a Figura 3.1 se devem à maior influência da camada negativa principal em relação à [8], além da maior intensidade dos valores calculados em relação ao último. Ademais, enquanto o campo elétrico na Figura 3.1 é quase nulo a partir de 10 km de distância do eixo axial da nuvem, na Figura 3.2 tal comportamento só ocorre a partir de 15 km de distância.

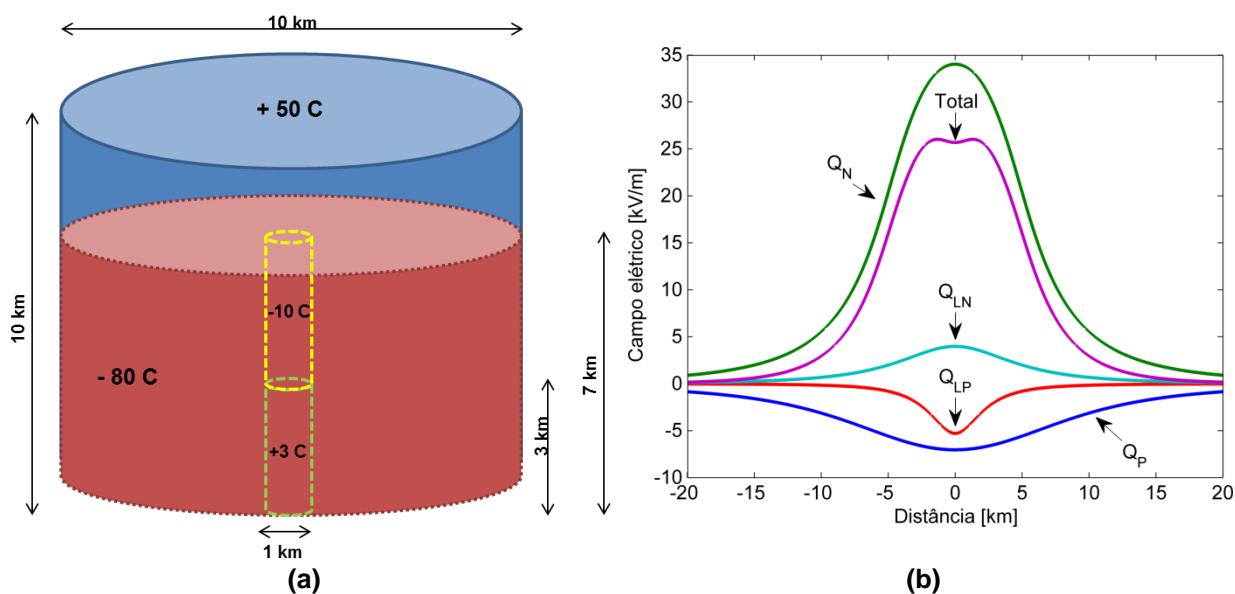


Figura 3.2 – (a) Representação tridimensional da nuvem e (b) campo elétrico ao nível do solo com a passagem da nuvem de tempestade, notação física - baseado em [7]

Adota-se em todas as regiões uma distribuição uniforme de cargas a fim de simplificar o problema. A nuvem de tempestade possui 10 km de altura e largura, com sua base 2 km acima do solo. O modelo possui duas camadas principais: a primeira é positiva, com carga total de 50 C, densidade volumétrica de cargas igual a  $0,212 \text{ nC/m}^3$  e localiza-se no topo da nuvem entre 9 e 12 km de altitude. Já a segunda é negativa, possui -80 C e  $-0,147 \text{ nC/m}^3$  e abrange as altitudes de 2 a 9 km.

No interior da camada inferior negativa, representou-se por meio de duas camadas uma pequena região de forte eletrificação, descrita como a célula de tempestade por [20]. A célula é uma região de fortes correntes de ar ascendentes, a qual é a principal fonte geradora de cargas na nuvem, e também é o local de origem da chuva no estágio avançado da tempestade. A camada interna possui diâmetro de 1 km, sendo a superior negativa e a inferior positiva. A camada interna negativa, de -10 C e  $-3,18 \text{ nC/m}^3$ , se estende de 5 a 9 km de altitude, enquanto a positiva, com 3 C e  $1,27 \text{ nC/m}^3$ , de 2 a 5 km.

Os argumentos para os valores acima são os seguintes: o máximo campo elétrico medido a partir de radiação VHF (alta frequência) da descarga se dá em duas regiões preferenciais. A primeira é no ponto inicial de ruptura da descarga nuvem-solo e o segundo nas rupturas de descargas intranuvem. Suas altitudes médias são de, respectivamente, 5 e 9 km [21]. Como tais valores máximos de

campo elétrico devem ocorrer na interface entre camadas de carga oposta, estabelecem-se as posições para a interface da região da célula de tempestade e das camadas com maior valor de carga. Os valores limites de 2 e 12 km de altitude são assumidos como boa aproximação para uma nuvem de tempestade. Ademais, o valor de 10 km de diâmetro é típico de medições com radares. Já os valores das cargas nas camadas negativas e positivas são condizentes com a ordem de grandeza apresentada na literatura para tais regiões [7].

### 3.2.3 Formulação das grandezas elétricas envolvidas no problema

Como descrito em [7], percebe-se que a nuvem de tempestade modelada possui simetria axial e tem o solo, cujo potencial deve ser sempre nulo, como única condição de fronteira. Ademais, o valor das cargas é conhecido e fixo e as posições destas são constantes. O potencial elétrico em qualquer ponto do domínio pode ser obtido pela equação de Poisson, dada por [22]:

$$\nabla^2\phi = -q/\varepsilon, \quad (1)$$

em que  $\phi$  é o potencial elétrico [V],  $q$  é carga elétrica [C] e  $\varepsilon$  é a permissividade elétrica do meio [F/m]. Já o campo elétrico em qualquer direção é descrito por [22]:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi, \quad (2)$$

em que  $E$  é o campo elétrico.

Escolheu-se, assim como em [7], o Método da Simulação de Cargas (CSM, do inglês *Charge Simulation Method*) na solução analítica proveniente da Equação (1) para o problema das cargas elétricas pontuais presentes na nuvem de tempestade. O CSM consiste na resolução, a partir das  $n$  cargas presentes no domínio, de um sistema matricial linear dado por [23]:

$$PQ = \Phi \Rightarrow \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_m \end{bmatrix}, \quad (3)$$

em que  $P$  é a matriz dos coeficientes de potencial ( $m \times n$ ),  $Q$  é o vetor coluna com os valores das cargas ( $n \times 1$ ) e  $\Phi$  é o vetor coluna com os valores de potencial elétrico ( $m \times 1$ ). A matriz  $P$  é formada por coeficientes  $P_{mn}$ , dados por:

$$P_{mn} = \frac{1}{4\pi\epsilon R_{mn}}, \quad (4)$$

em que  $R_{mn}$  é a distância do ponto  $p$  até a carga  $Q_n$ , como ilustrado na Figura 3.3. Caso a matriz a ser determinada seja  $Q$ , deve-se calcular a inversa da matriz  $P$  e determinar:

$$Q = P^{-1} \Phi \Rightarrow \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

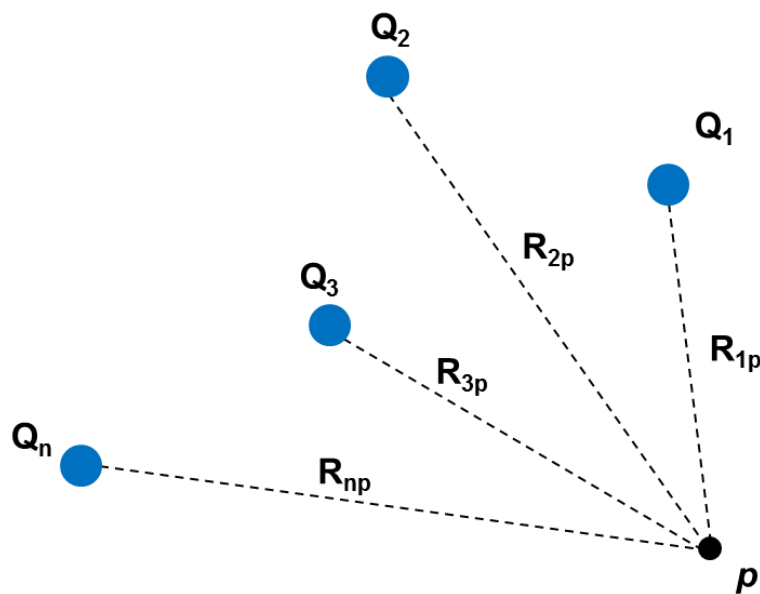


Figura 3.3 – Esquema para o cálculo do potencial em um ponto  $p$  devido à presença de cargas elétricas pontuais - baseado em [23]

Destaca-se que o Método das Imagens, como apresentado em [22], deve ser aplicado ao problema eletrostático. Neste caso, supõe-se o solo como um condutor elétrico perfeito – CEP, como apresentado na Figura 3.4, e calculam-se duas matrizes: a primeira,  $P_1$ , referente às cargas reais acima do solo e a segunda,  $P_2$ , alusiva às imagens das cargas. As cargas imagem possuem valor igual, mas de sinal contrário às reais. Assim, a matriz  $P$ , apresentada nas Equações (3) e (5), é descrita como:

$$P = P_1 - P_2 \quad (6)$$

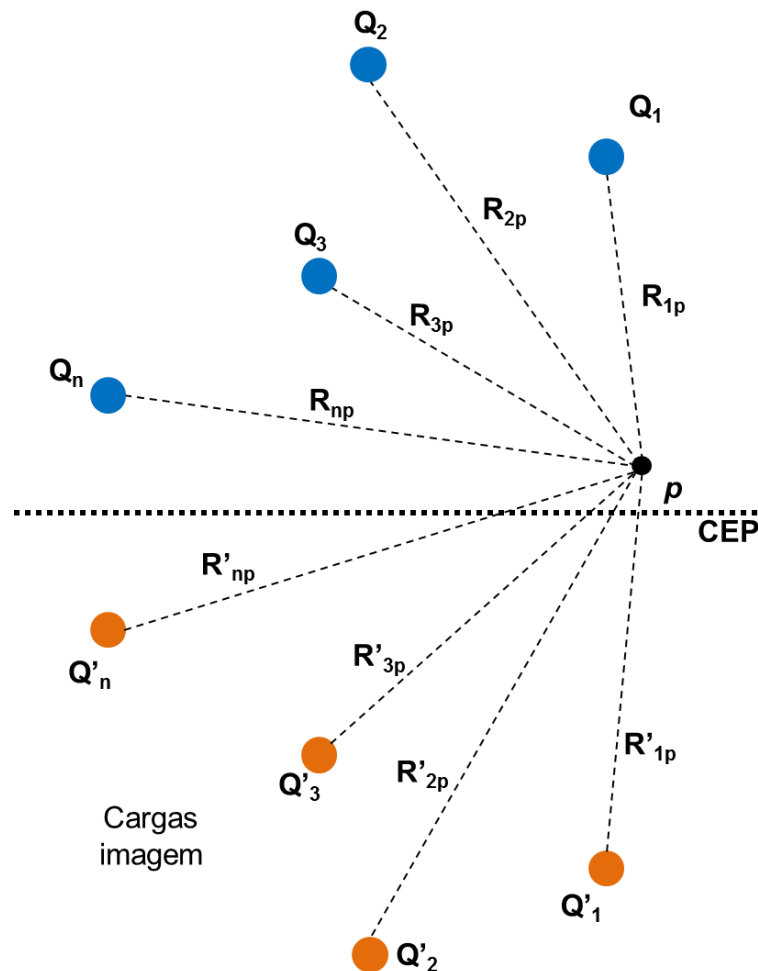


Figura 3.4 – Esquema para o cálculo do potencial em um ponto  $p$  considerando o efeito das imagens

### **3.3 Desenvolvimento de programa para simular a nuvem de tempestade e resultados**

A Figura 3.5 apresenta o fluxograma e a Figura 3.6, a interface do programa, denominado *myThundercloud* e desenvolvido em ambiente MATLAB<sup>®</sup>, para simular o modelo de nuvem de tempestade apresentado na seção 3.2.2. Ele possui como parâmetros de entrada os pontos de medição desejados no eixo cartesiano, dados do raio da nuvem e célula de tempestade e altitude das regiões de carga da nuvem de tempestade. Ademais, pode-se escolher o valor da carga de cada região e o seu distanciamento/discretização. Desenvolveram-se duas versões do programa, sendo uma sem e outra com a presença da camada da ionosfera. Desta forma, pode-se avaliar se as cargas da ionosfera no domínio computacional são importantes na distribuição de potencial e campo elétrico no solo até o topo da nuvem de tempestade, regiões de interesse deste trabalho. Destaca-se que o programa final considera a presença da ionosfera, ainda que sua influência para a região de interesse deste trabalho seja desprezível. Os resultados que levam a essa conclusão e a comparação entre os casos com e sem a camada da ionosfera são apresentados no Apêndice A.

O tempo de processamento dos potenciais elétricos ao longo do ambiente varia entre 5 a 20 minutos dependendo da extensão da região avaliada. Este tempo é obtido em uma máquina com processador Intel<sup>®</sup> Core™ i5-4590, processador gráfico integrado Intel<sup>®</sup> HD Graphics 4600 e 8 GB de memória RAM com sistema operacional Microsoft Windows 7 Ultimate 64 bits.

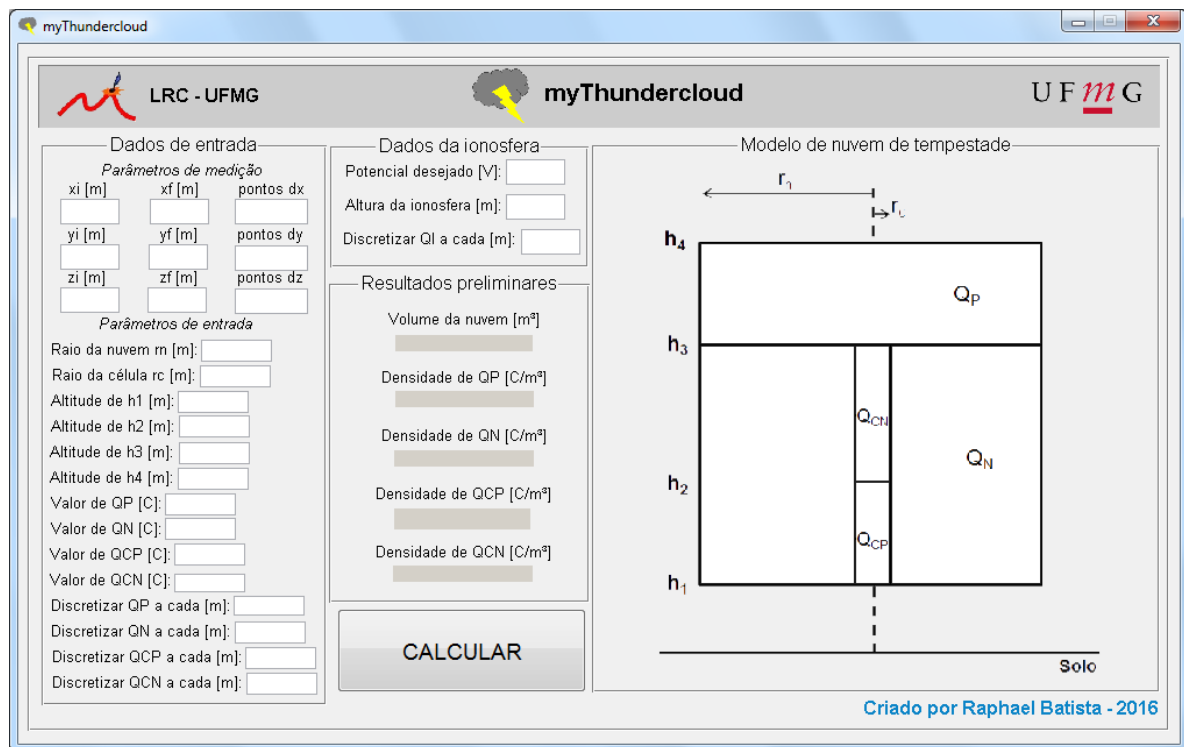


Figura 3.5 – Interface do programa de nome *myThundercloud* desenvolvido para simular o modelo escolhido de nuvem de tempestade

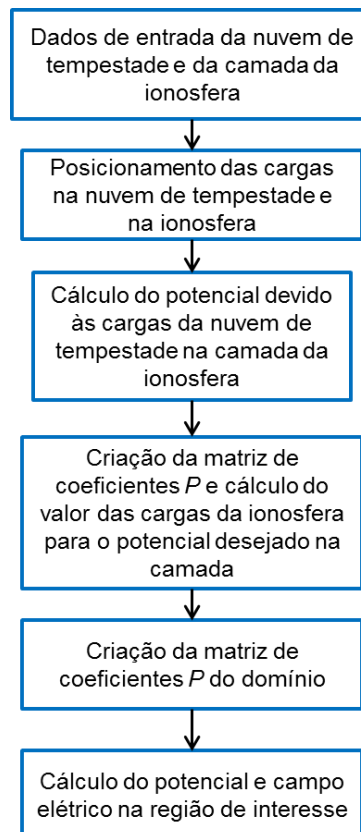


Figura 3.6 – Fluxograma do programa *myThundercloud* desenvolvido com a presença de cargas para representar a camada da ionosfera

Considerou-se uma distribuição uniforme de cargas pontuais para cada camada da nuvem de tempestade. Utilizou-se uma carga a cada 100 m para as camadas superior positiva, exterior negativa e, quando presente, para a ionosfera, e a cada 10 m para a camada interna positiva e negativa, como apresentado na Figura 3.7. Sua visualização tridimensional e em corte é apresentada na Figura 3.8. Os resultados de potencial e campo elétrico, considerando a ionosfera a 25 km de altitude e com potencial igual a 400 kV, são apresentados, respectivamente, na Figura 3.9 e Figura 3.10. Destaca-se que as distâncias utilizadas na simulação são próximas ao ponto de medição de campo elétrico do MCS, de 50 m, e ao local da câmera de vídeos ultrarrápida, de 700 m [6]. As outras distâncias escolhidas, de 2,5 e 5 km, permitem avaliar o potencial e campo elétrico em regiões mais afastadas do ponto de incidência da descarga atmosférica.

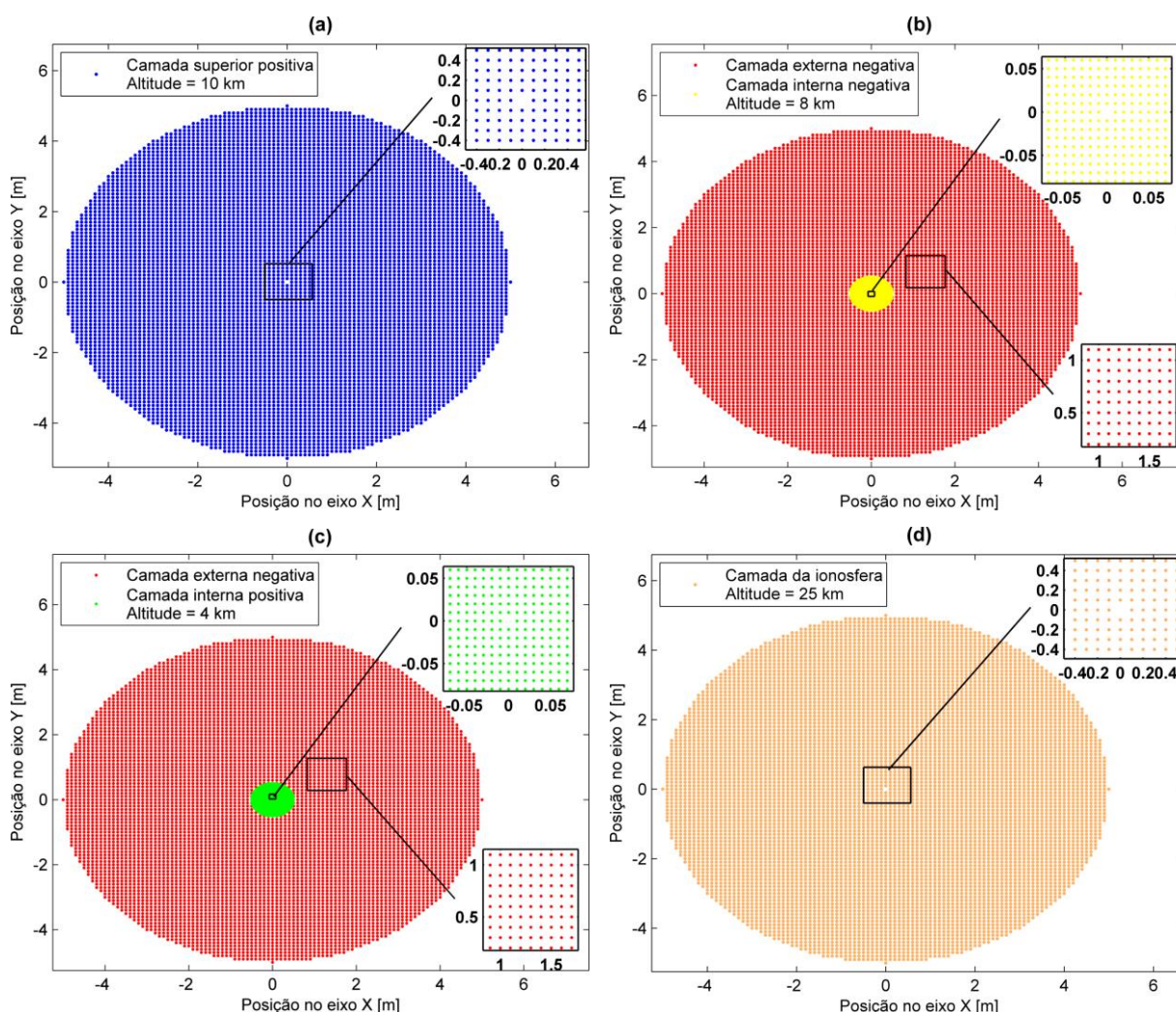


Figura 3.7 – Distribuição uniforme de cargas utilizadas para simulação, em que (a) é a camada superior positiva, (b) a camada exterior e interior negativa, (c) a camada exterior negativa e interior positiva e (d) a camada da ionosfera

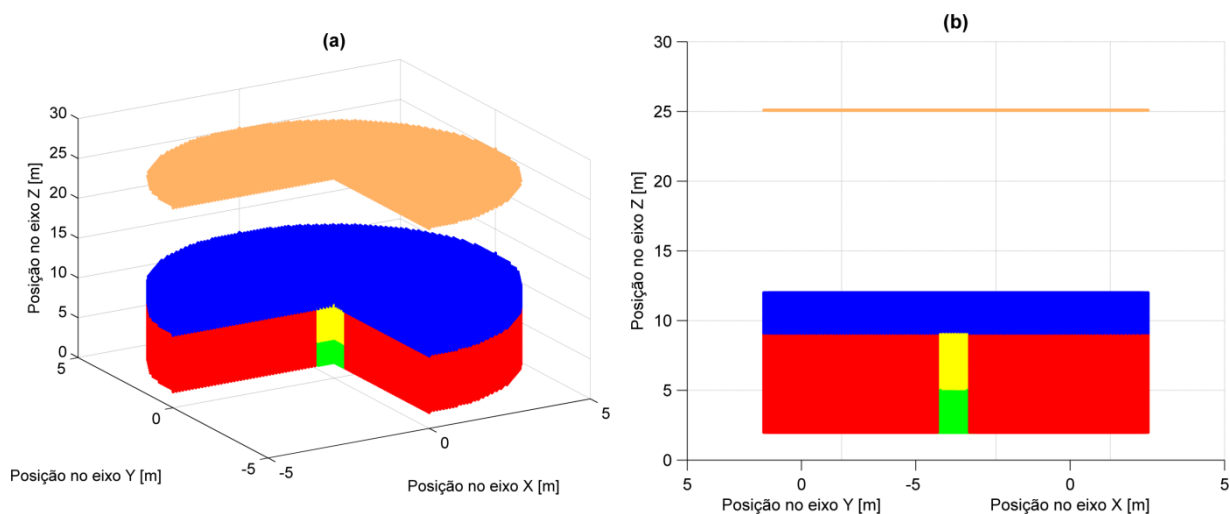


Figura 3.8 – Visualização tridimensional e em corte das cargas da nuvem de tempestade simuladas

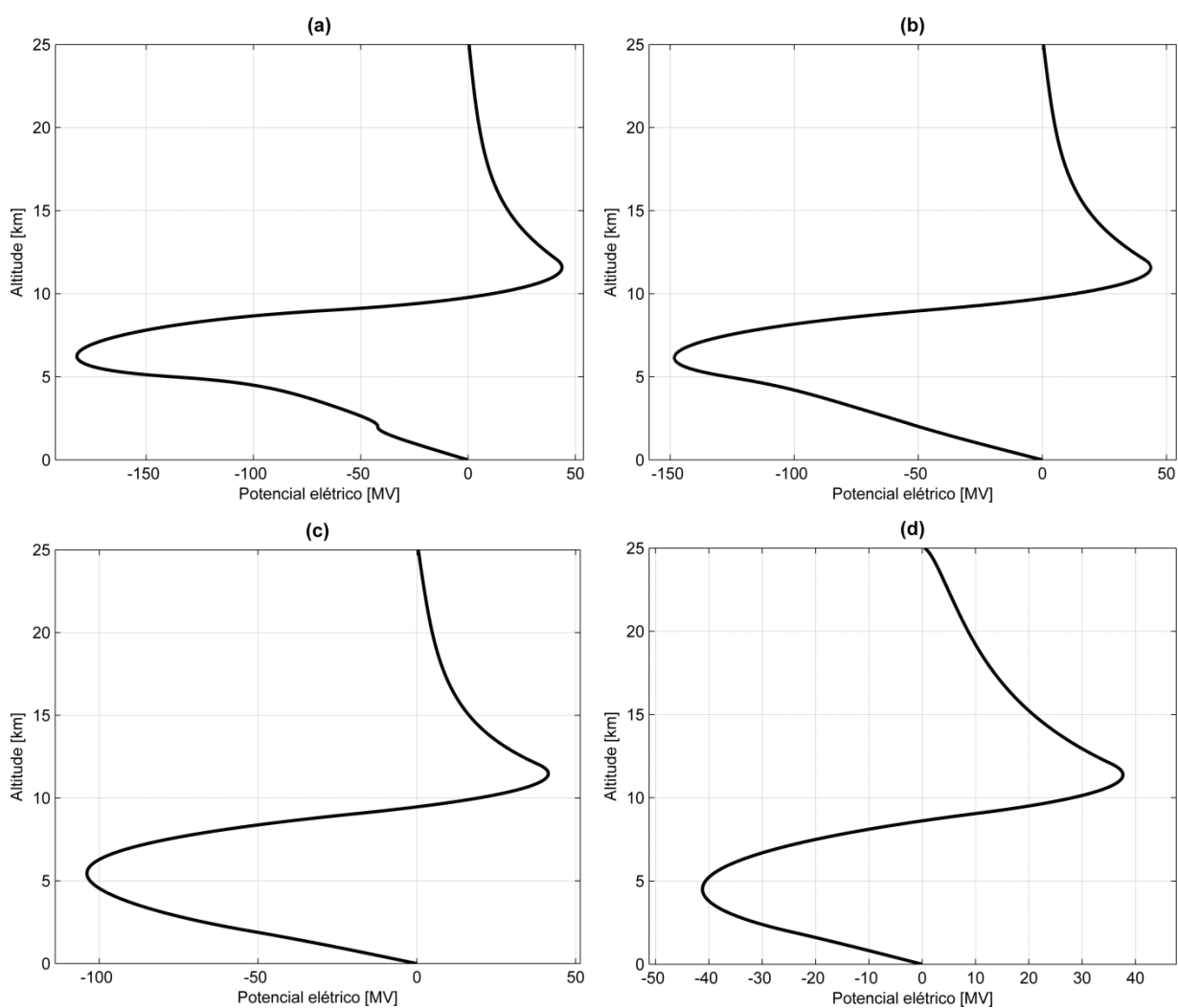


Figura 3.9 – Distribuição de potencial elétrico, considerando a presença da ionosfera à 25 km de altitude, para distâncias iguais a (a) 50, (b) 700, (c) 2500 e (d) 5000 m do eixo axial da nuvem de tempestade

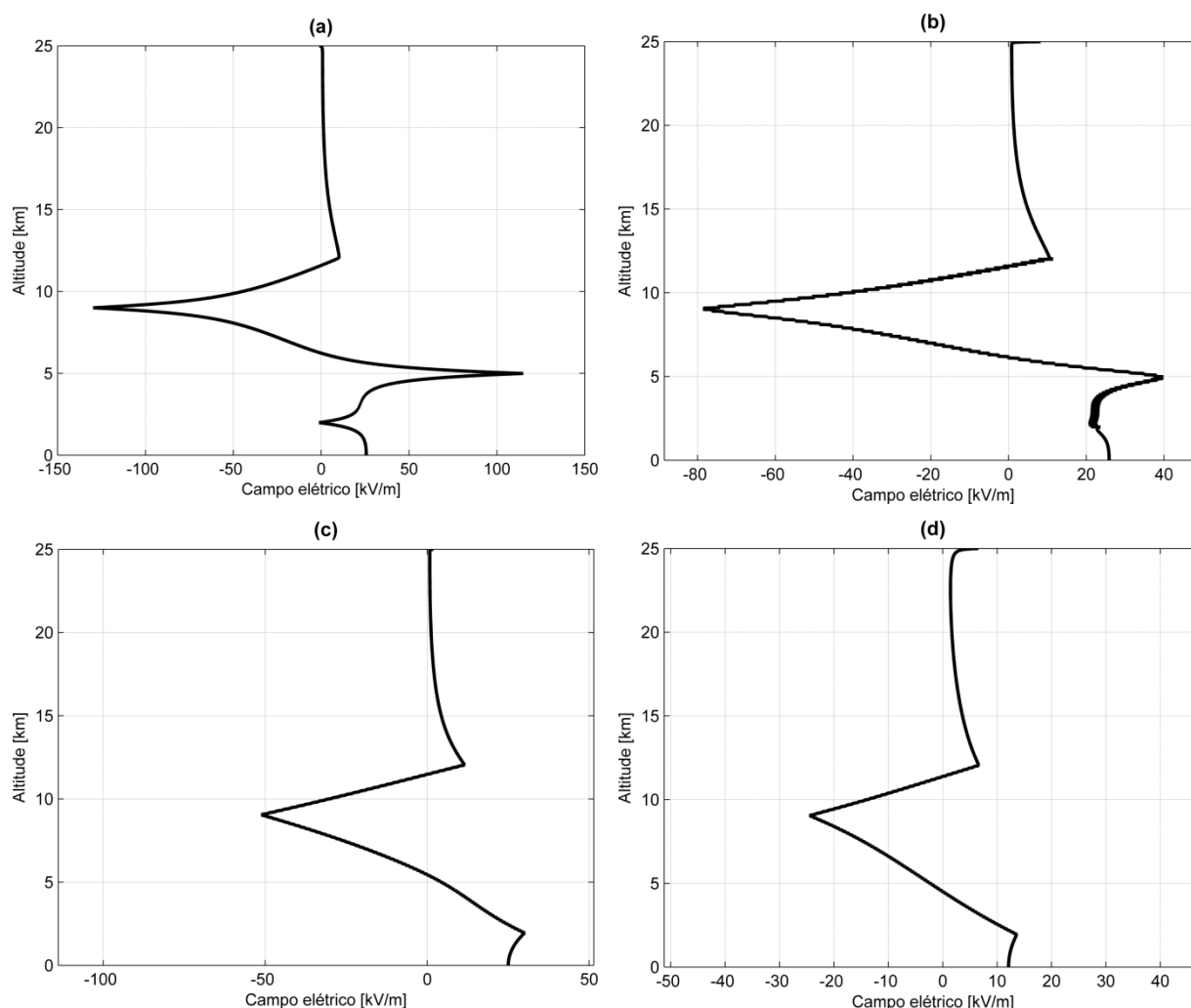


Figura 3.10 – Distribuição do campo elétrico, considerando a presença da ionosfera à 25 km de altitude, para distâncias iguais a (a) 50, (b) 700, (c) 2500 e (d) 5000 m do eixo axial da nuvem de tempestade

Percebe-se da Figura 3.9 (a) que o potencial elétrico possui mudanças de comportamento nas mesmas altitudes em que há a mudança de camada de cargas – 5 e 9 km, e na base e topo da nuvem de tempestade – 2 e 12 km. Tal aspecto é evidenciado na distribuição de campo elétrico na Figura 3.10 (a), que representa a derivada do potencial elétrico. Percebe-se que os pontos de maior campo elétrico são os de altitudes iguais a 5 e 9 km, em conformidade à [7]. Estes pontos, respectivamente, correspondem às origens das descargas nuvem-solo e intranuvem. Observa-se o mesmo comportamento descrito para o potencial e campo elétrico nos itens (b), (c) e (d) da Figura 3.9 e Figura 3.10. Destaca-se que, nestes itens, pode-se perceber a mudança da tendência das curvas ao se aproximar da camada da ionosfera, o que é bem evidente no campo elétrico a 5 km de distância devido a

menor influência das cargas da nuvem de tempestade em regiões mais distantes. Por fim, destaca-se que o perfil de potencial e campo elétrico é similar ao apresentado no trabalho de Mazur e Ruhnke [7].

### **3.4 Considerações finais**

Neste capítulo, apresentou-se o modelo de nuvem de tempestade para o cálculo posterior da descarga atmosférica nuvem-solo e a formulação do CSM para a resolução do problema. Foram desenvolvidos programas baseados no CSM por cargas pontuais com e sem a presença da ionosfera, como apresentado no Apêndice A.

Percebe-se que os resultados são compatíveis com o artigo de Mazur e Ruhnke [7], o que, de certa forma, valida o uso do programa desenvolvido neste capítulo para a simulação da evolução do canal da descarga nuvem-solo, cuja formulação é apresentada no próximo capítulo.

# Capítulo 4

## IMPLEMENTAÇÃO DE CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA ESTIMATIVA DA EVOLUÇÃO DO CANAL DE UMA DESCARGA NUVEM-SOLO PELO MODELO DO *LEADER* BIDIRECIONAL

---

---

### 4.1 Introdução

Neste capítulo, apresentam-se a formulação e a metodologia para se estimar a evolução do canal de uma descarga nuvem-solo a partir do modelo do *leader* bidirecional. Comparam-se os resultados do programa desenvolvido com aqueles apresentados em [7] para fim de validação da qualidade das simulações realizadas.

## 4.2 A evolução do canal precursor da descarga atmosférica pelo modelo do *leader* bidirecional

### 4.2.1 Considerações sobre a evolução do canal de uma descarga atmosférica

A partir da representação da nuvem de tempestade apresentada no Capítulo 3, pode-se desenvolver um algoritmo para estimar o desenvolvimento do canal de uma descarga atmosférica, seja de percurso nuvem-solo ou intranuvem. O programa que implementa o algoritmo deve levar em conta aspectos do modelo do *leader* bidirecional e, também, gerar resultados compatíveis com resultados de medição de grandezas associadas a descargas encontradas na literatura, notadamente o campo elétrico.

Os parâmetros necessários para uma consistente representação da evolução do canal da descarga atmosférica no algoritmo computacional são a dimensão do raio do envelope de corona e a velocidade de propagação das extremidades do canal ionizado, além do comprimento dos passos de evolução do canal da descarga negativa.

O raio do núcleo do canal ionizado, como apresentado em [8], varia, em média, de 1 a 2 cm. Entretanto, a carga armazenada neste núcleo cria um campo elétrico, o qual é capaz de exceder a rigidez dielétrica do ar no local. Por consequência, as cargas são deslocadas para fora do núcleo e criam uma camada de íons gerados pelo efeito corona ao redor do canal [24]. Como visto em [25], acredita-se que a carga armazenada no canal se concentra quase em sua totalidade na camada de íons ao redor do núcleo do canal. Adotou-se como 1 m o valor do raio do canal, seguindo a mesma hipótese de [7].

Supõe-se uma velocidade média e constante de  $10^5$  m/s para as extremidades superiores e inferiores do canal, e um comprimento de passo igual a 50 m, como sugerido em [7]. Logo, o intervalo de tempo para cada passo é de 0,5 ms.

## **4.2.2 Conceitos utilizados nas simulações a partir do modelo do leader bidirecional**

Com o objetivo de mostrar todos os conceitos e ideias utilizadas nas simulações, apresenta-se a seguir as considerações feitas nos cálculos deste trabalho a partir do modelo do *leader* bidirecional. Informações a respeito da imposição de potenciais nas regiões desejadas são apresentadas para cada caso avaliado neste texto. Ademais, destaca-se que o potencial apresentado nas curvas de cor verde, nas figuras a seguir, é o utilizado nas matrizes de potencial nas simulações do CSM.

### **Solo CEP plano e com uso do método das imagens**

As simulações que consideram o solo como um plano e utilizam o método das imagens para a imposição do potencial nulo seguem as etapas mostradas a seguir. Os valores de potencial elétrico apresentados nas figuras não condizem com os usados nas simulações e servem apenas para ilustrar o raciocínio utilizado.

Uma descarga negativa nuvem-solo se desenvolve por passos. Isto permite a adoção da hipótese de eletrostática nos intervalos entre os passos, o que admite o uso do CSM para o cálculo de parâmetros elétricos do fenômeno.

As cargas da nuvem de tempestade têm seu valor e posição conhecidos e imutáveis para o problema avaliado (Seção 3.2.3), sendo que o mesmo ocorre para a camada da ionosfera quando esta é considerada. Dessa forma, os potenciais elétricos estabelecidos pela nuvem de tempestade em qualquer ponto do domínio são constantes e funcionam como dados de entrada para a estimativa das grandezas no canal de descarga em formação ou nas estruturas próximas. Como apresentado em [7], pode-se considerar o canal da descarga atmosférica como um condutor, ou seja, utilizar a aproximação potencial constante para o cálculo do potencial na superfície do *leader*. O potencial do canal é calculado como a média aritmética dos potenciais gerados, ao longo de seu comprimento, no ambiente devido às cargas da nuvem de tempestade.

Como a análise se baseia na hipótese eletrostática, o potencial pode ser calculado por superposição.

### a) Simulação da configuração básica: canal descendente sobre solo plano

Para o caso da simulação da evolução do canal da descarga negativa nuvem-solo, o potencial final na superfície deste é dado como a média do potencial criado pelas cargas presentes na nuvem de tempestade em sua região. Como há apenas as cargas da nuvem de tempestade, estas criam uma espécie de potencial de fundo. Desta forma, o potencial no canal da descarga nuvem-solo deve levar este potencial de fundo em conta no seu cômputo.

Seja o potencial final do canal da descarga nuvem-solo o apresentado pela linha vertical na Figura 4.1. Como o potencial devido às cargas da nuvem de tempestade na região é dado pela curva azul da Figura 4.1, deve-se calcular um potencial das cargas induzidas no canal da descarga nuvem-solo (curva verde), de tal forma que este somado ao potencial criado pela nuvem de tempestade resulte no potencial final.

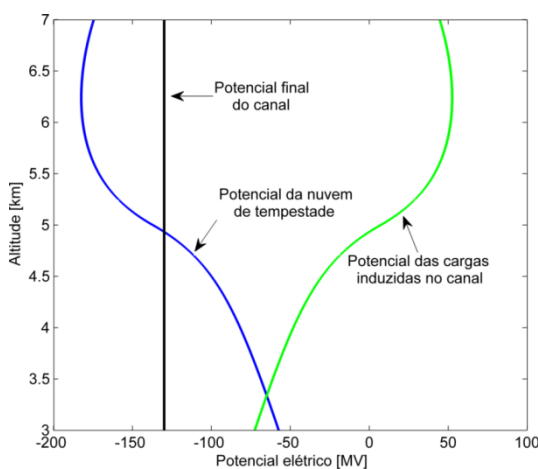


Figura 4.1 – Ilustração esquemática para o raciocínio de cálculo do potencial no canal da descarga nuvem-solo para o caso de um solo plano e CEP

Como o conceito da superposição é aplicado ao cálculo, o potencial das cargas induzidas no canal da descarga nuvem-solo, dado pela curva verde da Figura 4.1, é igual ao potencial final desejada (linha preta) menos o gerado pela nuvem de tempestade (curva azul).

## b) Simulação com inclusão de torre sobre solo plano, com/sem canal ascendente e com/sem ramificação no canal da descarga nuvem-solo

A Figura 4.2 apresenta duas ilustrações para a compreensão do raciocínio utilizado para o caso com torre, com ou sem canal ascendente e ramificação.

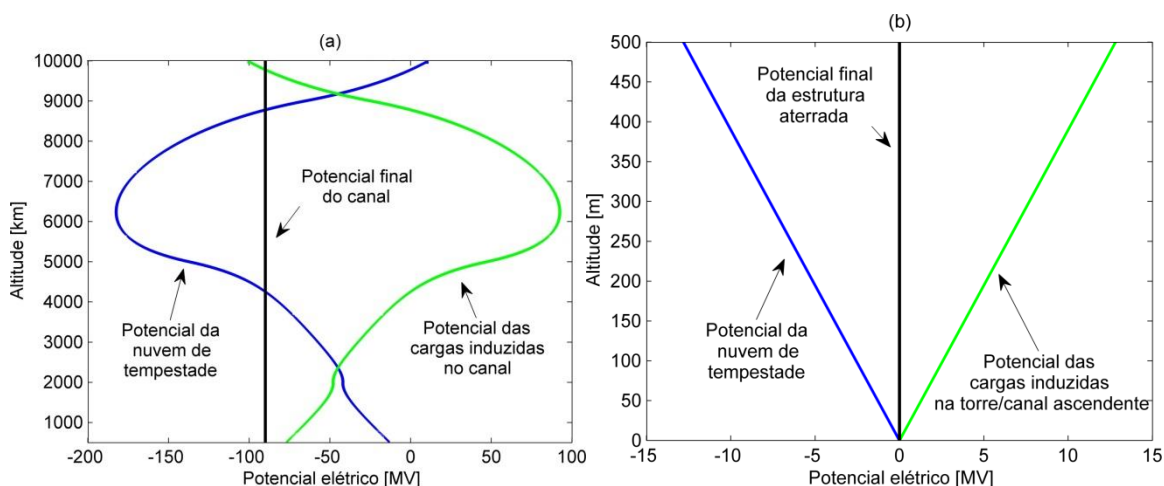


Figura 4.2 - Ilustração esquemática para o raciocínio de cálculo do potencial (a) no canal da descarga nuvem-solo e (b) na torre/canal ascendente para o caso de um solo plano e CEP

O raciocínio do potencial no canal da descarga nuvem-solo é o mesmo utilizado para o caso sem torre instrumentada. Assim, o potencial das cargas induzidas no canal da descarga nuvem-solo, dado pela curva verde da Figura 4.2 (a), é igual ao potencial final desejado (linha preta) menos o gerado pela nuvem de tempestade (curva azul). O mesmo raciocínio do canal da descarga nuvem-solo é utilizado para suas ramificações. Neste caso, a única consideração a ser feita é que o potencial final no canal e na ramificação deve ser o mesmo. Assim, o potencial final será, simultaneamente, a média do potencial criado pela nuvem de tempestade no canal da descarga nuvem-solo e na ramificação.

Para o caso da torre instrumentada e/ou canal ascendente, o potencial final desejado é o mesmo do solo, ou seja, nulo. Assim, deve-se calcular um potencial de cargas induzidas na torre/canal ascendente igual ao potencial final desejado menos o criado na região devido às cargas da nuvem de tempestade. Como o potencial final é nulo, como na linha preta da Figura 4.2 (b), o potencial das cargas induzidas na torre/canal ascendente (curva verde) será o negativo do potencial criado pelas cargas da nuvem de tempestade (curva azul).

Com a introdução da representação da torre sobre o solo, perde-se a simetria perfeita das posições das cargas imagem obtida com a condição sem a presença da estrutura aterrada. Assim, o seu uso, a princípio, para o caso com torre/canal ascendente é inadequado, pois o posicionamento das cargas imagem é diferente daquele sem estrutura aterrada. Após comparação de seus resultados com os obtidos a partir da técnica apresentada a seguir para o cômputo do relevo, percebeu-se uma diferença desprezível entre as suas soluções. Desta forma, optou-se por utilizar o emprego do método das imagens para os casos com estruturas aterradas pela proximidades de seus resultados com aqueles obtidos por uma aproximação mais fiel da condição avaliada.

### **Solo CEP e sem usar o método das imagens**

#### **a) Simulação de canal descendente considerando relevo real**

Uma alternativa ao método das imagens é utilizar cargas que imponham o potencial nulo na região do solo. Para isso, estas cargas devem se localizar um pouco abaixo da linha do solo a fim de evitar oscilações no valor do potencial ao nível da superfície do solo, que deve ser nulo. Tal consideração é ilustrada na Figura 4.3.

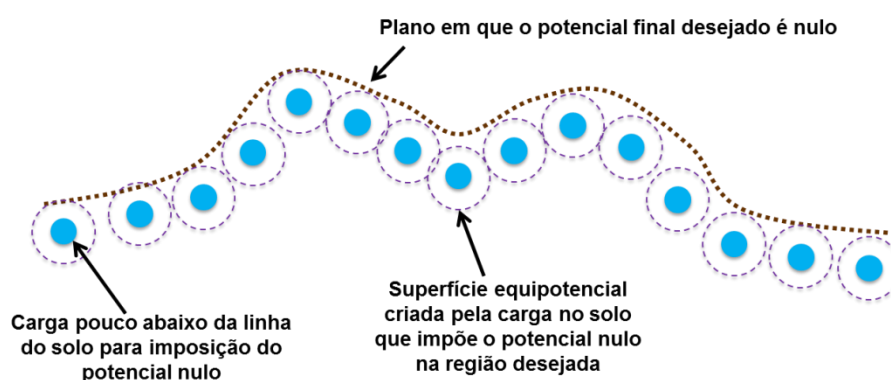


Figura 4.3 – Ilustração da posição das cargas pontuais no solo para a manutenção do potencial nulo na região desejada

Esse recurso dispensa o método das imagens e diminui o custo computacional do problema, pois o número de cargas utilizadas para as simulações torna-se menor. Ademais, pode-se aproximar o relevo do solo através deste método.

Esta característica é muito interessante do ponto de vista prático. Tal abordagem permite a compreensão do efeito do relevo do solo e uma estimativa das cargas induzidas neste devido ao fenômeno atmosférico. Além disso, estações como MCS têm um relevo do solo próximo irregular ou diferente de um plano.

A Figura 4.4 apresenta o potencial elétrico criado pelas cargas da nuvem de tempestade, pelas cargas induzidas no solo e o final constituído pela soma dos dois.

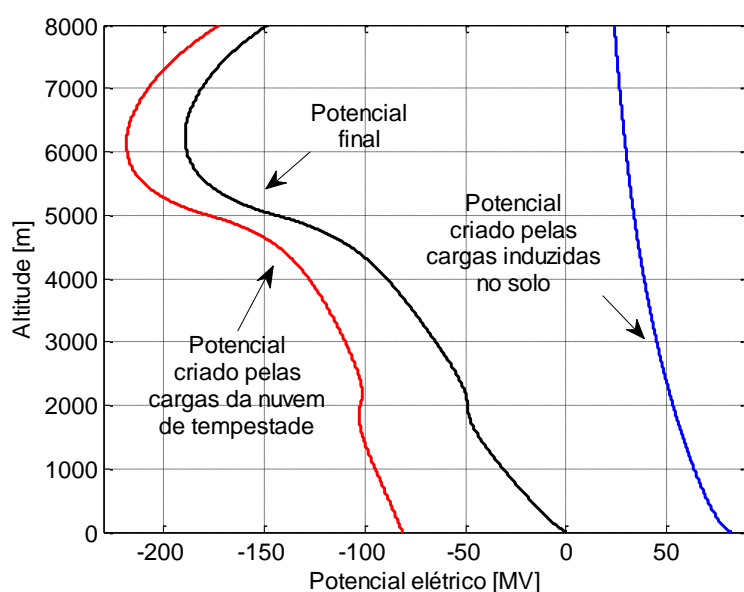


Figura 4.4 – Potencial elétrico devido à nuvem de tempestade a 1 m de distância do eixo axial antes e após a consideração do efeito do solo

A ideia para atingir este objetivo consiste em seguir os seguintes passos: primeiro, deve-se fixar cargas pontuais na região do solo e calcular o potencial devido à nuvem de tempestade, sem método das imagens, nestes pontos. Como o potencial final deve ser nulo após a superposição, o potencial criado pelas cargas induzidas deve ser o oposto do criado pelas cargas da nuvem de tempestade.

Com o valor calculado das cargas induzidas no solo e sem utilizar o método das imagens, pode-se obter o potencial elétrico em qualquer região como a superposição do potencial criado pelas cargas da nuvem de tempestade e daquelas presentes no solo, cujo processo é similar ao ilustrado na Figura 4.4.

Para o caso da presença de torre/canal ascendente ou ramificação no canal da descarga nuvem-solo, o mesmo raciocínio apresentado para as simulações com o método das imagens deve ser seguido. A exceção é, além de não usar o método das imagens nas simulações, utilizar o valor oposto ao criado pela soma dos

potenciais das cargas pontuais da nuvem de tempestade e aquelas referentes ao solo. Portanto, o potencial de fundo, neste caso, será o gerado pela nuvem de tempestade somado ao criado pelas cargas à altura do solo. Os aspectos relativos às simulações que utilizam estes conceitos no trabalho são mais bem detalhados no item a seguir.

### **b) Simulação com inclusão de torre sobre solo considerando o relevo real**

O potencial nulo na superfície do solo é uma condição de contorno do problema que independe do relevo do solo. Tal condição pode ser alcançada por meio de uma representação fictícia equivalente de cargas distribuídas no solo a certa profundidade, que seja capaz de reproduzir o potencial na superfície deste resultante do efeito das cargas na nuvem e das cargas superficiais induzidas no solo no problema real.

Apresenta-se na Figura 4.5 um fluxograma simplificado com os principais passos para a consideração do relevo do solo no problema avaliado

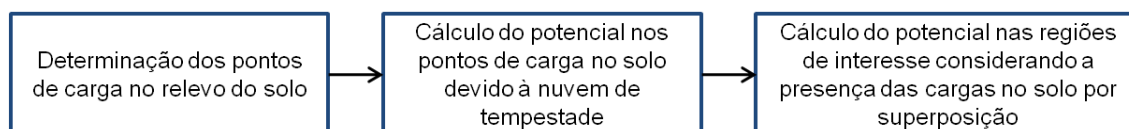


Figura 4.5 – Fluxograma com a ideia para consideração do relevo do solo nas simulações

Com o objetivo de detalhar o processo, considera-se na Figura 4.6 o relevo correspondente ao MCS. Destaca-se, em vermelho, a presença da torre instrumentada e dos pontos de medição de campo elétrico ao nível do solo ilustrados na Figura 4.6.

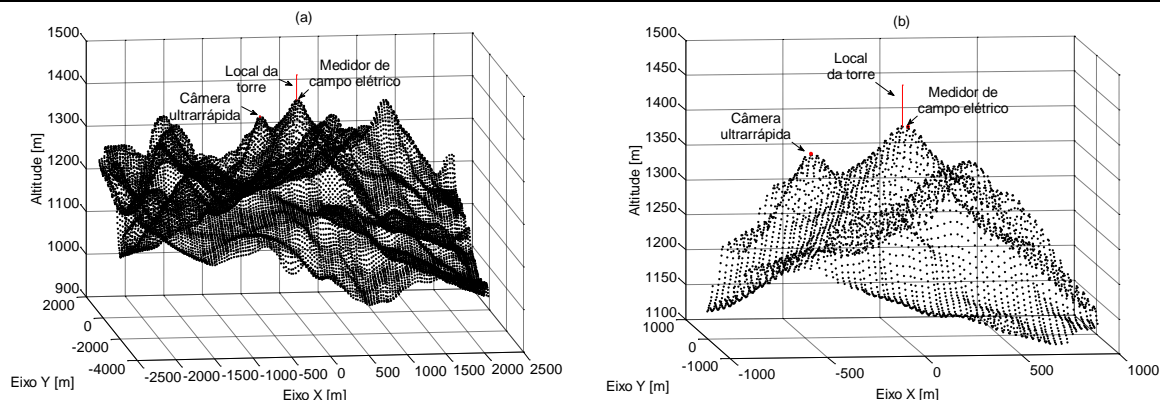


Figura 4.6 – (a) Relevo correspondente a região do MCS, (b) com destaque e foco à torre instrumentada e a pontos de medição de campo elétrico ao nível do solo

Devido ao elevado número de pontos apresentados na Figura 4.6 (pontos a cada, aproximadamente, 33 m de distância) e a limitações computacionais, optou-se por simplificar o relevo para simulação da seguinte forma: manteve-se o terreno original até um raio de 1,5 km da torre e realizou-se uma extensão do mesmo até um valor de raio igual a 5 km, resultando em uma altura de 1140 m nesta região, como ilustrado na Figura 4.7. A altura nesta região é obtida pela média das alturas presentes fora do raio interno de 1,5 km no relevo original. Destaca-se que os dados originais do terreno do MCS contemplam uma área quadrada de 4 km<sup>2</sup> (2 km de largura por 2 km de comprimento). A justificativa para a extensão do relevo até 5 km de raio é a possibilidade de ver a influência da evolução da descarga nuvem-solo em uma região de solo com dimensão igual à da nuvem de tempestade.

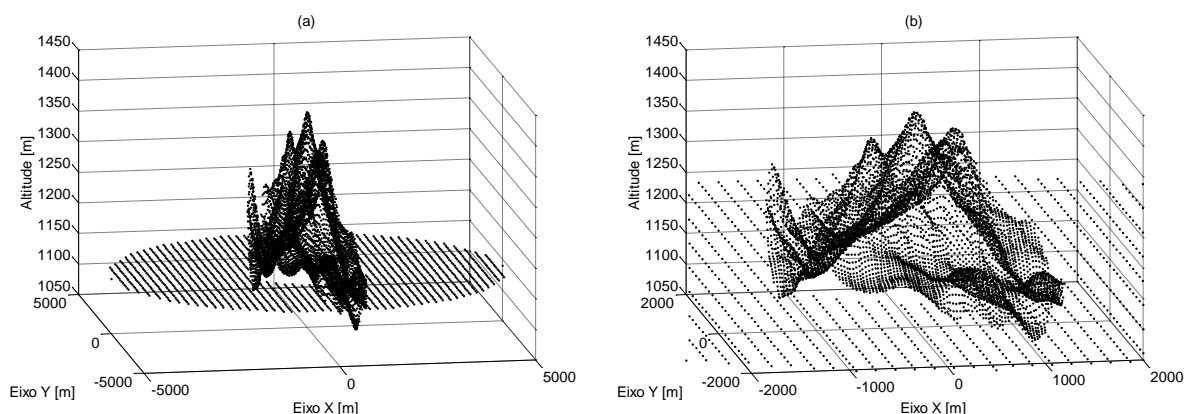


Figura 4.7 – (a) Representação do solo do MCS utilizado nas simulações, (b) com foco na região com o relevo original

Na representação utilizada, em função da distância entre as cargas no solo, para minimizar as oscilações no potencial nulo em sua superfície, as cargas se localizam 31 m abaixo do solo na região interior ao raio de 1,5 km e 100 m abaixo, de 1,5 a 5 km de raio. O potencial elétrico devido, exclusivamente, à nuvem de tempestade nas cargas pontuais no solo é apresentado na Figura 4.8.

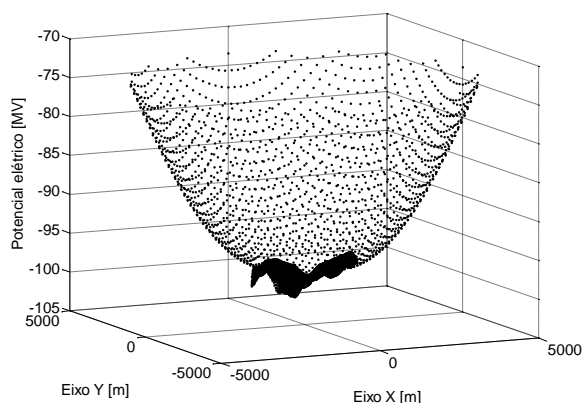


Figura 4.8 – Potencial elétrico devido à nuvem de tempestade no relevo final considerado

Destaca-se que o solo apresentado na Figura 4.7 é o utilizado em todas as simulações presentes neste trabalho que contemplam o relevo do solo.

### **Descarga de retorno**

A descarga de retorno é o processo que ocorre após o *attachment* do canal da descarga nuvem-solo com o solo ou estrutura aterrada. De acordo com o modelo do *leader* bidirecional, o fim do processo da descarga de retorno resulta em um potencial nulo ao longo de todo o canal da descarga nuvem-solo e suas ramificações, na torre e/ou canal ascendente [26].

Para alcançar o objetivo de impor o potencial nulo nas regiões desejadas ao final do processo da descarga de retorno, uma condição de contorno deve ser desenvolvida para este fim. Destaca-se que, ao longo de todo o processo de evolução do canal da descarga nuvem-solo e da descarga de retorno, apenas a nuvem de tempestade permanece com cargas imutáveis. Logo, o potencial no ambiente devido à nuvem de tempestade também é constante ao longo de todos os processos.

Seguindo o mesmo raciocínio das condições até aqui apresentadas, obtidas pelo uso da superposição, a condição de contorno que impõe o potencial nulo após a descarga de retorno consiste no valor negativo do potencial criado pela nuvem de tempestade ao longo das regiões de interesse, como o canal da descarga nuvem-solo e estruturas aterradas. Desta forma, com o uso da superposição, a soma deste potencial com o devido apenas a nuvem de tempestade resulta no potencial nulo desejado nas regiões de interesse.

### 4.2.3 Formulação das grandezas elétricas envolvidas no problema

As cargas induzidas no canal ou ramificação e em uma estrutura aterrada são calculadas a partir do CSM e dadas como:

$$Q = P^{-1} \Phi \Rightarrow \begin{bmatrix} Q_{1c} \\ \vdots \\ Q_{ac} \\ Q_{(a+1)t} \\ \vdots \\ Q_{bt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1a} & P_{1(a+1)} & \cdots & P_{1b} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{a1} & \cdots & P_{aa} & P_{a(a+1)} & \cdots & P_{ab} \\ P_{(a+1)1} & \cdots & P_{(a+1)a} & P_{(a+1)(a+1)} & \cdots & P_{(a+1)b} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{b1} & \cdots & P_{ba} & P_{b(a+1)} & \cdots & P_{bb} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \phi_{1c} \\ \vdots \\ \phi_{ac} \\ \phi_{(a+1)t} \\ \vdots \\ \phi_{bt} \end{bmatrix} \quad (7)$$

em que  $Q_{ic}$  são as cargas induzidas no canal,  $Q_{it}$  as cargas induzidas na estrutura aterrada e  $\phi_{ic}$  e  $\phi_{it}$ , respectivamente, o potencial devido às cargas induzidas no canal e na estrutura aterrada.

O potencial em qualquer outro ponto do domínio é determinado pela superposição das cargas da nuvem de tempestade e todas aquelas induzidas no problema, seja no canal ou qualquer estrutura aterrada. Assim, tem-se que:

$$\phi_p = \phi_s + \phi_c, \quad (8)$$

em que  $\phi_p$  é o potencial em um ponto  $p$  do ambiente,  $\phi_s$  é o potencial no ponto  $p$  devido às cargas da nuvem e  $\phi_c$  representa o potencial devido às cargas induzidas no canal da descarga, estrutura aterrada e/ou ramificações. O mesmo raciocínio apresentado acima é utilizado para o cálculo da descarga de retorno.

Percebe-se que, como indicado na Seção 2.2.3, as extremidades do *leader* só evoluem enquanto houver campo elétrico não nulo entre o último e o ambiente em sua proximidade suficiente para manter o processo de ionização.

A presença de um canal ascendente, por exemplo, originado no ápice de uma torre equivale ao aumento da altura da última. Assim, pode-se apenas aumentar a altura de uma torre instrumentada no programa ao longo das iterações para considerar o efeito de uma descarga ascendente, já que o potencial final dos dois deve ser nulo como o do solo.

A formulação apresentada anteriormente, embora seja fisicamente consistente, se diferencia do raciocínio direto do CSM por se utilizar dos conceitos de superposição. O emprego mais comum do CSM é considerar as posições fixas e os potenciais desejados de todos os objetos do domínio simultaneamente para o cálculo das cargas no canal/ramificação e estrutura aterrada a partir da Equação (5). Tal abordagem não é viável nos cálculos deste trabalho devido ao grande número de cargas pontuais consideradas na nuvem de tempestade: 6285208. Assim, a matriz de coeficientes  $P$  para o CSM seria composta pela ordem de  $10^{13}$  elementos. O MATLAB<sup>®</sup> utiliza números do tipo *double* como formato padrão, cujo tamanho é de 8 bytes. Conclui-se, portanto, que a matriz  $P$  demandaria um espaço de, aproximadamente, 294 TB de memória volátil apenas para ser alocada, o que torna tal prática inviável, principalmente quando se considera o uso de computadores com 8 GB de memória como neste trabalho.

A ideia de se utilizar os potenciais criados pelas cargas pontuais da nuvem de tempestade como entrada supera este problema. Neste caso, o número de cargas pontuais utilizado para representar a nuvem de tempestade demanda cerca de 48 MB de memória do sistema, valor irrisório ao disponível pelas máquinas. Esta abordagem do problema permite a realização da simulação, que necessita de várias resoluções de sistemas matriciais, a um custo de memória total do sistema para as condições simuladas pouco maior que 4 GB, menor que os 8 GB disponíveis para uso.

### 4.3 Desenvolvimento de programa para comparação de resultados com aqueles apresentados no artigo de Mazur e Ruhnke [7]

Desenvolveu-se um programa, denominado *myLightning* e cuja interface é ilustrada na Figura 4.9, baseado no CSM por cargas pontuais para simular o desenvolvimento da descarga atmosférica.

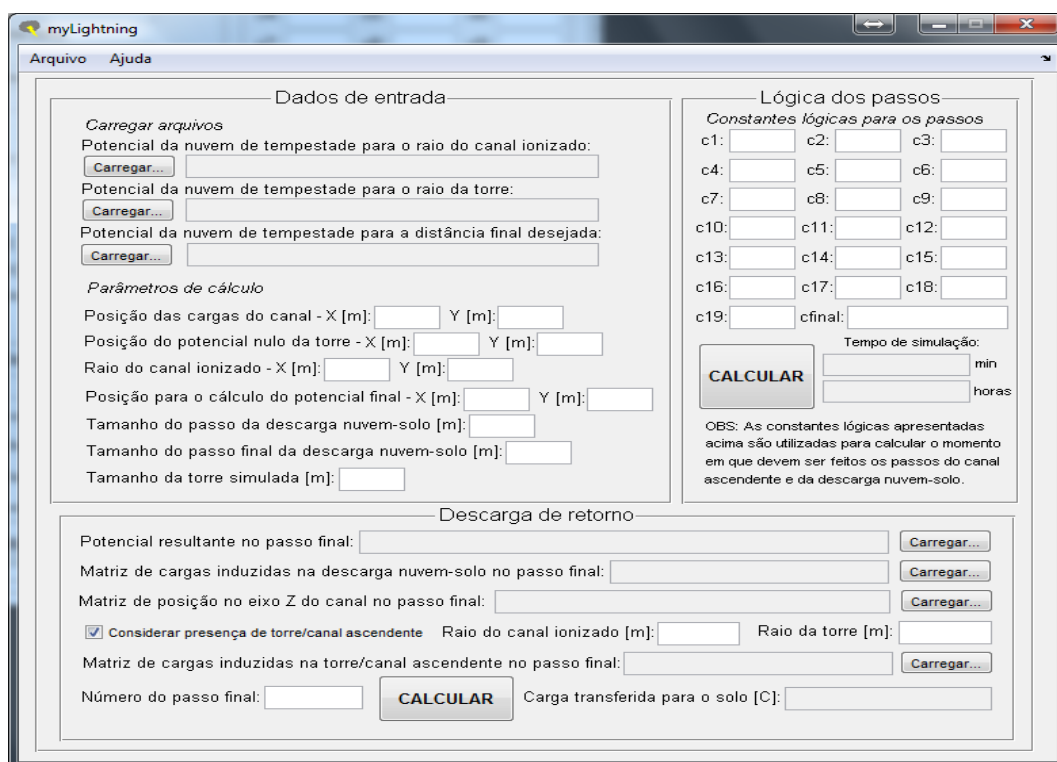


Figura 4.9 – Interface do programa *myLightning*, baseado no CSM para simulação do desenvolvimento da descarga atmosférica

Antes da apresentação dos resultados provenientes da ferramenta computacional desenvolvida, indica-se o tempo de processamento médio dos casos avaliados neste trabalho. Condições com solo plano, sem ou com a presença de ramificações, canal ascendente e/ou torre variam entre 4 e até 14 horas para o fim de suas simulações, sendo o tempo maior relacionado aos casos com maior número de variáveis consideradas no domínio computacional. Com o cômputo do relevo, a consideração das cargas induzidas no solo eleva o tempo de simulação para um período de 6 a 18 horas para sua finalização. Como no caso do *myThundercloud*, estes tempos são avaliados por uma máquina com processador Intel® Core™ i5-

4590, processador gráfico integrado Intel® HD Graphics 4600 e 8 GB de memória RAM em um sistema operacional Microsoft Windows 7 Ultimate 64 bits.

Para verificar a adequação da rotina computacional elaborada, fez-se necessário comparar seus resultados com os apresentados em [7]. Para isto, supõe-se uma descarga nuvem-solo com início a 5 km de altitude e passos de 500 m, totalizando dez passos até o contato com o solo. Considera-se um raio de 1 m para o canal de descarga e o potencial elétrico calculado na superfície do canal ionizado. Por fim, destaca-se que o canal é representado por uma carga pontual a cada metro.

Após uma análise mais atenta dos gráficos apresentados em [7], percebeu-se que o último passo ali considerado possui 450 m e não 500 m como os outros. Tal informação, que não é explícita na referência, é fundamental para que seus resultados sejam reproduzidos. A Figura 4.10 apresenta o gráfico de potencial elétrico e a Figura 4.11 a carga induzida no canal simulado.

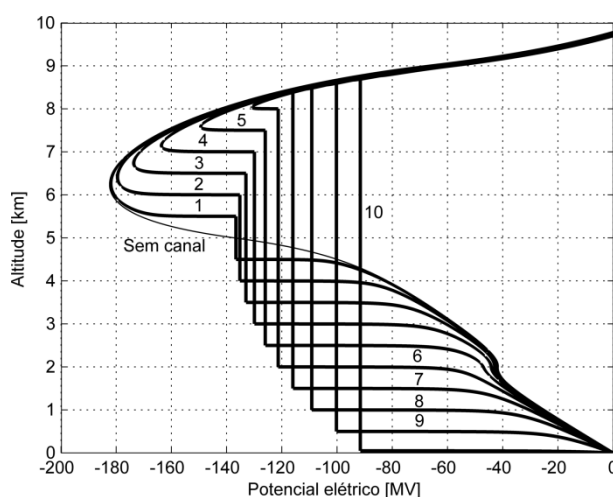


Figura 4.10 – Potencial elétrico da descarga nuvem-solo calculado à 1 m do eixo axial da nuvem de tempestade

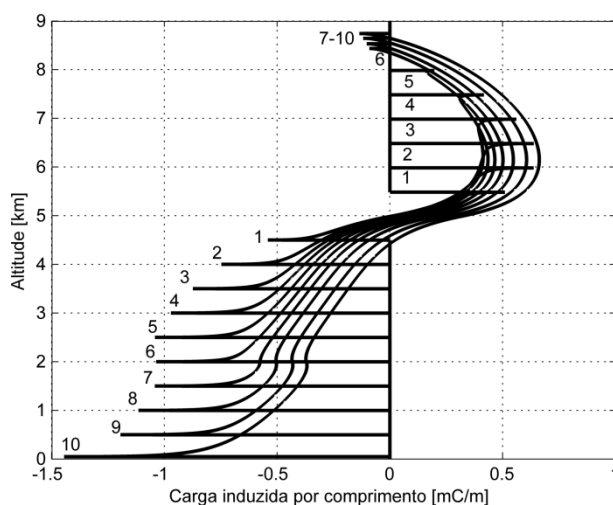


Figura 4.11 – Carga induzida por unidade de comprimento no canal da descarga nuvem-solo com 1 m de raio obtida pela média aritmética a cada 18 pontos

Percebeu-se nas simulações que as cargas obtidas diretamente pelo CSM são diferentes de [7]. Atribui-se tal diferença às discretizações distintas usadas e, por esse motivo, optou-se por apresentar na Figura 4.11 o gráfico das mesmas pela média aritmética a cada 18 pontos. As cargas obtidas diretamente pelo CSM, apresentadas na Figura 4.12, conduzem à mesma distribuição de potencial elétrico apresentada na Figura 4.10.

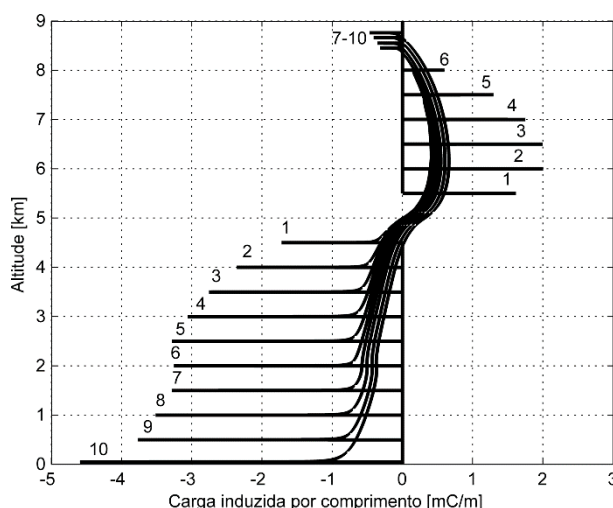


Figura 4.12 – Carga induzida por unidade de comprimento no canal da descarga nuvem-solo com 1 m de raio obtida diretamente pelo CSM

Destaca-se que a soma das cargas da extremidade negativa do passo 10 vale -1,55 C para o obtido diretamente pelo CSM e -1,54 C para o resultante da média a

cada 18 pontos, ambos similares a  $-1,55 C$  de [7]. Uma característica presente na distribuição de cargas calculada pelo programa é a mudança de sinal das cargas nos passos 7 a 10 na extremidade superior do canal. Tal comportamento é explicado pela aproximação da camada superior positiva pelo canal ionizado, o que induz cargas de sinal contrário, neste caso, negativas, na extremidade superior do canal. A mudança de sinal das cargas não é visualizada nos gráficos de [7] por ser usado um passo de 500 m.

Como o décimo passo deve tocar o solo, simulou-se tal situação no programa desenvolvido. Para representar tal situação, deve-se atentar à carga pontual mais próxima do solo. Este não pode se localizar na altitude zero, pois sua carga imagem de valor oposto se situaria na mesma posição e anularia sua atuação no momento da superposição de potenciais. Dessa forma, sua altitude deve ser pequena, mas ao mesmo tempo não pode criar uma indeterminação na Equação (4) e, conseqüentemente, o impedimento da inversão da matriz P da Equação (5). Após diversos testes, considerou-se a carga mais próxima do solo a 1 mm acima deste.

A Figura 4.13 apresenta a nova distribuição de potencial elétrico e a Figura 4.14 e Figura 4.15, respectivamente, a nova distribuição de carga pela média a cada 18 pontos e a original do CSM. Destaca-se que a soma das cargas da extremidade negativa do passo 10 passou para  $-1,56 C$  para o obtido diretamente pelo CSM e  $-1,58 C$  para o resultante da média a cada 18 pontos.

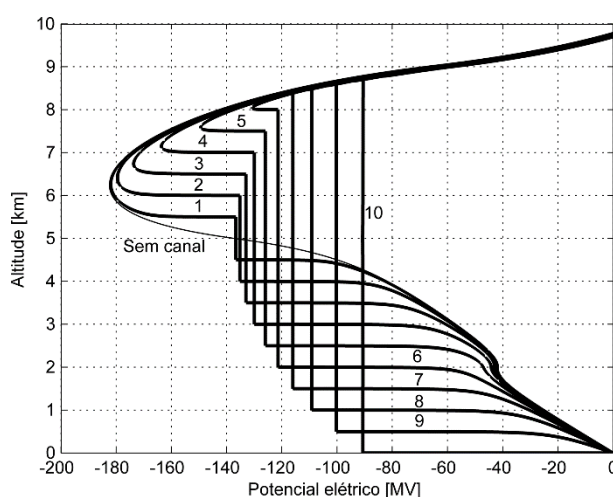


Figura 4.13 – Potencial elétrico da descarga nuvem-solo calculado à 1 m do eixo axial da nuvem de tempestade com o último passo tocando o solo

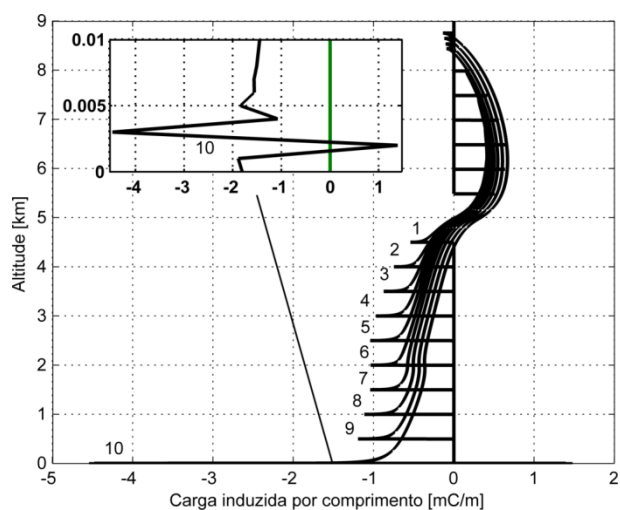


Figura 4.14 – Carga induzida por unidade de comprimento no canal da descarga nuvem-solo com 1 m de raio obtida pela média aritmética a cada 18 pontos e com o último passo tocando o solo

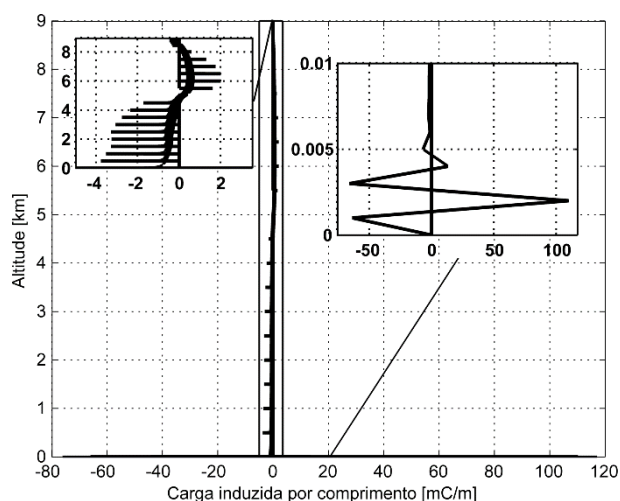


Figura 4.15 – Carga induzida por unidade de comprimento no canal da descarga nuvem-solo com 1 m de raio obtida diretamente pelo CSM e com o último passo tocando o solo

Percebe-se que a Figura 4.14 e Figura 4.15 possuem oscilações nos sete últimos pontos, com variações abruptas que oscilam entre sinais positivos e negativos de carga. Observa-se este comportamento apenas no último passo da descarga nuvem-solo. Este efeito se deve a discretização utilizada no CSM e é inerente ao método numérico. Embora a oscilação seja abrupta e resulte em cargas de grande valor em relação às das restantes do canal, percebe-se que os pontos em sua vizinhança possuem sinais opostos e de intensidade que, somados, compensam o efeito da carga avaliada. Assim, como apresentado na Figura 4.15, a

carga de 110,1 mC a 2 m do solo possui seu efeito atenuado pelas cargas em sua volta de -63,72 e -66,01 mC, respectivamente, a 1 e 3 m do solo.

Um parâmetro primordial na medição de descargas atmosféricas é o campo elétrico ao nível do solo. Este pode ser calculado a partir da Equação (2) ao se armazenar o valor do campo elétrico no ponto mais próximo do solo para cada passo da evolução da descarga nuvem-solo. Como as medições são obtidas no tempo, pode-se estimar o seu instante a partir da velocidade e do tamanho de cada passo do canal ionizado. Destaca-se que as medições de campo elétrico costumam ser apresentadas na notação física, ou seja, um campo direcionado para cima ao nível do solo possui sinal positivo.

Para a apresentação do campo elétrico ao nível do solo, ilustrado na Figura 4.16, simulou-se a descarga nuvem-solo por 100 passos de 50 m cada, o que resulta em uma variação de tempo por incremento no tamanho do canal a cada 0,5 ms, como descrito na Seção 4.2.1.

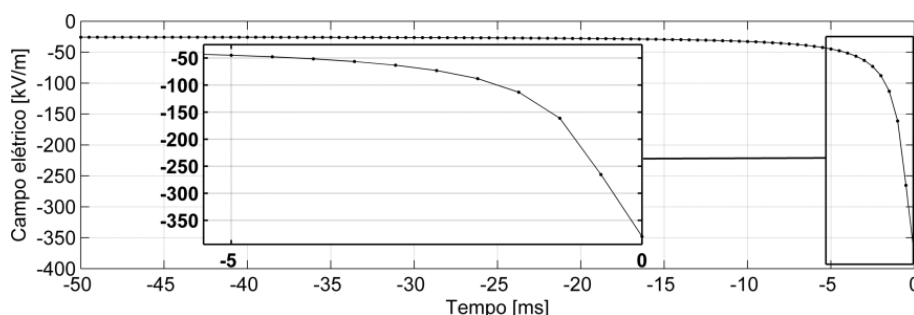


Figura 4.16 – Campo elétrico ao nível do solo medido à 50 m de distância do eixo axial da nuvem de tempestade

Considera-se o instante de tempo 0 s como aquele em que a extremidade inferior da descarga nuvem-solo coincide com a altitude do solo, -50 ms como o instante anterior ao início da descarga e -49,5 ms como seu início, ou seja, o primeiro passo de 50 m. A distância de 50 m do ponto de incidência da descarga é similar à separação entre a torre e o medidor de campo elétrico presente em MCS. O resultado, mostrado na Figura 4.16, possui valor de -379,8 kV/m para o último passo da descarga nuvem-solo.

Outra consideração possível para a descarga nuvem-solo é a presença de um canal ascendente no último passo de sua progressão. Adotou-se uma altura final de 3 m para o canal ascendente por se tratar de incidência no solo plano. Assim, supõe-

se que o mesmo possui a mesma velocidade de propagação da descarga nuvem-solo, mas que evolui de forma contínua. O canal ascendente possui cargas positivas e não evolui por passos como canais negativos, mas sim de forma contínua. A propagação contínua do canal ascendente positivo é considerada nas simulações como uma evolução por passos de 1 m, que possuem a mesma velocidade do canal descendente negativo. Assim, o tempo equivalente de 0,5 ms de um passo de 50 m de um canal descendente negativo se opõe ao de 0,01 ms de um passo de 1 m do canal ascendente positivo – ambos continuam com a mesma velocidade. Considera-se que, após o penúltimo passo, dado em -0,5 ms, o canal ascendente se propague de forma contínua até atingir a altura de 3 m. Neste momento, a descarga nuvem-solo realiza o último passo de 47 m. Tem-se, portanto, novos cálculos em relação à Figura 4.16 nos instantes -10 e -20  $\mu$ s relativos ao crescimento do canal ascendente no solo. Os novos resultados para a distância de 50 m são apresentados na Figura 4.17.

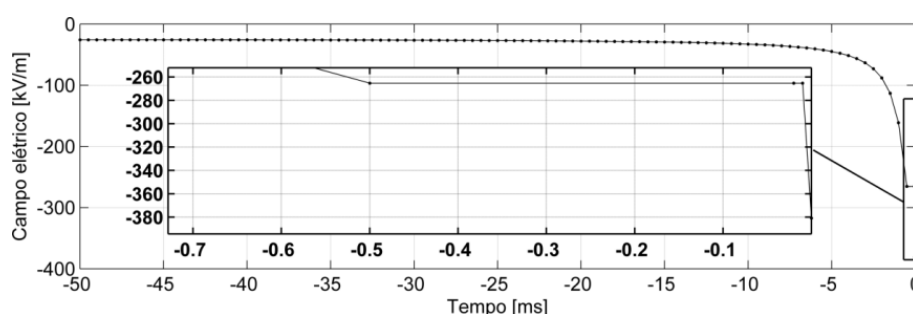


Figura 4.17 – Campo elétrico ao nível do solo medido a 50 m do eixo axial da nuvem de tempestade para o caso de descarga nuvem-solo com canal ascendente de 3 m de altura

Nota-se na Figura 4.17 que o antepenúltimo e o penúltimo passo se estabilizam em um valor de campo elétrico próximo de -265,3 kV/m, enquanto no passo final o valor atinge -380,9 kV/m, similar ao obtido sem a presença de um canal ascendente, como apresentado na Figura 4.16. A estabilização dos valores nos instantes em que há apenas a evolução do canal ascendente indica que as cargas deste têm impacto insignificante sobre o campo elétrico ao nível do solo, possivelmente devido à sua pequena magnitude.

A inclusão da representação de uma torre é de interesse, por possibilitar reproduzir a condição real de MCS. Considerou-se a presença de uma torre de 60 m de altura e raio equivalente de 20 cm, além de um canal ascendente, nos últimos

passos da descarga nuvem-solo, com 90 m de comprimento. A Figura 4.18 apresenta os resultados de campo elétrico para distâncias de 50 e 700 m do eixo axial da nuvem de tempestade.

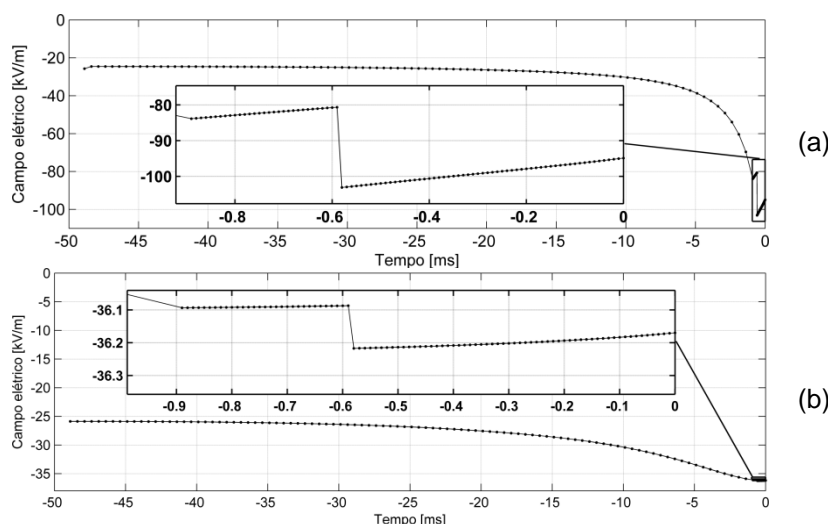


Figura 4.18 – Campo elétrico ao nível do solo medido a (a) 50 m e (b) 700 m do eixo axial da nuvem de tempestade para o caso de descarga nuvem-solo com torre de 60 m de altura

Destaca-se que os valores são representativos de medidores presentes em MCS. A presença da torre com o canal ascendente implica a atenuação da intensidade do campo elétrico. Para a distância de 50 m do eixo axial, o valor de -4,9 kV/m no último instante de tempo é bem inferior aos -380,9 kV/m do caso sem torre e com canal ascendente de 3 m. Ademais, destacam-se as mudanças de comportamento no campo elétrico nos instantes -0,89 e -0,59 ms devido, respectivamente, ao início do canal ascendente e ao último passo realizado pela descarga nuvem-solo. O campo elétrico calculado na Figura 4.18 (b) varia entre -25 e -36 kV/m, sendo que o último instante de tempo possui um valor de -36,2 kV/m.

De forma a evitar quaisquer dúvidas referentes à evolução da descarga nuvem-solo em cada caso avaliado, a Figura 4.19 apresenta de forma pictórica todas as condições simuladas nesta seção.

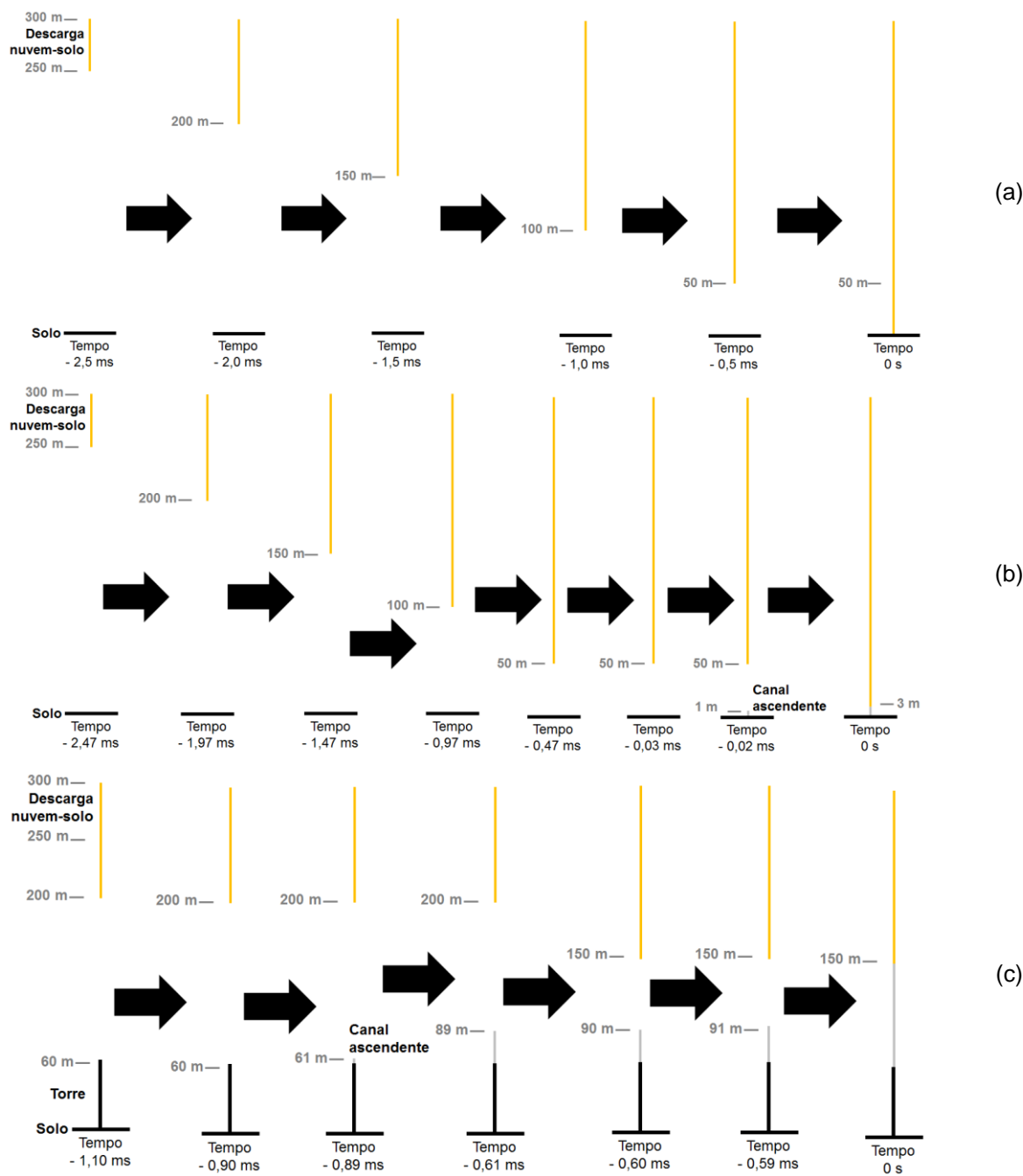


Figura 4.19 – Ilustração de todos os casos simulados na Seção 4.3, sendo (a) a condição sem torre e canal ascendente, (b) sem torre e com canal ascendente de 3 m de altura e (c) com torre de 60 m e canal ascendente de 90 m de altura

## 4.4 Considerações finais

Neste capítulo, apresentaram-se conceitos e considerações imprescindíveis para a representação de uma descarga nuvem-solo pelo modelo do *leader*

bidirecional. Mostraram-se os parâmetros necessários para a simulação da descarga nuvem-solo e avaliou-se a representatividade dos mesmos em relação a valores apresentados na literatura convencional. Em seguida, formulou-se o problema e concluiu-se que o mesmo não pode ser resolvido pela forma tradicional do CSM devido ao elevado número de cargas presentes na nuvem de tempestade considerada. Tal dificuldade foi superada ao utilizar o potencial devido à nuvem de tempestade como uma condição inicial do problema e a formulação final mostrou-se fisicamente consistente. Por fim, desenvolveu-se o programa *myLightning* e obtiveram-se resultados preliminares que são similares à [7]. As divergências encontradas se devem a discretização utilizada na simulação deste trabalho em relação à referência.

Com o desenvolvimento do programa *myLightning*, pode-se utilizá-lo para uma análise de sensibilidade dos parâmetros elétricos envolvidos na formação do canal de uma descarga atmosférica, como realizado no Capítulo 5.

# Capítulo 5

## APLICAÇÃO DO CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA AVALIAÇÃO DE CASOS DE INTERESSE PRÁTICO

---

### 5.1 Introdução

Neste capítulo, apresenta-se a aplicação do código desenvolvido em situações de interesse prático. Por meio de simulação sistemática, desenvolve-se análise de sensibilidade para avaliar a influência de vários parâmetros nas grandezas envolvidas nos processos de formação e evolução das descargas, tais quais a carga e a sua distribuição, bem como de grandezas que monitoram o desenvolvimento de tais processos, notadamente, o campo elétrico ao nível do solo e o campo elétrico médio entre o canal descendente e o solo.

### 5.2 Apresentação dos casos avaliados

As simulações apresentadas na Seção 4.3 fornecem como resultados a distribuição de cargas no canal da descarga nuvem-solo e/ou estruturas aterradas, o

potencial e campo elétrico devido às suas presenças e a carga total transferida para o solo após a descarga de retorno.

As condições analisadas para a formação da descarga nuvem-solo partem de uma situação básica simplificada, correspondente à evolução do canal negativo descendente que se aproxima de um solo plano. A partir disso, evolui por passos para condições mais próximas da situação real, que incluem, inicialmente, a presença de torre sobre solo plano e, posteriormente, sobre o topo de montanha – condição presente em MCS. No estágio final, consideram a presença de ramificações no canal descendente e de canal ascendente a partir do topo da torre. A sequência de condições simuladas é apresentada a seguir.

- 1) Caso básico correspondente à evolução do canal negativo descendente de descarga negativa nuvem-solo sobre solo plano: definição do raio do canal;
- 2) Introdução de torre instrumentada;
- 3) Introdução de relevo do solo representativo do presente em MCS e comparação com casos com solo plano: introdução de torre instrumentada, de canal ascendente e de ramificação nos passos finais do canal descendente negativo.

## **5.3 Representação do raio do canal da descarga nuvem-solo**

### **5.3.1 Caso básico**

Para se definir um caso básico de evolução da descarga, optou-se por representar o canal descendente como um corpo condutor vertical, flutuante, de raio igual a 1 m. Nesta seção, representam-se as condições do caso básico na Figura 5.1, que assume o solo como um CEP, o que permite assegurar seu potencial nulo pela aplicação do método das imagens. Avaliam-se o campo médio e as cargas envolvidas na evolução do processo para posterior verificação do efeito da variação do raio do canal da descarga nuvem-solo sobre tais grandezas.

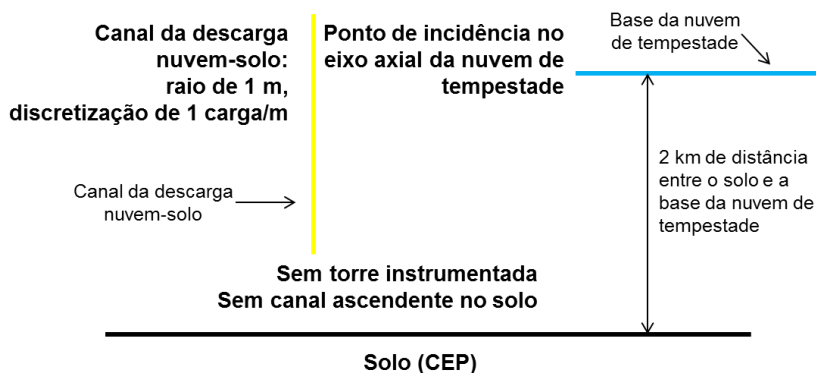


Figura 5.1 – Representação do caso base utilizado para avaliação do efeito da variação do raio do canal da descarga nuvem-solo

A Figura 5.2 apresenta a diferença de potencial (d.d.p.) entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo ao longo dos passos da evolução do primeiro, além do campo elétrico médio entre a extremidade inferior do canal da descarga nuvem-solo e o solo ao longo de seu desenvolvimento. Destaca-se que o último passo de simulação apresentado na curva de d.d.p. se refere à condição em que a extremidade do canal se situa a 1 m do solo, enquanto o último passo do campo elétrico médio, a 50 m.

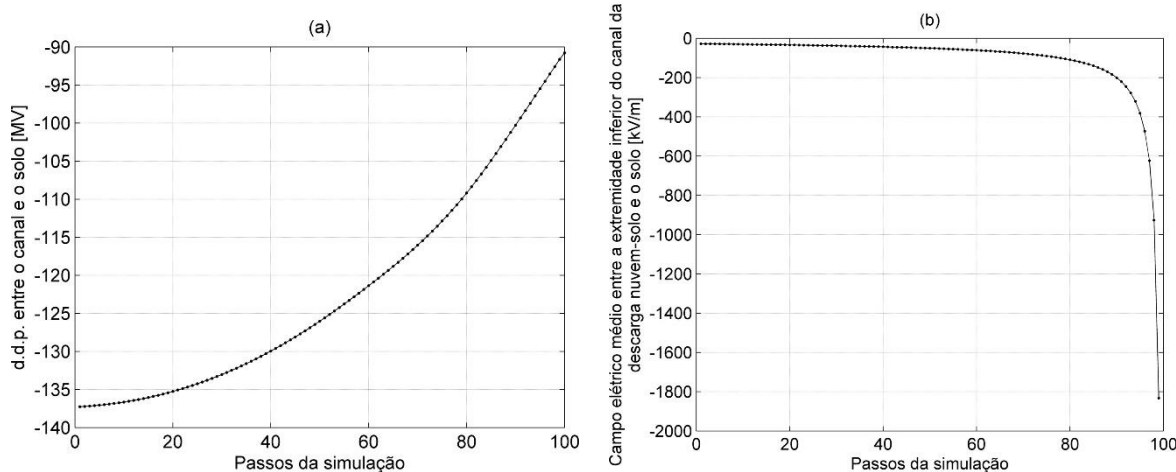


Figura 5.2 – (a) Diferença de potencial entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo e (b) campo médio entre a extremidade inferior do canal e o solo para o caso base

Destaca-se da Figura 5.2 (a) que a d.d.p. tem um comportamento de diminuição do seu valor com a evolução por passos do canal da descarga nuvem-solo. Seu valor se inicia em -137,3 MV e termina em -90,8 MV, com uma taxa média de diminuição de 0,47 MV por passo do canal da descarga nuvem-solo.

Diferentemente, observa-se o aumento do campo elétrico médio ao longo da evolução do canal da descarga nuvem-solo à medida que este se aproxima do solo plano, com o aumento dos passos de simulação. Os últimos cinco passos de evolução do canal resultam nas maiores taxas de campo elétrico médio, sendo que, no último passo (extremidade do canal a 1 m do solo), seu valor alcança -1832,3 kV/m.

A Figura 5.3 apresenta a carga induzida nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal da descarga nuvem-solo ao longo de sua evolução. Destaca-se que o valor de 50 m é idêntico ao comprimento de cada passo na evolução do canal da descarga nuvem-solo. Ademais, o último passo de simulação considera o canal a 1 m do solo.

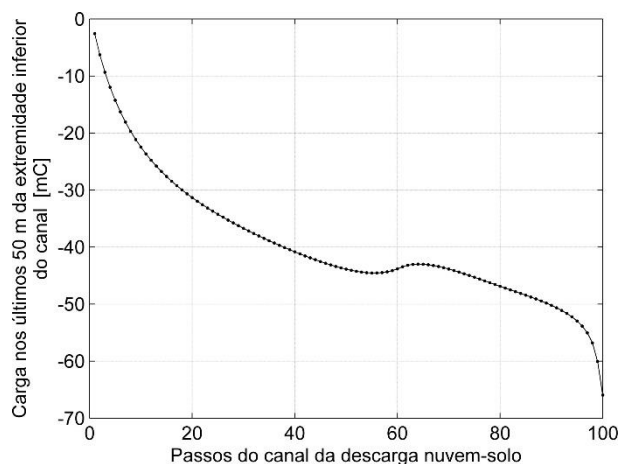


Figura 5.3 – Carga induzida nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal em formação da descarga nuvem-solo para o caso base (último passo de simulação com o canal a 1 m do solo)

Percebe-se da Figura 5.3 que a carga induzida no primeiro passo possui valor de -2,59 mC. A carga negativa induzida em cada passo tende a aumentar até o passo 55, momento em que estabiliza em um valor igual a -44,5 mC. A partir desse ponto, a carga possui um comportamento de diminuição até o passo 64, alcançando -43,0 mC e, em seguida, volta a ter uma tendência de aumento do valor da carga negativa, atingindo -66,0 mC no fim da simulação. A faixa de passos na qual se observa a redução da densidade de carga na extremidade do canal descendente ocorre após o fim da prolongação da extremidade superior do canal, carregada positivamente. Nota-se que, após cerca de dez passos, com a redução da altura da

extremidade inferior do canal carregada com cargas negativas, a carga induzida volta a crescer em magnitude.

A Tabela 5.1 resume algumas condições de interesse prático, relativas às cargas envolvidas no processo, no último passo e após o contato do canal com o solo, que inicia a transferência de carga positiva do solo para o canal constituído.

Tabela 5.1 – Resumo dos resultados de carga do caso base para a análise da variação do raio do canal de uma descarga nuvem-solo

Carga na parte inferior do canal da descarga nuvem-solo no último passo [C]	Carga nos 50 m da extremidade inferior do canal no último passo [mC]	Carga final no canal da descarga nuvem-solo após a descarga de retorno [C]
- 1,64	-66,0	5,80

Por fim, a Figura 5.4 apresenta a distribuição da carga induzida ao longo do canal da descarga (mC/m) no último passo de evolução do canal, a distribuição da carga provida pela corrente de retorno e a distribuição final da carga após o processo. O gráfico é construído a partir da média a cada 18 cargas pontuais. O gráfico é construído a partir da média a cada 18 cargas pontuais (18 m – 1 carga pontual por metro) por conta de oscilações no resultado original devido à discretização utilizada. Percebe-se que a carga final possui apenas cargas positivas e é dada pela superposição das cargas induzidas no instante anterior ao contato com o solo (1 m acima do solo) e na descarga de retorno. Além disso, a carga induzida na descarga de retorno apresenta distribuição praticamente uniforme, exceto em suas extremidades devido ao efeito das pontas no canal.

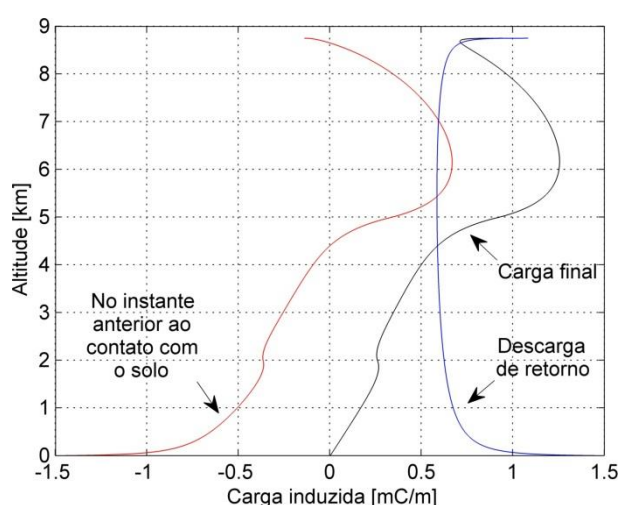


Figura 5.4 – Cargas induzidas no canal da descarga nuvem-solo no instante anterior ao contato com o solo (1 m acima deste), na descarga de retorno e após o fim do processo para o caso base

A partir dos dados apresentados no caso base, realiza-se a comparação dos resultados das condições avaliadas a seguir de forma mais clara e intuitiva.

### 5.3.2 O efeito do raio do canal

Para o caso avaliado, simulou-se a variação do raio do canal da descarga nuvem-solo, considerando-se os valores de 10, 20, 30, 40, 50 e 75 cm, além de 1,5 e 2 m. Todos os outros parâmetros utilizados nas simulações são idênticos aos do caso base. A Figura 5.5 apresenta a d.d.p. entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo e o campo elétrico médio entre a extremidade inferior do canal e o solo para os casos analisados. Destaca-se que a curva de d.d.p. considera, no último passo, distância de 1 m do canal em relação ao solo, enquanto o último passo de simulação para o campo elétrico médio utiliza 50 m de distância entre o canal e o solo.

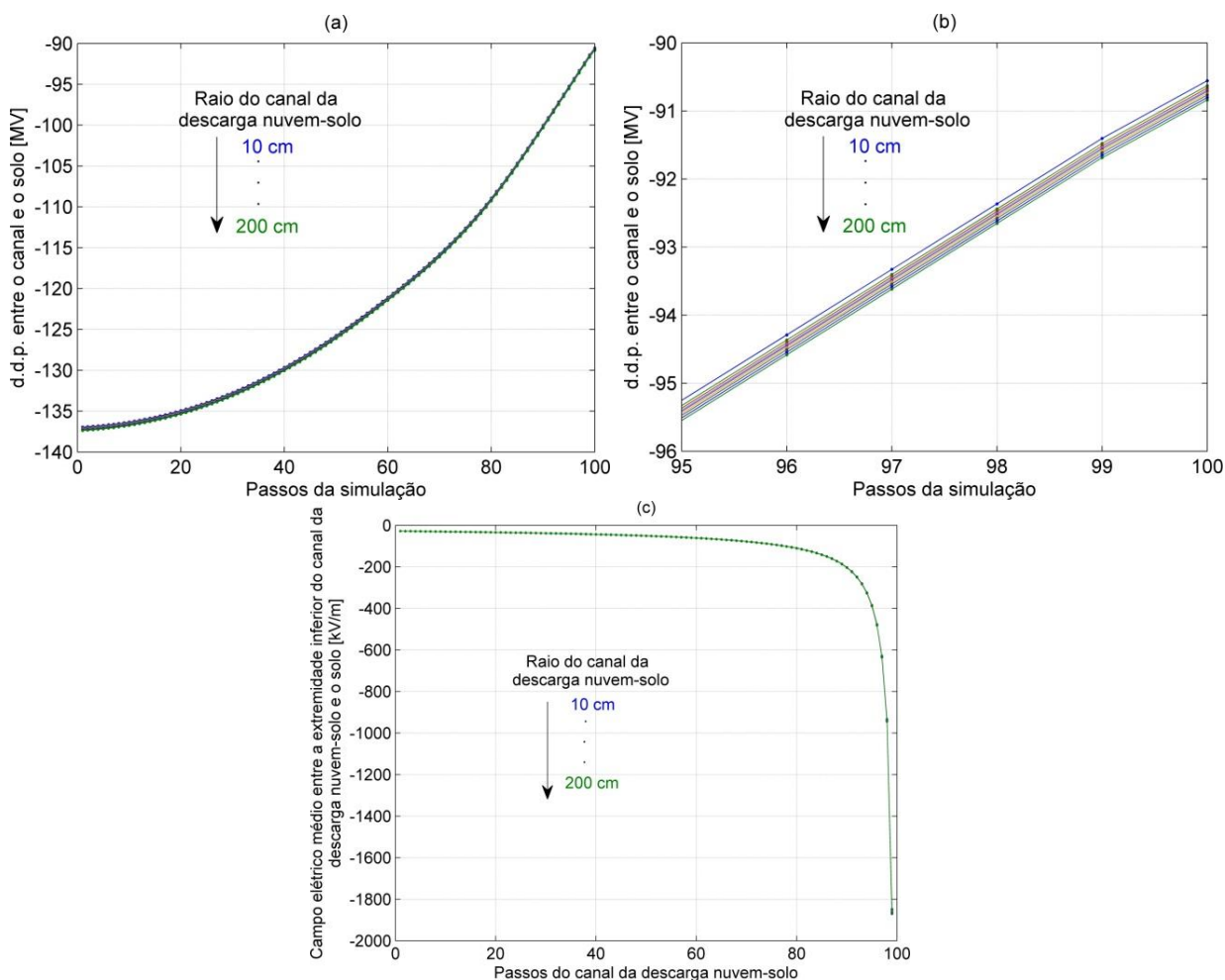


Figura 5.5 – (a,b) Diferença de potencial entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo e (c) campo elétrico médio entre a extremidade inferior do canal e o solo para os casos avaliados

Percebe-se da Figura 5.5 que, praticamente, a variação do raio de 0,1 a 2 m não afeta o comportamento tanto da diferença de potencial quanto do campo elétrico médio. Como mostrado na Tabela 5.2, as diferenças máximas têm a ordem de 1% no último passo.

Tabela 5.2 – Resumo dos resultados de d.d.p. e campo elétrico médio do caso base para a análise da variação do raio do canal de uma descarga nuvem-solo

Raio do canal	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	75 cm	150 cm	200 cm
<b>Magnitude [MV]</b>	-90,56	-90,63	-90,67	-90,69	-90,71	-90,74	-90,80	-90,84
<b>d.d.p. no último passo em relação ao caso base</b>	99,77%	99,85%	99,89%	99,92%	99,94%	99,97%	100,04%	100,08%
<b>Magnitude [MV/m]</b>	-1,816	1,822	-1,825	-1,827	-1,828	-1,831	-1,835	-1,837
<b>Campo elétrico médio entre a extremidade inferior do canal da descarga nuvem-solo e o solo no último passo em relação ao caso base</b>	99,12%	99,44%	99,60%	99,70%	99,77%	99,90%	100,2%	100,3%

Por outro lado, a Figura 5.6 mostra que, para todos os casos apresentados, o raio afeta a intensidade das cargas induzidas distribuídas nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal da descarga nuvem-solo ao longo de sua evolução.

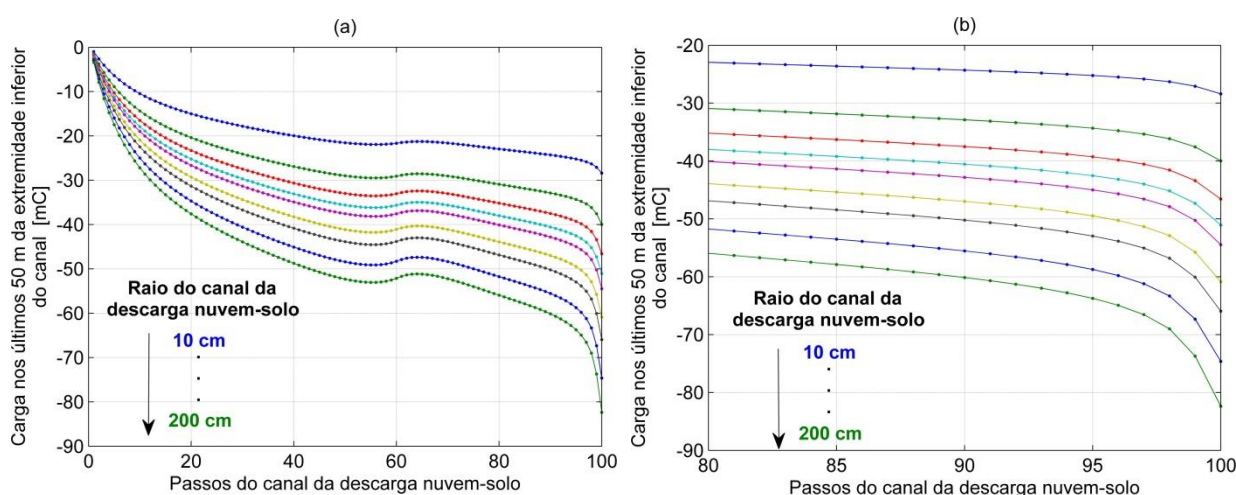


Figura 5.6 – Carga induzida nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal em formação da descarga nuvem-solo para os casos avaliados (último passo de simulação com o canal a 1 m do solo)

Tal resultado era esperado, pois o aumento do raio do canal resulta no aumento da capacitância do sistema constituído e, naturalmente, há tendência de aumento das cargas induzidas, mantidas as condições de potencial nas fronteiras do sistema físico associado. Nota-se, entretanto, que a intensificação das cargas

distribuídas no canal, praticamente, não afeta a evolução do potencial do canal e do campo elétrico médio.

A Tabela 5.3 denota como a variação do raio afeta significativamente a distribuição de cargas nas condições específicas indicadas antes da conexão do canal ao solo. A carga transferida após a conexão não é afetada, sendo praticamente constante.

Tabela 5.3 – Resumo dos resultados de carga do caso base para a análise da variação do raio do canal de uma descarga nuvem-solo

Raio do canal	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	75 cm	100 cm	150 cm	200 cm
<b>Carga na parte inferior do canal da descarga nuvem-solo no instante do último passo</b>									
Magnitude [C]	-0,95	-1,21	-1,33	-1,41	-1,43	-1,57	-1,64	-1,75	-1,83
Valor percentual em relação ao caso base	57,9%	73,8%	81,1%	86,0%	87,2%	95,7%	100,00%	106,7%	111,6%
<b>Carga nos 50 m da extremidade inferior do canal no último passo</b>									
Magnitude [mC]	-28,4	-40,0	-46,6	-51,1	-54,5	-60,9	-66,0	-74,6	-82,4
Valor percentual em relação ao caso base	43,0%	60,6%	70,6%	77,4%	82,6%	92,3%	100,0%	113,2%	124,9%
<b>Carga final no canal da descarga nuvem-solo após a descarga de retorno</b>									
Magnitude [C]	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80	5,80
Valor percentual em relação ao caso base	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Percebe-se da Tabela 5.3 que, no último passo, a variação do raio na faixa considerada leva a variações da ordem de 45% e 60%, respectivamente, da carga da parte inferior e da carga na extremidade inferior do canal da descarga nuvem-solo. Entretanto, o valor da carga transferida, igual a 5,80 C, não é afetado, uma vez que, após a ocorrência da corrente de retorno, o envelope de corona se desfaz e resta apenas o núcleo do canal, cujo raio tem a ordem de 1 cm.

Em decorrência dos resultados anteriores, que mostram que o impacto da variação do raio do canal da descarga é mínimo para os parâmetros elétricos avaliados, optou-se pela adoção de raio igual a 1 m nas simulações seguintes do trabalho.

## 5.4 Representação da presença de torre instrumentada

A sequência natural de evolução da configuração de caso simulado consiste na introdução de torre instrumentada. Para isso, representou-se a presença de torre

com 60 m de altura e 20 cm de raio, similar àquela presente em MCS, sobre solo plano e um canal de descarga nuvem-solo com raio de 100 cm, que evolui por passos de 50 m. A Figura 5.7 ilustra as condições do problema analisado.

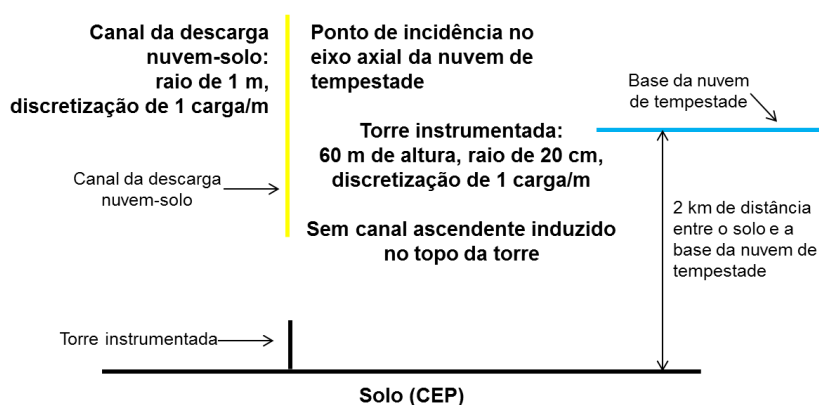


Figura 5.7 – Representação do problema utilizado para avaliação do efeito da introdução de uma torre instrumentada

A Figura 5.8 apresenta a d.d.p. entre o canal da descarga nuvem-solo e o topo da torre, além do campo elétrico médio entre o canal e o topo da torre. Mostra também os resultados do caso sem a presença da torre. No caso com a presença de torre, destaca-se que o último passo de simulação considera a extremidade inferior do canal à distância de 1 m do topo da torre, ou seja, 61 m do solo. Já no caso do campo elétrico médio, a distância no último passo entre o canal e o topo da torre é de 40 m, o que equivale à distância de 100 m acima do solo. As condições utilizadas para o caso sem torre são as mesmas consideradas na Figura 5.2: no último passo, canal a 1 m do solo e a 50 m do solo, respectivamente, para as curvas de d.d.p. e campo elétrico médio.

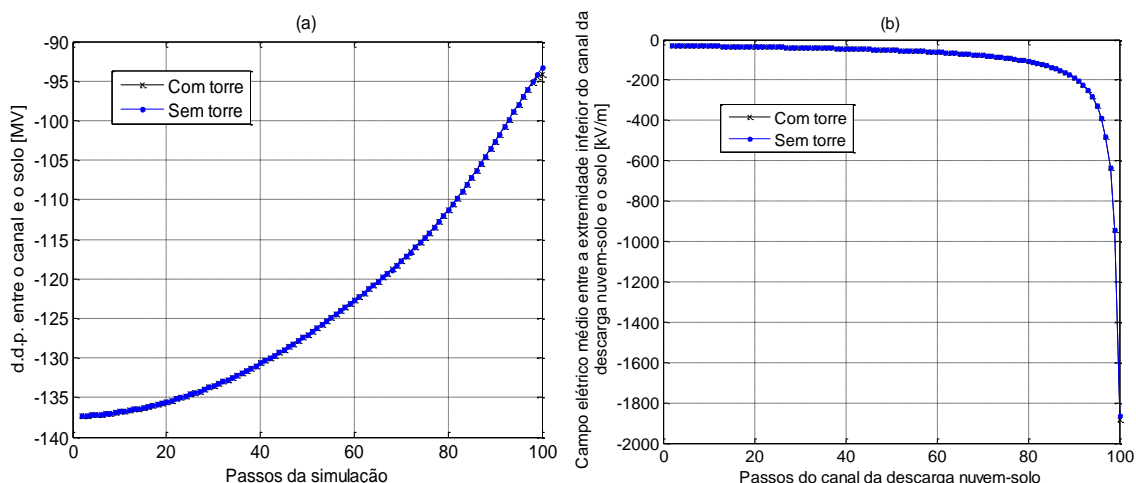


Figura 5.8 – (a) Diferença de potencial entre o canal da descarga nuvem-solo e o topo da estrutura aterrada e (b) campo elétrico médio entre a extremidade inferior do canal da descarga nuvem-solo e o topo da torre para o caso com torre instrumentada

Percebe-se da comparação entre a Figura 5.5 e Figura 5.8 que as curvas de d.d.p., com e sem torre, têm, basicamente, o mesmo comportamento de diminuição da intensidade com a evolução do canal da descarga. Apenas nos quinze últimos passos, a presença da torre leva a valores mais intensos. O valor da d.d.p. no último passo é de -92,8 MV, sendo 2,2% maior que o mesmo caso sem a presença da torre. É importante ressaltar, para as curvas de d.d.p., que a comparação é feita para a posição da extremidade inferior do canal a 61 m do solo na presença da torre (1 m de distância do topo da torre) e a 50 m do solo no caso sem a estrutura aterrada. Assim, deve se ter a expectativa de uma diferença de potencial entre a torre e um ponto 50 m acima desta inferior àquela entre o solo e um ponto 50 m acima deste.

Com relação ao campo elétrico médio, este tem o mesmo comportamento. Seu valor no último passo na presença da torre é de -2338,6 kV/m, que é 27,6% maior que o caso sem torre (último passo – 50m de altura do solo plano).

Considerando-se que, para a condição com torre, a distância é de 40 m da extremidade do canal descendente para o seu topo e, para a condição sem torre, a distância é de 50 m desse canal em relação ao solo plano no último passo, sendo a diferença de potencial do canal em relação ao solo praticamente a mesma nos dois casos, naturalmente já se esperava um campo médio superior a 25% no caso da torre (50m/40m). Como o campo elétrico médio é apenas 27,6% maior, aparentemente, a simples presença da torre não é capaz de gerar um aumento significativo do campo elétrico médio acima desta em relação àquele observado acima do solo na ausência da estrutura aterrada.

A Figura 5.9 apresenta as cargas induzidas nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal da descarga nuvem-solo ao longo de sua evolução.

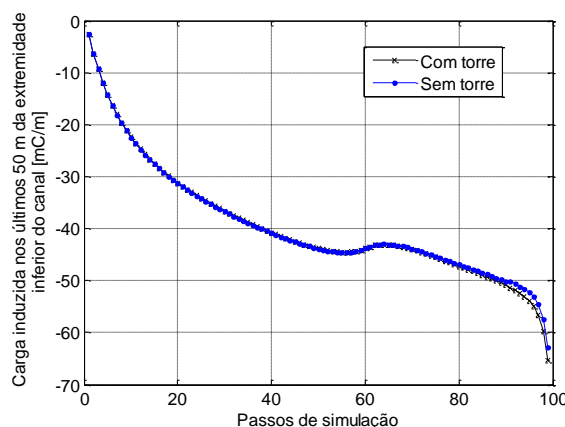


Figura 5.9 – Carga induzida nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal em formação da descarga nuvem-solo para a introdução de torre instrumentada (último passo para os casos com e sem torre, respectivamente, a 40 m da torre e a 50 m do solo)

Percebe-se da Figura 5.9 que a curva obtida é similar ao caso sem torre, apresentado na Figura 5.3. O valor inicial é o mesmo de -2,59 mC, porém as diferenças entre os casos são percebidas nos últimos dez passos de evolução da descarga nuvem-solo. O valor final da carga induzida é de -62,8 mC, 4,8% menor que o último passo da condição sem estrutura aterrada.

A Tabela 5.4 apresenta, respectivamente, dados de carga final na parte inferior do canal da descarga nuvem-solo no último passo, carga média nos últimos 50 m e a carga final após a descarga de retorno, além dos mesmos parâmetros para a torre.

Tabela 5.4 – Resumo dos resultados de carga associados a parâmetros do caso com torre comparados à condição sem torre

Caso avaliado	Sem torre	Com torre
<b>Carga na parte inferior do canal da descarga nuvem-solo no instante do último passo</b>		
Magnitude [C]	-1,64	-1,60
Valor percentual em relação ao caso sem torre instrumentada	100,0%	97,6%
<b>Carga nos 50 m da extremidade inferior do canal no último passo</b>		
Magnitude [mC]	-66,0	-62,8
Valor percentual em relação ao caso sem torre instrumentada	100,0%	95,2%
<b>Carga final no canal da descarga nuvem-solo após a descarga de retorno</b>		
Magnitude [C]	5,80	5,80
Valor percentual em relação ao caso sem torre instrumentada	100,0%	100,0%
<b>Carga presente na torre no instante do último passo do canal da descarga nuvem-solo</b>		
Magnitude [mC]	----	3,15
<b>Carga final na torre após a descarga de retorno</b>		
Magnitude [mC]	----	0,15

A Tabela 5.4 indica que os valores de carga associados ao canal da descarga nuvem-solo são similares para os dois casos. Com a introdução da torre instrumentada, a carga na parte inferior no instante anterior ao contato com o solo é 2,4% menor que o obtido sem a estrutura aterrada, enquanto a carga média nos últimos 50 m possui diferença de 4,8%. A carga final, após a descarga de retorno, no canal da descarga nuvem-solo é idêntica ao do caso sem torre instrumentada. A torre instrumentada considerada na simulação pouco interfere nestes parâmetros, sendo desprezível no caso da carga final após a descarga de retorno.

A carga na torre atinge pouco mais de 3 mC no instante anterior ao contato com o solo. Após a descarga de retorno, a carga final na estrutura metálica é da ordem de 0,1 mC, desprezível quando comparada a associada ao canal da descarga nuvem-solo.

Por fim, apresenta-se na Figura 5.10 o campo elétrico calculado a 50 m de distância do ponto de incidência da descarga nuvem-solo. Destaca-se que o passo final de simulação considera distância, respectivamente, de 1 m para o topo da torre para a condição com a presença da estrutura aterrada e 1 m do solo para a condição sem torre.

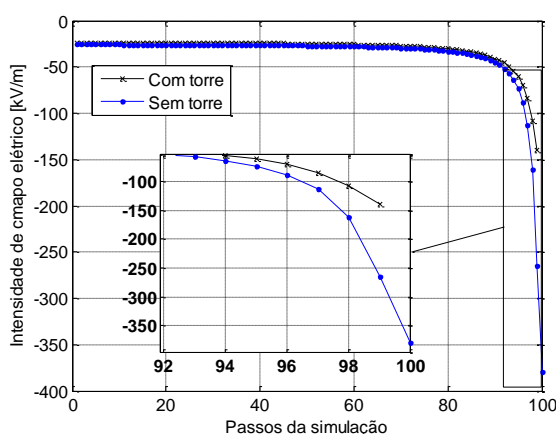


Figura 5.10 – Perfil do campo elétrico ao nível do solo à 50 m de distância do ponto de incidência da descarga nuvem-solo (último passo para os casos com e sem torre, respectivamente, a 1 m da torre e a 1 m do solo)

Observa-se da Figura 5.10 que o perfil do campo elétrico com a estrutura aterrada possui o mesmo comportamento do caso sem a torre instrumentada. A diferença entre eles é a intensidade dos valores calculados nos últimos passos de evolução do canal da descarga nuvem-solo. Nota-se que o efeito da introdução da torre é atenuar os níveis de campo elétrico no solo quando comparado a um caso

sem a estrutura aterrada. Destaca-se que a intensidade final de campo elétrico para o caso com torre instrumentada é de  $-139,8$  kV/m, 63,2% menor que os  $-379,8$  kV/m obtidos sem a presença de estrutura aterrada. Nota-se que a distância da extremidade do canal em relação ao ponto de observação no solo é muito superior no caso com a presença da torre, o que explica o valor bem inferior de campo elétrico ao nível do solo.

O comportamento do campo elétrico ao nível do solo com o aumento da distância em relação ao ponto de incidência do canal da descarga é apresentado na Figura 5.11. Percebe-se que, para os casos com e sem torre, a intensidade do campo elétrico diminui com o aumento da distância em relação ao ponto de incidência, que ocorre no eixo axial da nuvem de tempestade. Observa-se que, a partir de 2,5 km, a variação do campo elétrico é da ordem de 1 kV/m entre o início da descarga e o instante anterior a conexão do canal desta com o solo ou torre. Para a medição a 10 km de distância, observa-se que o campo elétrico é praticamente constante, com variações menores da ordem de 0,01 kV/m ao longo do processo da descarga atmosférica. Além disso, neste caso há a mudança do comportamento de crescimento da intensidade de campo elétrico, que se deve a distância do ponto de medição em relação ao canal e às cargas presentes na nuvem de tempestade. Conclui-se que, como esperado, o campo elétrico ao nível do solo aparenta sofrer menor influência do canal da descarga com o aumento da distância do ponto de medição. Esta tendência chega ao ponto em que, para o caso simulado de 10 km de distância, a influência das cargas da nuvem de tempestade é maior que aquelas do canal da descarga nuvem-solo.

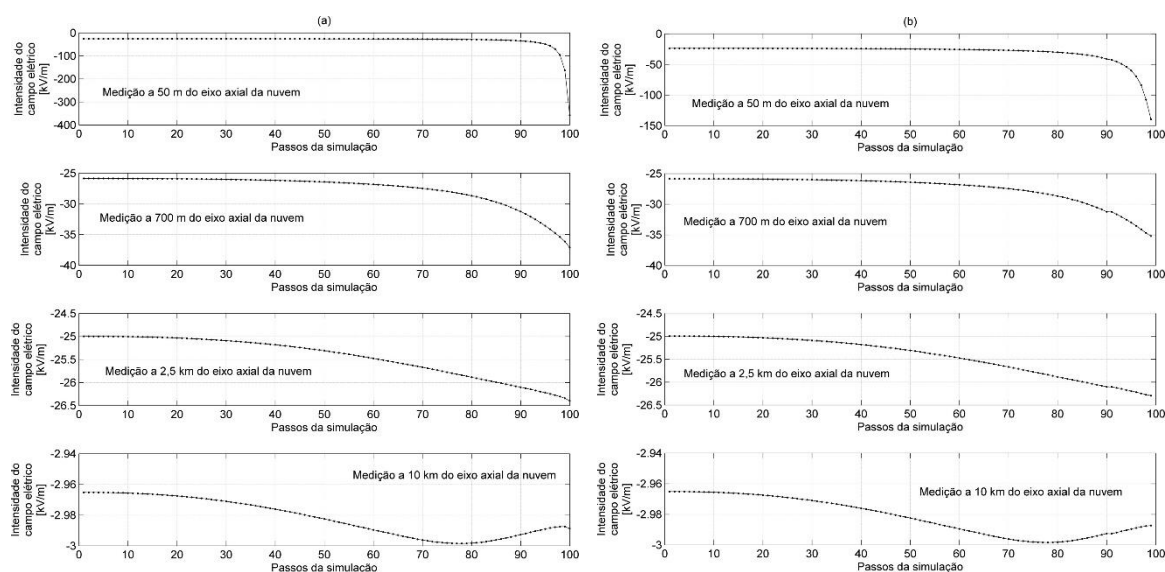


Figura 5.11 – Perfis de campo elétrico ao nível do solo a 50 e 700 m, 2,5 e 10 km de distância do ponto de incidência da descarga nuvem-solo para (a) condição sem e (b) condição com torre (último passo para os casos com e sem torre, respectivamente, a 1 m da torre e a 1 m do solo)

## 5.5 Representação do relevo do solo na evolução do canal da descarga nuvem-solo

### 5.5.1 Simulação da evolução do canal na presença da torre sobre um solo como o relevo das proximidades de MCS

Considera-se a condição de simulação da Figura 5.12. A velocidade de todos os canais é considerada constante e igual a  $10^5$  m/s, sendo o instante de tempo de conexão ao solo determinado por esta condição. As condições de solo são as mesmas apresentadas na seção 4.2.2.

O solo é o mesmo apresentado na Figura 4.7, cujo ponto mais alto se situa a 1401 m de altitude, mesma altura da base da torre de MCS. Como a torre possui 60 m de altura, o topo desta estrutura aterrada se localiza a 1461 m de altitude. Destaca-se ainda que o ponto de medição de campo elétrico ao nível do solo está a 1400 m de altitude, reproduzindo a condição presente em MCS.

Para conferir consistência às comparações, considerou-se um deslocamento para cima da altitude das cargas da nuvem de um valor igual à altitude da base da torre, de 1401 m. Assim, a altitude da posição de origem do canal da descarga

nuvem-solo e as distâncias entre esta e o conjunto torre/canal ascendente se tornam iguais ao caso com solo plano, que utiliza o método das imagens. Em outras palavras, o caso da torre posicionada no solo plano à altitude de 0 m foi simulado com a base da nuvem de tempestade a 2000 m de altura. O caso da torre instalada sobre o Morro do Cachimbo (altitude de 1401 m) foi simulado com a base da nuvem a 3401 m de altura, ou seja, 2000 m acima do ponto mais alto do solo.

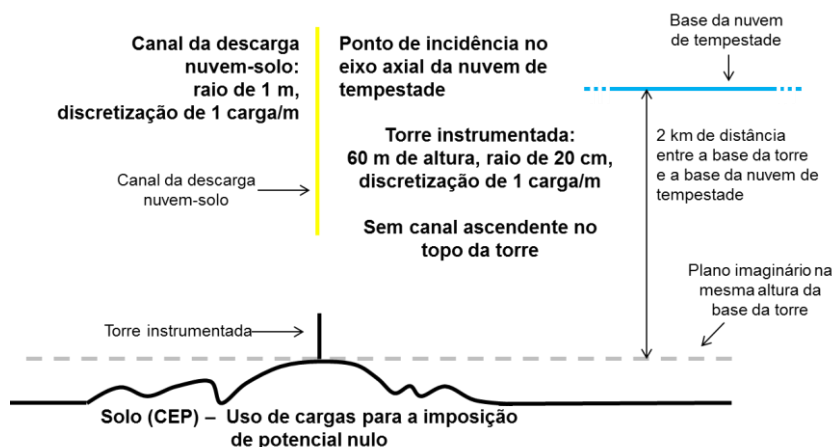


Figura 5.12 – Representação do problema avaliado considerando o relevo do solo

A Figura 5.13 apresenta a d.d.p. entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo para o caso com solo plano e a condição com o relevo representativo de MCS. Destaca-se que as curvas de d.d.p. consideram o canal, no último passo, a distância de 1 m do topo da torre, ou seja, a 61 m do solo. Por outro lado, o último passo do campo elétrico médio se refere ao canal afastado de 40 m do topo da torre, isto é, a 100 m do solo.

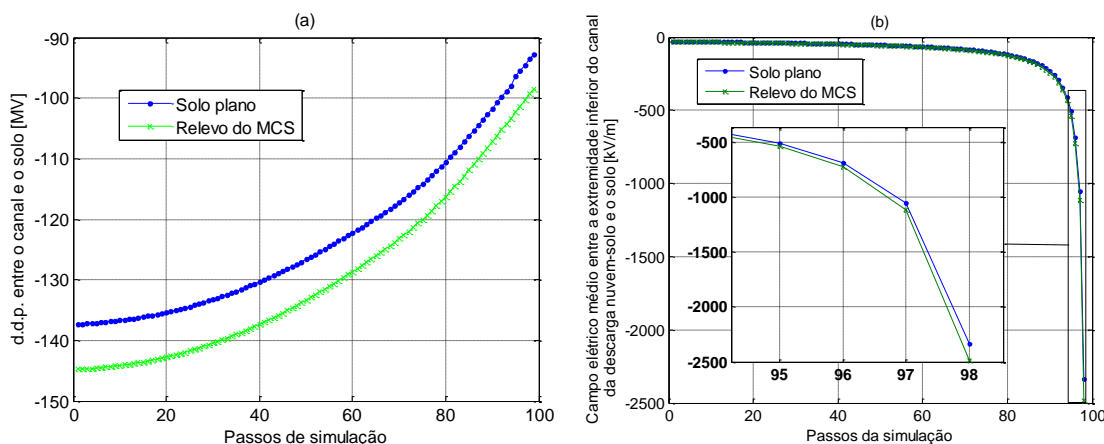


Figura 5.13 – (a) Diferença de potencial entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo e (b) campo elétrico médio para os casos avaliados

Percebe-se da Figura 5.13 que as duas curvas de d.d.p. possuem o mesmo comportamento, porém a diferença entre os dois gráficos tende a diminuir com a aproximação do canal da descarga nuvem-solo com a torre instrumentada. A introdução do relevo do solo aumenta a intensidade da d.d.p. entre o canal da descarga nuvem-solo e o topo da torre, resultando em um valor médio 5,38% maior que o caso com solo plano ao longo dos passos de simulação. Destaca-se que o valor final de d.d.p. para a condição com relevo é de -98,6 MV, valor 6,2% superior ao caso com solo plano, com -92,8 MV. Em relação ao campo elétrico médio, o relevo do solo resulta em um valor de -2483,5 kV/m no instante anterior ao contato com o solo, valor também 6,2% maior que o caso com solo plano, que tem -2338,6 kV/m. Este resultado indica um impacto das extremidades e picos presentes no relevo do solo em relação ao caso plano. Este comportamento se deve à presença de cargas no solo próximas a extremidade do canal da descarga nuvem-solo, que intensifica a d.d.p. e o campo elétrico médio na região entre eles.

A Figura 5.14 apresenta a distribuição de cargas induzidas nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal da descarga nuvem-solo ao longo de sua evolução, além da diferença de cargas entre um passo e outro. Destaca-se que o último passo de simulação se refere à condição em que o canal da descarga está a 1 m do topo da torre, ou seja, 61 m do solo.

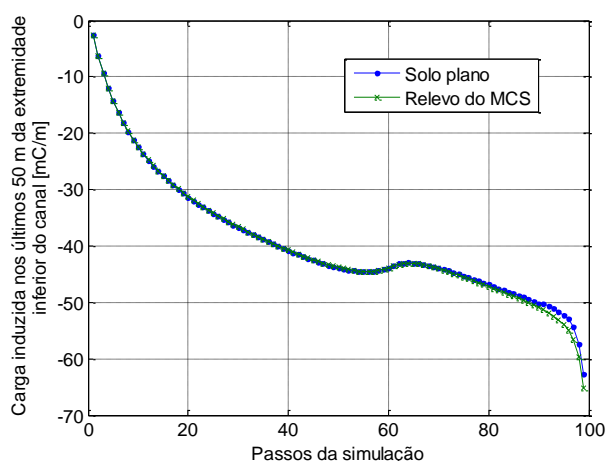


Figura 5.14 – Carga induzida nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal em formação da descarga nuvem-solo para os casos avaliados (último passo de simulação com o canal a 1 m do topo da torre)

Percebe-se da Figura 5.14 que as curvas oriundas da condição com relevo análogo ao presente em MCS são similares àquelas obtidas com o solo plano. A

principal diferença entre os casos é o valor no instante anterior ao contato com o solo. Observa-se na Figura 5.14 uma maior intensidade da carga presente no caso com relevo, de -65,2 mC, em relação ao solo plano, com -62,8 mC. Essa diferença é de, aproximadamente, 3,9%.

A Tabela 5.5 apresenta, respectivamente, dados de carga final na extremidade inferior do canal da descarga nuvem-solo no último passo, carga média do seu valor nos últimos 50 m e a carga transferida para o solo após a descarga de retorno, além dos mesmos parâmetros para a torre.

Tabela 5.5 – Resumo dos resultados de carga associados a parâmetros do caso com solo plano e com relevo análogo ao presente em MCS

Caso avaliado	Solo plano	Relevo do MCS
<b>Carga na parte inferior do canal da descarga nuvem-solo no instante do último passo</b>		
Magnitude [C]	-1,60	-1,61
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	100,6%
<b>Carga nos 50 m da extremidade inferior do canal no último passo</b>		
Magnitude [mC]	-62,8	-65,2
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	103,9%
<b>Carga final no canal da descarga nuvem-solo após a descarga de retorno</b>		
Magnitude [C]	5,80	4,88
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	84,1%
<b>Carga presente na torre no instante do último passo do canal da descarga nuvem-solo</b>		
Magnitude [mC]	3,15	12,3
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	389,8%
<b>Carga final na torre após a descarga de retorno</b>		
Magnitude [mC]	0,15	44,1
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	2941,3%

Percebem-se da Tabela 5.5 que os valores de carga associados ao canal da descarga nuvem-solo são similares para os dois casos. Com o relevo similar ao MCS, a carga na extremidade inferior no instante anterior ao contato com o solo é 0,6% maior que o obtido com o solo plano, enquanto a carga média nos últimos 50 m possui diferença de 3,9%. A carga final, após a descarga de retorno, no canal da descarga nuvem-solo é 15,9% menor que o caso com solo plano. Este parâmetro já sugere a influência do relevo do solo nas cargas finais após o processo de descarga de retorno.

No momento anterior ao contato com o solo, a carga na torre é 289,9% superior ao caso com solo plano. Observa-se que a carga final na torre instrumentada após a descarga de retorno é cerca de 29 vezes maior no caso com relevo.

Por fim, apresenta-se na Figura 5.15 o campo elétrico calculado a 50 m de distância do ponto de incidência da descarga nuvem-solo. Destaca-se que o último passo de simulação se refere ao canal à distância de 1 m do topo da torre.

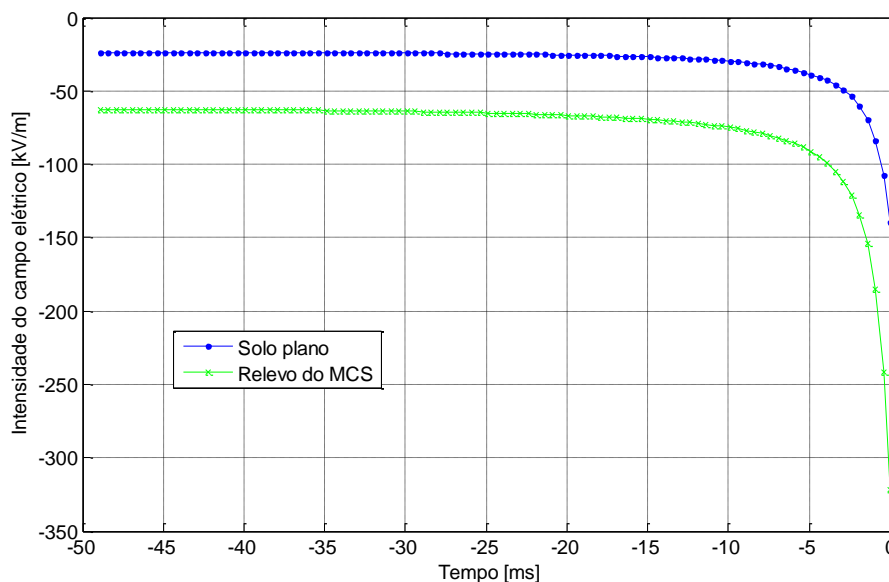


Figura 5.15 – Perfil do campo elétrico ao nível do solo à 50 m de distância do ponto de incidência da descarga nuvem-solo (último passo de simulação com o canal a 1 m do topo da torre)

Observa-se da Figura 5.15 que o perfil do campo elétrico com o relevo do solo possui o mesmo comportamento do caso com o solo plano. A diferença entre eles é a intensidade dos valores calculados com o relevo, que é mais de duas vezes superior ao caso com solo plano. Destaca-se que a intensidade final de campo elétrico para o caso com solo plano e com relevo é, respectivamente, de -139,8 e -321,5 kV/m, uma diferença de 130,0%. Nota-se que a influência da torre é a de atenuar os níveis de campo elétrico no solo quando comparado a um caso sem a estrutura aterrada, como o apresentado na Figura 4.16. O valor da intensidade do campo elétrico no instante em que o canal está a 100 m do solo, para um solo plano, é igual a -161,2 e -107,7 kV/m, respectivamente, para as condições sem e com a presença de torre. Nesta situação, o valor da condição com torre possui valor 33,2% menor que o caso sem a estrutura aterrada.

### 5.5.2 O efeito do canal ascendente no caso de uma descarga nuvem-solo com presença de torre

Considera-se um canal da descarga nuvem-solo, sem ramificação, com raio de 100 cm e que evolui por passos de 50 m, similar ao caso representado na Figura 5.16. No solo, há a presença de uma torre instrumentada de 60 m de altura e um canal ascendente de 90 m, ambos com raio de 20 cm. A velocidade de todos os canais é considerada constante e igual a  $10^5$  m/s, sendo o instante de tempo do contato com o solo determinado por esta condição.

O solo é o mesmo apresentado na Figura 4.7 da seção 4.2.2, cujo ponto mais alto se situa a 1401 m de altitude. Como o conjunto aterrado possui 150 m de altura, a extremidade superior final do canal ascendente se localiza a 1551 m de altitude.

As considerações realizadas para a seção 5.5.1 se aplicam neste caso, seja em relação ao relevo do solo, nuvem de tempestade e ao ponto de medição de campo elétrico. A Figura 5.16 exhibe uma ilustração com as condições do problema.

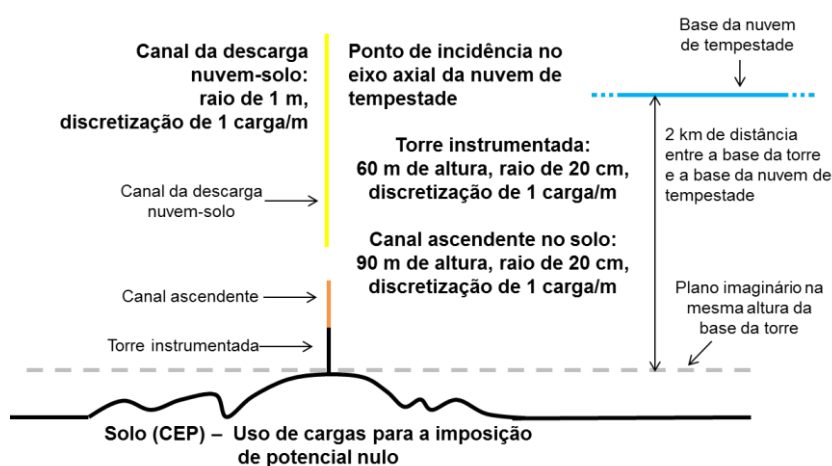


Figura 5.16 – Representação do problema avaliado considerando o relevo do solo

A Figura 5.17 apresenta a d.d.p. entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo para o caso com solo plano e a condição com o relevo representativo de MCS. Destaca-se que o último passo de simulação para as curvas de d.d.p. considera o canal da descarga a 1 m do canal ascendente, enquanto o de campo elétrico apresenta distância de 50 m entre a extremidade inferior do canal negativo descendente e o canal ascendente.

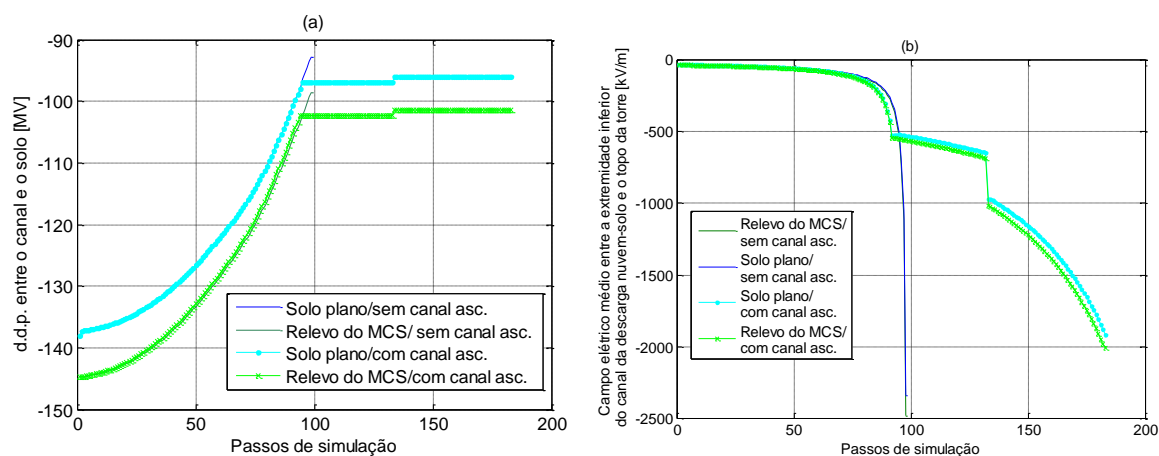


Figura 5.17 – (a) Diferença de potencial entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo e (b) campo elétrico médio para os casos avaliados

Percebe-se da Figura 5.17 que as duas curvas de d.d.p. que consideram a presença de canal ascendente possuem o mesmo comportamento. A introdução do relevo do solo aumenta a intensidade da d.d.p. entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo, resultando em um valor médio 5,23% maior que o caso com solo plano ao longo dos passos de simulação. Destaca-se que o valor final de d.d.p. para a condição com relevo é de -100,6 MV, valor 4,5% superior ao caso com solo plano. Em relação ao campo elétrico médio, o relevo do solo resulta em um valor de -2011,0 kV/m no instante anterior ao contato com o solo, valor também 4,5% maior que o caso com solo plano, que tem -1920,0 kV/m. Devido ao canal ascendente, destaca-se a diminuição no campo elétrico médio em relação ao caso com torre, mas sem o canal. Deve-se destacar que a extremidade inferior do canal descendente negativo atinge 150 m de altitude na condição com canal ascendente, e 60 m sem sua consideração.

O canal ascendente, nos instantes em que propaga, reduz a taxa de diminuição de d.d.p. e a taxa de aumento do campo elétrico médio. Esta característica resulta nos degraus observados a partir do passo 96 da Figura 5.17. A súbita e leve diminuição da magnitude da d.d.p. percebida na d.d.p. no passo 134 se deve ao passo de evolução do canal da descarga nuvem-solo concomitante à evolução do canal ascendente. O mesmo efeito é percebido no passo 134 do campo elétrico médio.

Quando se compara os casos com solo plano e com o cômputo do relevo às condições sem canal ascendente, observa-se um aumento de 3,5% na d.d.p. e diminuição de 17,9% no campo elétrico médio para o caso com solo plano e um

acréscimo de 2,0% na d.d.p. e decréscimo de 19,0% no campo elétrico para o caso com relevo.

A Figura 5.18 apresenta as cargas induzidas nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal da descarga nuvem-solo ao longo de sua evolução.

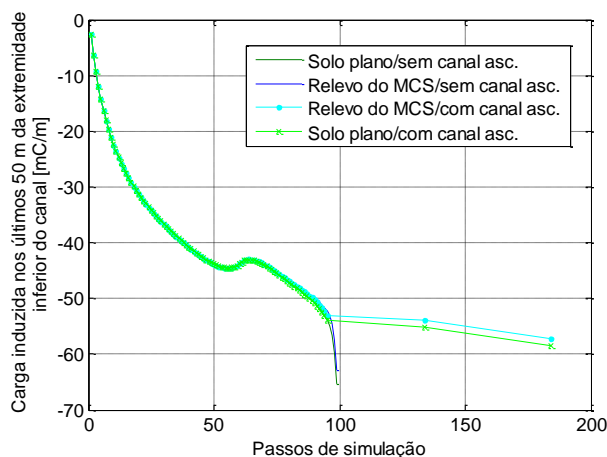


Figura 5.18 – (a) Carga induzida nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal em formação da descarga nuvem-solo (último passo de simulação com o canal a 1 m da extremidade superior do canal ascendente)

Nota-se da Figura 5.18 que as curvas oriundas da condição com relevo análogo ao presente em MCS são similares àquelas obtidas com o solo plano. A principal diferença entre os casos é o valor no instante anterior ao contato com o solo. Observa-se na Figura 5.18 (a) uma menor intensidade da carga presente no caso com relevo, de -58,5 mC, em relação ao solo plano, com -57,3 mC. Essa diferença é de, aproximadamente, 2,1%. Destaca-se que, em comparação ao caso sem canal ascendente, a carga induzida é menor nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal negativo descendente. Um detalhe importante é que o caso com canal ascendente apresenta uma distância final entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo de 150 m, enquanto a condição sem canal ascendente, de 60 m. Desta forma, como indica o resultado, é esperado que a carga presente na parte final do canal negativo descendente seja menor para o caso com canal ascendente por estar mais longe do solo.

A Tabela 5.6 apresenta, respectivamente, dados de carga final na extremidade inferior do canal da descarga nuvem-solo no último passo, carga média do seu valor nos últimos 50 m e a carga transferida para o solo após a descarga de retorno, além dos mesmos parâmetros para a torre e canal ascendente.

Tabela 5.6 – Resumo dos resultados de carga associados a parâmetros do caso com solo plano e com relevo análogo ao presente em MCS

Caso avaliado	Solo plano	Relevo do MCS
<b>Carga na parte inferior do canal da descarga nuvem-solo no instante do último passo</b>		
Magnitude [C]	-1,57	-1,58
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	100,6%
<b>Carga nos 50 m da extremidade inferior do canal no último passo</b>		
Magnitude [mC]	-57,3	-58,5
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	102,1%
<b>Carga final no canal da descarga nuvem-solo após a descarga de retorno</b>		
Magnitude [C]	5,78	4,81
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	83,2%
<b>Carga presente na torre no instante do último passo do canal da descarga nuvem-solo</b>		
Magnitude [mC]	2,43	2,47
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	101,6%
<b>Carga final no conjunto torre/canal ascendente após a descarga de retorno</b>		
Magnitude [mC]	1,20	93,2
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	7768,3%
<b>Carga presente no canal ascendente no instante do último passo do canal da descarga nuvem-solo</b>		
Magnitude [mC]	16,1	36,9
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	229,4%

Nota-se da Tabela 5.6 que os valores de carga associados ao canal da descarga nuvem-solo são similares para os dois casos. Com o relevo similar ao MCS, a carga na extremidade inferior no instante anterior ao contato com o solo é 0,6% maior que o obtido com o solo plano, enquanto a carga final nos últimos 50 m possui discrepância de 2,1%. A carga final no canal da descarga nuvem-solo após a descarga de retorno é 16,8% menor que o caso com solo plano.

No instante anterior ao contato com o solo, a carga na torre é 1,6% superior ao caso com solo plano, enquanto no canal ascendente, 129,4% maior. Percebe-se que a carga após a descarga de retorno no conjunto torre/canal ascendente é cerca de 78 vezes maior no caso com relevo.

Por fim, apresenta-se na Figura 5.19 o campo elétrico calculado a 50 m de distância do ponto de incidência da descarga nuvem-solo. Destaca-se que o último passo de simulação considera o canal da descarga negativa descendente a 1 m da extremidade superior do canal ascendente.

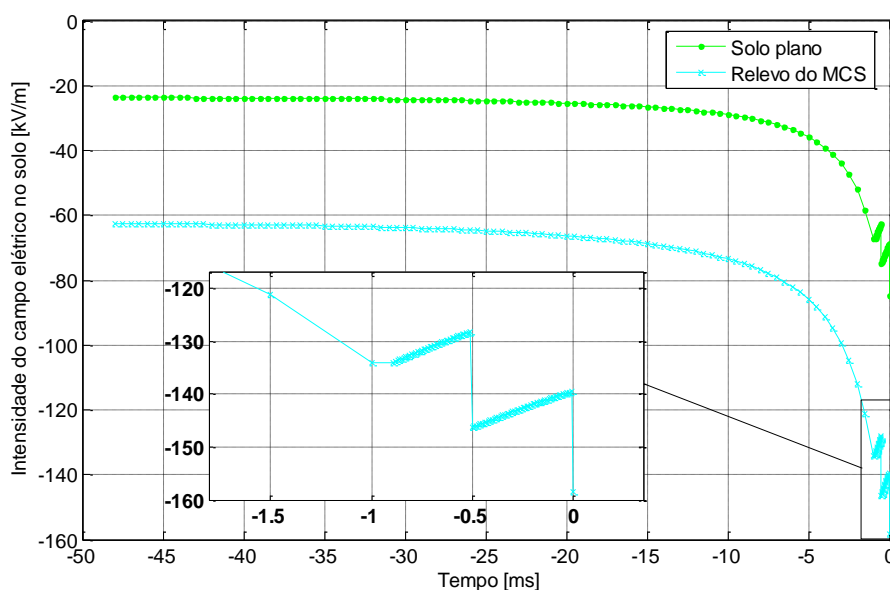


Figura 5.19 – Perfil do campo elétrico ao nível do solo à 50 m de distância do ponto de incidência da descarga nuvem-solo (último passo de simulação com o canal a 1 m da extremidade superior do canal ascendente)

Observa-se da Figura 5.19 que o perfil do campo elétrico com o relevo do solo possui o mesmo comportamento do caso com o solo plano. A diferença entre eles é a intensidade dos valores calculados com o relevo, que é quase duas vezes maior que o caso com solo plano. Percebe-se que o canal ascendente diminui a intensidade do campo elétrico na região em que se apresenta, ou seja, a partir de 0,9 ms do instante de tempo nulo, que corresponde ao último passo de simulação. Isto resulta em um nível final de campo elétrico quase duas vezes menor que o mostrado na Figura 5.15, que não possui canal ascendente. Destaca-se que a intensidade final de campo elétrico para o caso com solo plano e com relevo é, respectivamente, de -84,7 e -158,4 kV/m, uma diferença de 87,0%. A comparação do campo elétrico ao nível do solo para o caso sem canal ascendente indica que este reduz a intensidade máxima do parâmetro elétrico avaliado. Os resultados obtidos com canal ascendente apresentam um valor final, aproximadamente, 45% menor que o caso sem canal ascendente. Novamente, a maior distância entre o canal da descarga nuvem-solo e o ponto de medição ao nível do solo para o caso com canal ascendente é indicado como o principal agente para esta diferença, já que as cargas associadas ao conjunto torre/canal ascendente são muito menores que aquelas do canal negativo descendente, ou seja, seu impacto na medição de campo elétrico é mínimo.

### 5.5.3 O efeito da ramificação no caso de uma descarga nuvem-solo com presença de torre e canal ascendente

Considera-se um canal da descarga nuvem-solo, com ramificação, com raio de 100 cm e que evolui por passos de 50 m, similar ao caso representado na Figura 5.20. Destaca-se que a ramificação possui raio de 100 cm, 200 m de comprimento e início a 1951 m de altitude, ou seja, 550 m de altura em relação ao ponto mais alto do relevo do solo. Há a presença de uma torre instrumentada de 60 m de altura e um canal ascendente de 90 m, ambos com raio de 20 cm. A velocidade de todos os canais é considerada constante e igual a  $10^5$  m/s, sendo o instante de tempo do contato com o solo determinado por esta condição.

O intuito dessa avaliação é a presença de um caso em que há o aumento da magnitude das cargas presentes no canal por conta da presença da torre. Além disso, registros de vídeo de canais relativos a descargas descendentes negativas apresentam com frequência, nos seus últimos passos de evolução, a presença de ramificações junto ao seu *leader*.

As considerações realizadas para a seção 5.5.1 se aplicam neste caso, seja em relação ao relevo do solo, nuvem de tempestade e ao ponto de medição de campo elétrico. A Figura 5.20 apresenta uma ilustração que representa as condições do problema analisado.

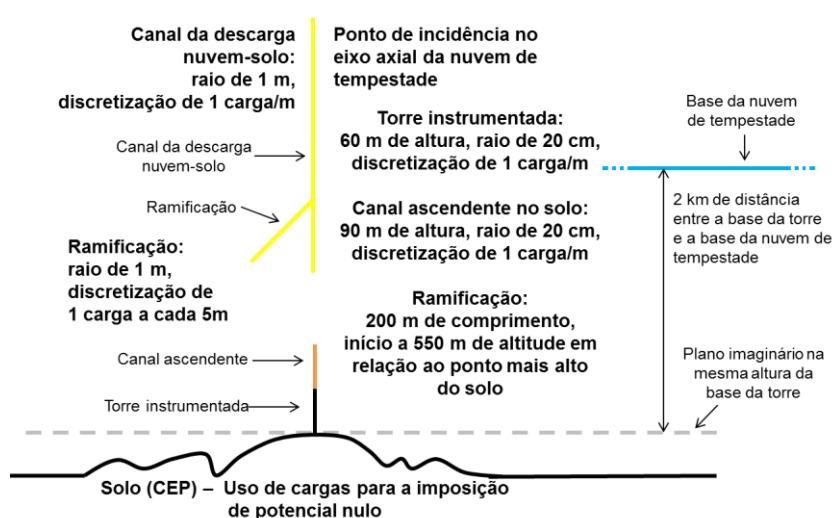


Figura 5.20 – Representação do problema avaliado considerando o relevo do solo

A Figura 5.21 apresenta a d.d.p. entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo para o caso com solo plano e a condição com o relevo representativo de MCS. Destaca-se que o último passo de simulação para as curvas de d.d.p. considera o canal da descarga a 1 m do canal ascendente, enquanto o de campo elétrico apresenta distância de 50 m entre a extremidade inferior do canal negativo descendente e o canal ascendente.

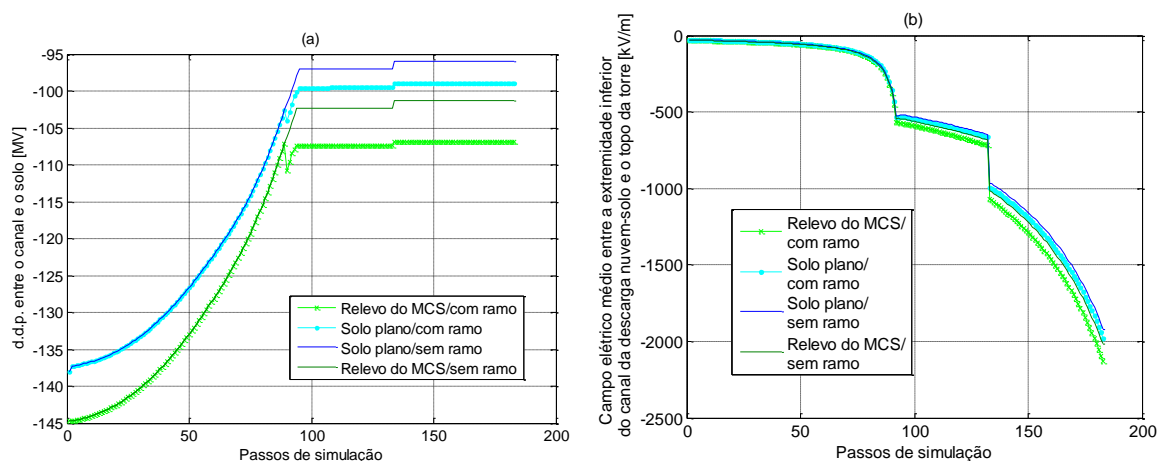


Figura 5.21 – (a) Diferença de potencial entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo e (b) campo elétrico médio para os casos avaliados

Observa-se da Figura 5.21 que as duas curvas de d.d.p. que consideram a presença de ramificação no canal principal possuem o mesmo comportamento. Como no caso sem ramificação, a introdução do relevo do solo aumenta a intensidade da d.d.p. entre o canal da descarga nuvem-solo e o solo, resultando em um valor médio 6,5% maior que o caso com solo plano ao longo dos passos de simulação. O valor final de d.d.p. para a condição com relevo é de -106,5 MV, valor 7,1% superior ao caso com solo plano. Em relação ao campo elétrico médio, o relevo do solo resulta em um valor de -2130,8 kV/m no instante anterior ao contato com o solo, valor também 7,1% maior que o caso com solo plano, que tem -1979,5 kV/m. A ramificação produz níveis de d.d.p. e campo elétrico médio maiores que o caso sem ramo. Este comportamento se deve ao aumento de cargas negativas próximas ao conjunto torre/canal ascendente, que possui cargas positivas induzidas. Isto resulta na intensificação do campo elétrico médio na região e o aumento, em magnitude, da d.d.p. entre o canal da descarga nuvem-solo e a estrutura aterrada.

A d.d.p. final e campo elétrico médio final apresentam maiores intensidades para o caso com a presença de ramificação. Tais diferenças são da ordem de 4,5%

em relação aos casos sem a presença de ramificação. Desta forma, para a ramificação considerada, o resultado indica que o ramo contribui para o aumento do potencial elétrico no canal da descarga nuvem-solo, o que implica na intensificação da d.d.p. e campo elétrico médio entre o canal e o topo do canal ascendente.

A Figura 5.22 apresenta as cargas induzidas nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal da descarga nuvem-solo ao longo de sua evolução, além da diferença de cargas entre um passo e outro. Destaca-se que o último passo de simulação considera o canal da descarga negativa descendente a 1 m da extremidade superior do canal ascendente.

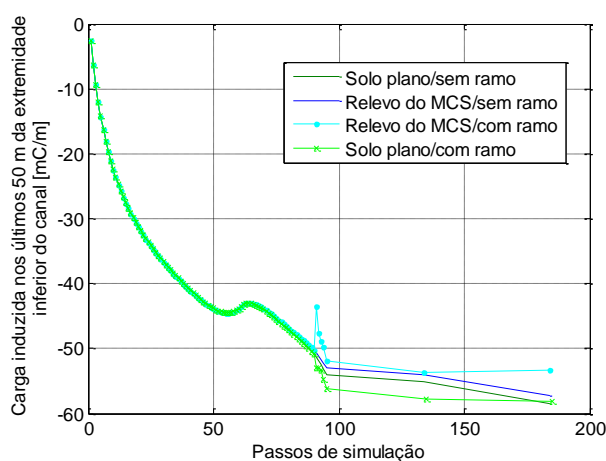


Figura 5.22 – (a) Carga induzida nos últimos 50 m da extremidade inferior do canal em formação da descarga nuvem-solo (último passo de simulação com o canal a 1 m da extremidade superior do canal ascendente)

Percebe-se da Figura 5.22 que as curvas são semelhantes até o início da ramificação. Neste instante, a carga no canal para o caso com solo plano mantém a tendência de crescimento em módulo e é mais intensa que a do caso com o cômputo do relevo. Este resultado indica uma influência do perfil do solo na ramificação e, conseqüentemente, nas cargas induzidas no canal da descarga nuvem-solo. Nota-se da Figura 5.22 (a) que a carga final presente no caso com relevo, de -58,1 mC, é maior que a correspondente ao solo plano, de -53,3 mC. A diferença apresentada é de, aproximadamente, 9,1%.

Embora os valores de d.d.p. e campo elétrico médio sejam superiores no caso com ramificação, o mesmo não se pode dizer sobre a carga induzida no canal negativo descendente nos seus últimos 50 m. Seu valor, quando comparado ao caso sem ramificação, é cerca de 0,5% menor. Este comportamento se deve à presença

das cargas negativas na ramificação em adição às cargas negativas na extremidade inferior do canal da descarga nuvem-solo. Neste caso, as cargas da ramificação limitam a magnitude daquelas presentes nos últimos 50 m do canal, o que leva a um menor valor deste parâmetro, embora de pequena diferença, em relação ao caso sem presença de ramos.

A Tabela 5.7 apresenta, respectivamente, dados de carga final na parte inferior do canal da descarga nuvem-solo no último passo, carga média nos últimos 50 m e a carga final após a descarga de retorno, além dos mesmos parâmetros para a ramificação, torre, canal ascendente e solo.

Tabela 5.7 – Resumo dos resultados de carga associados a parâmetros do caso com solo plano e com relevo análogo ao presente em MCS

Caso avaliado	Solo plano	Relevo do MCS
<b>Carga na parte inferior do canal da descarga nuvem-solo no instante do último passo</b>		
Magnitude [C]	-1,70	-1,72
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	101,2%
<b>Carga nos 50 m da extremidade inferior do canal no último passo</b>		
Magnitude [mC]	-53,3	-58,1
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	109,1%
<b>Carga final no canal da descarga nuvem-solo após a descarga de retorno</b>		
Magnitude [C]	5,78	4,78
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	82,7%
<b>Carga na ramificação no instante do último passo do canal da descarga nuvem-solo</b>		
Magnitude [C]	-0,61	-0,58
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	95,1%
<b>Carga final na ramificação após a descarga de retorno</b>		
Magnitude [mC]	21,9	357,1
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	1628,2%
<b>Carga presente na torre no instante do último passo do canal da descarga nuvem-solo</b>		
Magnitude [mC]	1,85	2,66
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	143,8%
<b>Carga final no conjunto torre/canal ascendente após descarga de retorno</b>		
Magnitude [mC]	1,18	91,8
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	7777,1%
<b>Carga presente no canal ascendente no instante do último passo do canal da descarga nuvem-solo</b>		
Magnitude [mC]	15,3	19,9
Valor percentual em relação ao caso com solo plano	100,0%	130,0%

Observa-se da Tabela 5.7 que os valores de carga associados ao canal da descarga nuvem-solo são similares para os casos avaliados. Com o relevo análogo ao do MCS, a carga na extremidade inferior no instante anterior ao contato com o solo é 1,2% maior que o obtido com o solo plano, enquanto a carga final nos últimos 50 m difere de 9,1%.

A carga final, após a descarga de retorno, no canal da descarga nuvem-solo é 17,3% menor que o caso com solo plano, similar aos 16,8% apresentados para o caso sem ramificação.

Os parâmetros associados à ramificação são, de forma geral, até 5%, para o pior caso, menores que o caso com solo plano. A exceção é a carga presente na região após a descarga de retorno, igual a 357,1 mC. Este valor é mais de 16 vezes maior que o apresentado no caso com solo plano, o que evidencia a influência do relevo do solo na carga da ramificação no processo da descarga de retorno.

No instante anterior ao contato com o solo, a carga na torre é 43,8% superior ao caso com solo plano, enquanto no canal ascendente, 30,0% maior. Percebe-se que a carga após a descarga de retorno no conjunto torre/canal ascendente é cerca de 78 vezes maior no caso com relevo, como na condição sem ramificação.

Por fim, apresenta-se na Figura 5.23 o campo elétrico calculado a 50 m de distância do ponto de incidência da descarga nuvem-solo. Destaca-se que o último passo de simulação considera o canal negativo descendente a 1 m da extremidade superior do canal ascendente.

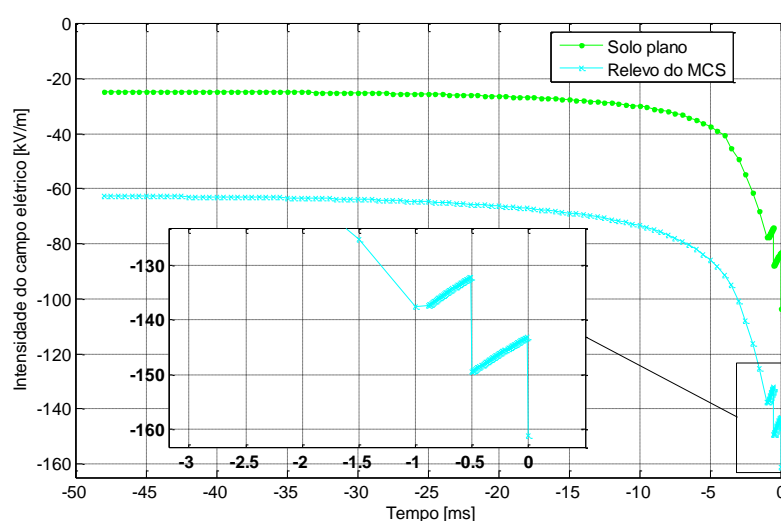


Figura 5.23 – Perfil do campo elétrico ao nível do solo à 50 m de distância do ponto de incidência da descarga nuvem-solo (último passo de simulação com o canal a 1 m da extremidade superior do canal ascendente)

Observa-se da Figura 5.23 que o perfil do campo elétrico com o relevo do solo possui o mesmo comportamento do caso com o solo plano. A diferença entre eles é a intensidade dos valores calculados com o relevo, que é cerca de 1,6 vez maior que o caso com solo plano. Destaca-se que a intensidade final de campo elétrico para o caso com solo plano e com relevo é, respectivamente, de -103,6 e -161,2, uma diferença de 55,6%. O campo elétrico obtido com a presença de ramificação é cerca de, respectivamente, 22,2% e 1,7% para os casos com solo plano e com o relevo

presente em MCS em relação à condição sem ramo. Percebe-se que o relevo do solo considerado é menos sujeito aos efeitos das cargas presentes na ramificação.

#### **5.5.4 O cômputo do relevo e o seu impacto sobre o campo elétrico**

Nas análises anteriores, buscou-se avaliar o efeito do cômputo do relevo do solo em relação a parâmetros como d.d.p., campo elétrico médio e ao nível do solo, além das cargas induzidas nos componentes representados no domínio computacional.

Um ponto não avaliado consiste na percepção do efeito do relevo do solo na relação entre o campo elétrico ao longo de pontos acima da torre e aquele medido ao nível do solo. Essa comparação pode indicar novos entendimentos sobre o real impacto do cômputo do relevo, principalmente em relação a condições presentes em medições de grandezas associadas às descargas atmosféricas.

Essa avaliação deve levar em conta representações mais próximas das presentes nos locais de medição. As simulações com relevo do solo até aqui apresentadas consideram uma região em que o solo é fixado à uma altitude igual a 1140 m, o que é correto para o relevo em um domínio de 2 km ao redor da torre presente em MCS. Uma pesquisa do relevo em uma área mais próxima daquela apresentada pela nuvem, ou seja, de 5 km ao redor da torre, indica uma altitude média de 1000 m como a mais representativa. Ademais, o efeito do relevo é mais bem compreendido quando comparado com um caso em que o solo plano é especificado a uma altitude correspondente ao nível em que a altitude é constante na condição com relevo. Assim, apenas a região com os dados originais do relevo se diferenciam do nível em que o solo plano é posicionado e características relacionadas à sua presença tendem a ser mais bem percebidas.

Para a análise do efeito do relevo, escolheram-se quatro representações de solo para as simulações: duas condições para o solo plano e outras duas para o cômputo do relevo. As primeiras condições do solo plano e com cômputo do relevo, denominadas, respectivamente, de “Solo plano (Condição 1)” e “Relevo do MCS (Condição 1)”, são iguais às simuladas até este ponto do texto. O “Solo plano (Condição 1)” considera um solo plano com torre de 60 m, em que a distância entre a base da estrutura aterrada e a base da nuvem de tempestade é igual a 2 km. Já o “Relevo do MCS (Condição 1)” considera o mesmo solo apresentado na Figura 4.7,

cujo ponto mais alto se situa a 1401 m de altitude, mesma altura da base da torre de MCS. Como a torre possui 60 m de altura, o topo desta estrutura aterrada se localiza a 1461 m de altitude. A base da nuvem de tempestade se encontra a altitude de 3401 m, ou seja, 2000 m acima da base da torre e 1940 m acima do topo da estrutura aterrada.

As outras condições consideradas para o solo plano e o cômputo do relevo podem ser comparadas com maior facilidade para o entendimento de seus efeitos. O “Solo plano (Condição 2)” é similar a primeira condição, mas com a diferença de que a base da nuvem de tempestade se encontra a 2401 m acima do nível do solo ou base da torre, isto é, 2341 m acima do topo da estrutura metálica. O “Relevo do MCS (Condição 2)” também é similar a primeira condição, mas considera a representação aproximada do solo a partir da circunferência de raio de 1,5 a 5 km com valores de altitude iguais a 1 km, diferentemente dos 1140 m do outro caso. A base da nuvem de tempestade também se encontra 2 km acima da base da torre, ou seja, 1940 m acima do topo da torre. A Figura 5.24 apresenta a representação de cada condição simulada nesta seção.

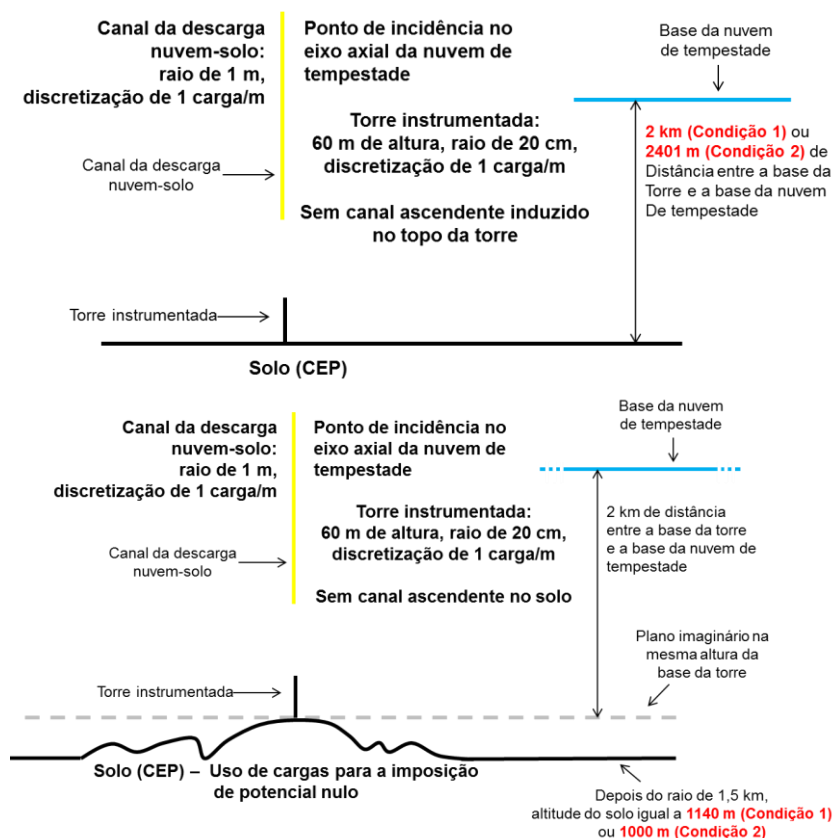


Figura 5.24 – Representação dos casos avaliados para o solo plano e com o cômputo do seu relevo

Observa-se dos casos acima que a condição 2 com solo plano é similar a condição 2 com o cômputo do relevo do solo. Percebe-se que a diferença entre as duas é o relevo do MCS no interior da circunferência de raio 1,5 km, o que possibilita uma comparação mais fiel do impacto do relevo em relação ao solo plano para os parâmetros elétricos de interesse, notadamente o campo elétrico ao nível do solo a 50 m de distância da torre, a d.d.p. e campo elétrico médio entre a extremidade do canal da descarga nuvem-solo e a torre.

A Figura 5.25 apresenta a d.d.p. entre o canal da descarga nuvem-solo e a torre para o caso com solo plano e a condição com o relevo representativo de MCS, enquanto a Tabela 5.8 mostra o resumo dos principais resultados. Destaca-se que as curvas de d.d.p. consideram o canal, no último passo, a distância de 1 m do topo da torre, ou seja, a 61 m do solo. Por outro lado, o último passo do campo elétrico médio se refere ao canal afastado de 40 m do topo da torre, isto é, a 100 m do solo.

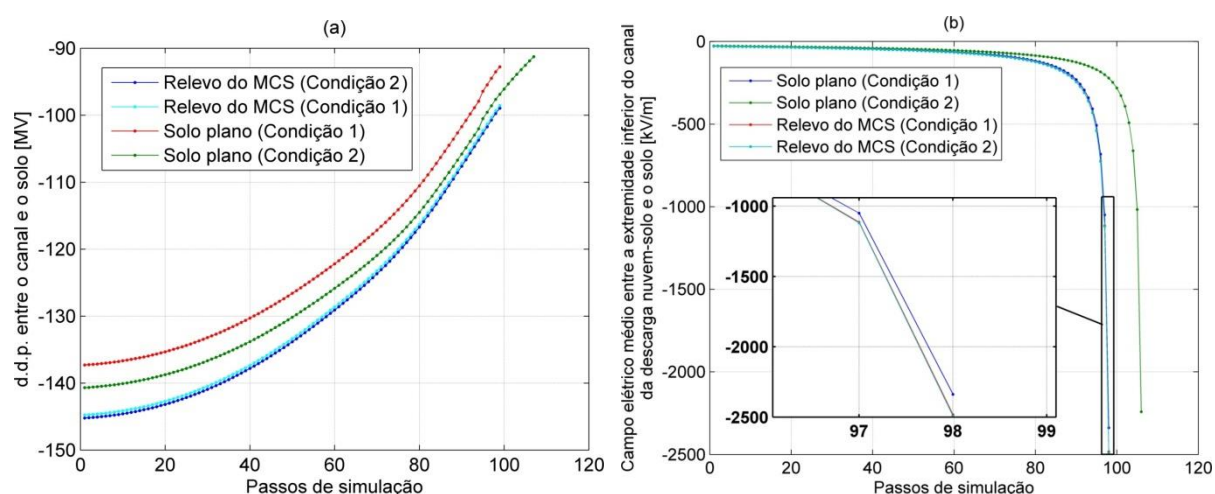


Figura 5.25 – (a) Diferença de potencial entre o canal da descarga nuvem-solo e a torre e (b) campo elétrico médio para os casos avaliados

Tabela 5.8 – Resumo dos resultados de d.d.p. e campo elétrico médio para os casos avaliados

Casos simulados	Solo plano (Condição 1)	Solo plano (Condição 2)	Relevo do MCS (Condição 1)	Relevo do MCS (Condição 2)
Magnitude da d.d.p. no último passo [MV]	-92,8	-91,3	-98,6	-99,0
Magnitude do campo elétrico médio entre a extremidade inferior do canal da descarga nuvem-solo e a torre no último passo [kV/m]	-2338,6	-2241,5	-2483,5	-2493,7

Nota-se da Figura 5.25 que a curva de d.d.p. dos casos com relevo apresenta maior magnitude em relação aos casos com solo plano. A condição 2 com solo plano apresenta um valor final de d.d.p. por conta de seu maior número de passos de simulação devido à maior distância da base da nuvem de tempestade em relação aos outros casos. A mesma justificativa se aplica para explicar a diferença da curva de campo elétrico médio do caso com relevo do MCS, na condição 2, em relação aos outros casos.

Observa-se da Tabela 5.8 a proximidade dos valores de d.d.p. e campo elétrico médio das condições 1 e 2 com relevo do solo similar ao presente em MCS, sendo que a condição 2 apresenta maior magnitude – valor, em média, 0,4% maior. Quando se compara a condição 2 com solo plano e com o cômputo do relevo do solo, percebe-se que o último caso possui um valor final 8,4% maior. O mesmo comportamento é observado para o campo elétrico médio, em que o cômputo do relevo representa um aumento de 11,3% no valor final quando comparado ao caso com solo plano. Atribui-se estas diferenças na intensidade a influência das cargas presentes no relevo do solo similar ao presente em MCS.

Outro parâmetro possível de calcular é o campo elétrico presente em posições logo acima do topo da torre. A partir dele, será possível relacionar o campo elétrico ao nível do solo com o campo acima do topo da torre. Assim, pode-se ter uma estimativa aproximada do campo elétrico acima da torre em função dos medidos ao nível do solo.

A Figura 5.26 e a Tabela 5.9 apresentam os resultados de campo elétrico em pontos acima do topo da torre. Destaca-se que o último passo de simulação apresentado na Figura 5.26 se refere à condição em que o canal da descarga nuvem-solo está a 40 m do topo da torre.

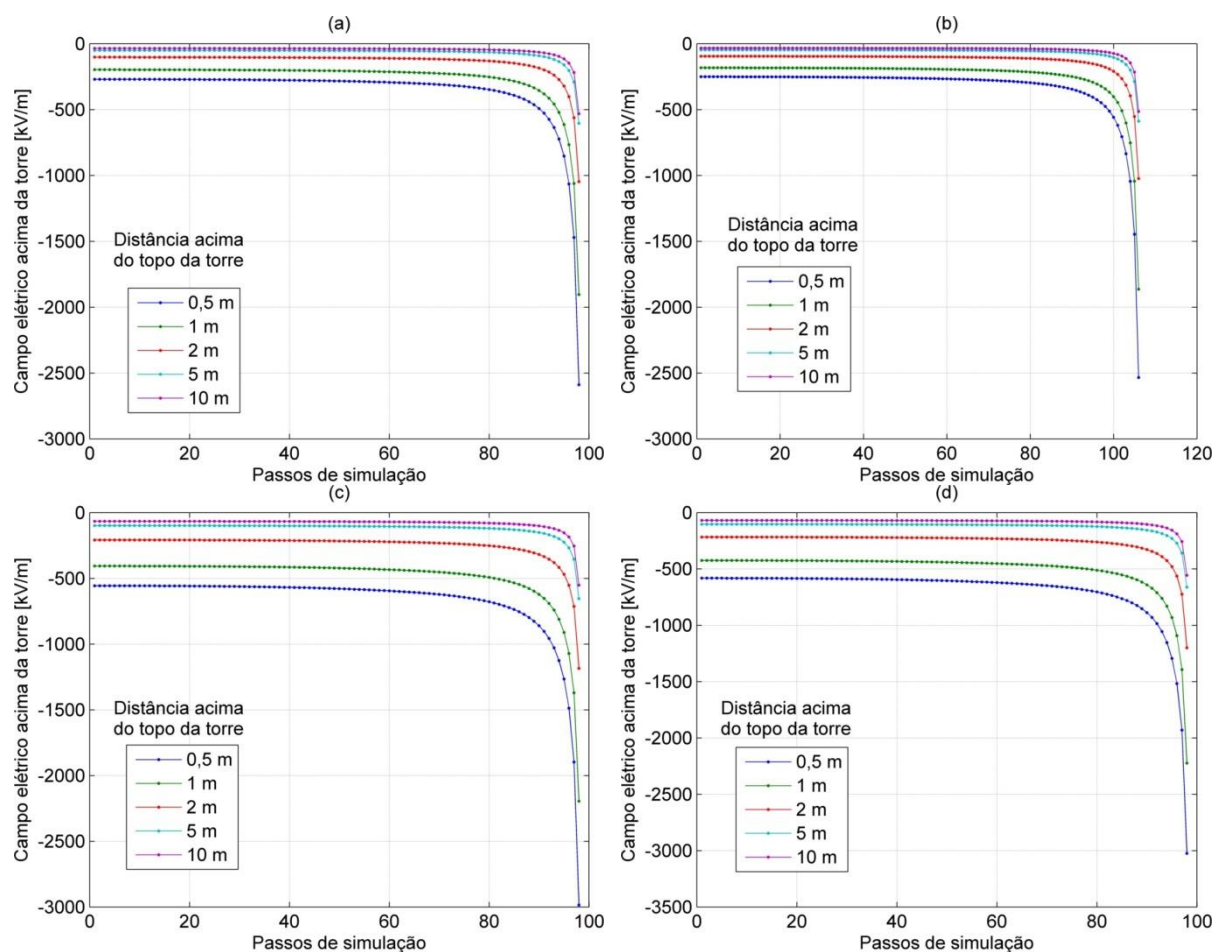


Figura 5.26 – Campo elétrico medido a 50 cm, 1 m, 2m, 5m e 10 m acima do topo da torre para os casos (a) com solo plano na condição 1 e (b) 2 e (c) com o cômputo do relevo do solo na condição 1 e (d) 2

Tabela 5.9 – Resumo dos campos elétricos finais em diferentes pontos acima do topo da torre para os casos avaliados

Casos simulados	Campo elétrico final a diferentes distâncias acima do topo da torre [kV/m]				
	0,5 m	1 m	2 m	5 m	10 m
<b>Solo plano (Condição 1)</b>	-2589,7	-1904,3	-1047,3	-604,5	-532,4
<b>Solo plano (Condição 2)</b>	-2534,7	-1863,8	-1023,6	-588,3	-514,5
<b>Relevo do MCS (Condição 1)</b>	-2985,1	-2195,4	-1184,8	-654,3	-551,9
<b>Relevo do MCS (Condição 2)</b>	-3024,5	-2223,7	-1199,4	-661,6	-557,3

Há similaridade do comportamento das curvas como um todo para as diferentes distâncias escolhidas e as discrepâncias encontradas se referem à magnitude nos casos avaliados. Como esperado, observa-se que pontos mais próximos da torre apresentam maior magnitude de campo elétrico.

A principal comparação dos resultados apresentados na Tabela 5.9 é sobre a condição 2 dos casos com solo plano e com relevo similar ao presente em MCS. Destaca-se que o relevo implica em maiores magnitudes de campo elétrico, sendo

cerca de 19,3% maior que a condição com solo plano para as distâncias de 50 cm e 1 m acima do topo da torre.

O campo elétrico ao nível do solo medido a 50 m da torre é apresentado na Figura 5.27 e seus resultados no último passo de simulação, na Tabela 5.10. Destaca-se que o último passo apresentado se refere à condição em que o canal da descarga nuvem-solo está a 1 m de distância do topo da torre.

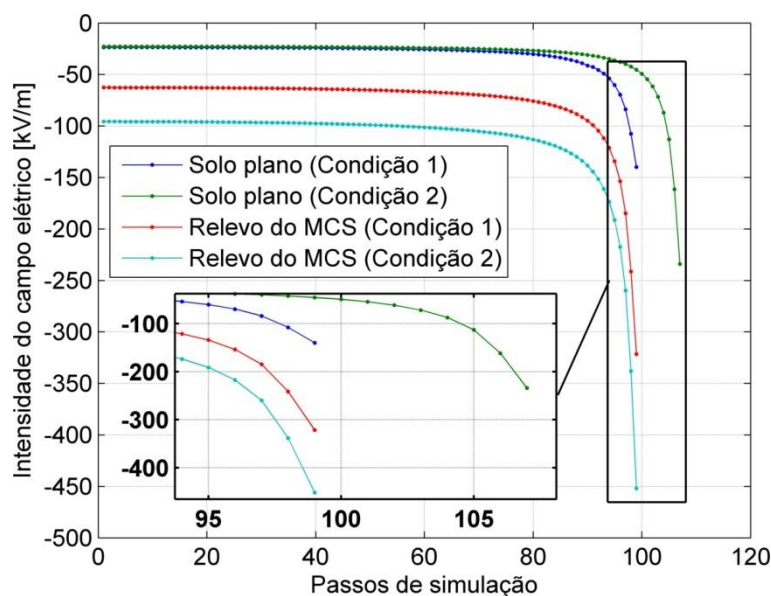


Figura 5.27 – Intensidade de campo elétrico ao nível do solo calculado a 50 m de distância da torre para os casos avaliados

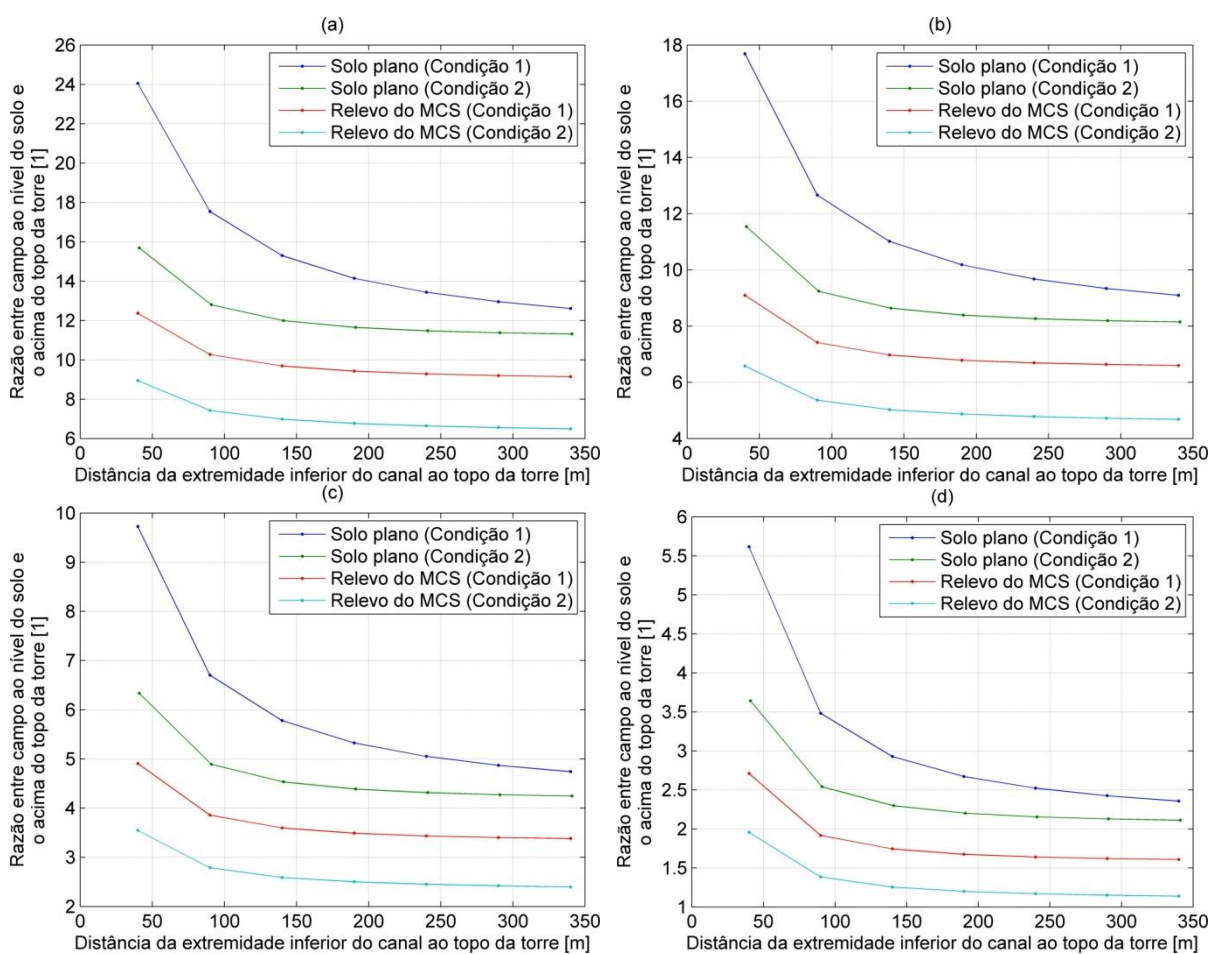
Tabela 5.10 – Intensidade de campo elétrico ao nível do solo a 50 m de distância na torre no último passo de simulação

Casos simulados	Solo plano (Condição 1)	Solo plano (Condição 2)	Relevo do MCS (Condição 1)	Relevo do MCS (Condição 2)
Intensidade de campo elétrico no último passo [kV/m]	-139,8	-234,1	-321,5	-452,1

Observa-se da Figura 5.27 e da Tabela 5.10 que, para o solo plano, a condição 2 implica em um aumento de 67,4% na intensidade final de campo elétrico em relação a condição 1. Esta característica se deve à maior diferença de altura entre o solo e a base da nuvem de tempestade na condição 2, o que tende a produzir um canal descendente com cargas negativas de maior magnitude que a condição 1.

Por outro lado, o cômputo do relevo implica no aumento do campo elétrico ao nível do solo em todos os casos. Observa-se que sua condição 2 é cerca de 93,1% mais intensa que a mesma condição com solo plano.

Por fim, a Figura 5.28 e a Tabela 5.11 apresentam a relação entre o campo elétrico em diferentes posições acima do topo da torre e aquele ao nível do solo a 50 m de distância da torre. Destaca-se que o cálculo da relação entre os campos elétricos é realizado até o instante em que o canal da descarga nuvem-solo se encontra a 40 m de distância do topo da torre.



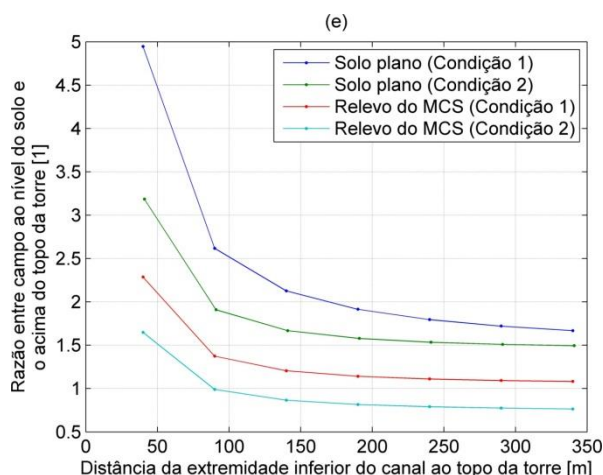


Figura 5.28 – Relação entre o campo elétrico em diferentes posições acima do topo da torre: (a) 50 cm, (b) 1 m, (c) 2m, (d) 5 m e (e) 10 m e aquele medido a 50 m da torre ao nível do solo

Tabela 5.11 – Valores da relação entre o campo elétrico acima do topo da torre em diferentes posições e aquele a 50 m da torre ao nível do solo

Solo plano (Condição 1)							
50 cm acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	12,61	12,95	13,43	14,14	15,30	17,54	24,05
1 m acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	9,10	9,34	9,68	10,18	11,01	12,66	17,69
2 m acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	4,74	4,87	5,05	5,33	5,78	6,71	9,73
5 m acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	2,36	2,42	2,52	2,67	2,93	3,48	5,62
10 m acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	1,67	1,72	1,80	1,91	2,13	2,62	4,95
Solo plano (Condição 2)							
50 cm acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	11,31	11,37	11,47	11,65	11,99	12,80	15,69
1 m acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	8,15	8,19	8,26	8,39	8,64	9,24	11,54
2 m acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	4,25	4,27	4,31	4,39	4,53	4,89	6,34
5 m acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da	2,11	2,13	2,15	2,20	2,30	2,54	3,64

Tabela 5.11 – Valores da relação entre o campo elétrico acima do topo da torre em diferentes posições e aquele a 50 m da torre ao nível do solo

relação							
10 m acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	1,49	1,51	1,53	1,58	1,67	1,91	3,19
<b>Relevo do MCS (Condição 1)</b>							
50 cm acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	9,14	9,20	9,29	9,43	9,68	10,27	12,37
1 m acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	6,60	6,64	6,69	6,79	6,997	7,41	9,10
2 m acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	3,38	3,40	3,43	3,49	3,60	3,86	4,91
5 m acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	1,61	1,62	1,64	1,67	1,74	1,92	2,71
10 m acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	1,08	1,09	1,11	1,14	1,21	1,37	2,29
<b>Relevo do MCS (Condição 2)</b>							
50 cm acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	6,49	6,56	6,64	6,77	6,98	7,43	8,94
1 m acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	4,68	4,72	4,78	4,87	5,03	5,36	6,58
2 m acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	2,40	2,42	2,45	2,50	2,59	2,79	3,55
5 m acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	1,14	1,15	1,17	1,20	1,25	1,38	1,96
10 m acima da torre	Canal 340 m acima da torre	Canal 290 m acima da torre	Canal 240 m acima da torre	Canal 190 m acima da torre	Canal 140 m acima da torre	Canal 90 m acima da torre	Canal 40 m acima da torre
Valor da relação	0,76	0,78	0,79	0,82	0,87	0,99	1,65

Nota-se da Figura 5.28 e a Tabela 5.11 que, como esperado, a relação calculada apresenta maiores valores quanto mais próximo do topo da torre estiver o ponto de medição e quanto mais próximo da torre estiver o canal da descarga nuvem-solo. Como o campo elétrico ao nível do solo no caso com o cômputo do seu relevo é bem maior que a condição com solo plano, maiores valores são percebidos

nas relações de campo elétrico nos casos com solo plano. Destaca-se que, para pontos 50 cm e 1 m acima do topo do solo, a condição 2 com relevo similar ao presente em MCS apresenta relações de campo elétrico, em média, 42,3% menores que a condição 2 com solo plano.

## 5.6 Considerações finais

Neste capítulo, a ferramenta desenvolvida baseada na abordagem de leader bipolar foi aplicada para monitorar o desenvolvimento do canal de descarga e a evolução de algumas grandezas associadas, tais quais o campo elétrico médio ao nível do solo, as cargas e a distribuição destas nos canais descendente e ascendente e a carga transferida pela corrente de retorno.

A ferramenta foi aplicada, inicialmente, a um caso básico, consistindo na incidência no solo a partir do desenvolvimento por passos de um canal vertical bipolar. Todos os resultados para o caso básico mostraram-se consistentes com aqueles desenvolvidos por Mazur e Ruhnke [7].

Em casos subsequentes, a representação do problema foi sendo aproximada da condição real de incidência, em particular, na torre do MCS. Assim, foi incluída a presença da torre sobre o solo plano e, em seguida, passou-se a considerar o relevo do solo local. Evoluiu-se para a inclusão do desenvolvimento de um canal ascendente a partir do topo da torre e, em seguida, incluiu-se a representação de ramificações no canal descendente.

Em cada novo caso simulado, avaliou-se o efeito da modificação introduzida em relação à condição anterior. Tal avaliação objetivava conferir a consistência da representação adotada e, além disso, realizar análise qualitativa do fenômeno real e estimativa quantitativa preliminar do efeito, em termos das grandezas monitoradas. Em particular, os resultados relativos à evolução da distribuição de cargas ao longo do canal descendente e da torre/canal ascendente e os campos elétricos médios observados ao nível do solo próximo à torre e sobre o topo desta, possibilitam se avaliar aspectos importantes da física do fenômeno real.

Algumas observações preliminares podem ser derivadas dos resultados das simulações desenvolvidas. Sua síntese é apresentada a seguir:

- Com relação à representação do canal descendente, a adoção de raios na faixa de 0,1 a 2 m pouco interfere na intensidade do campo elétrico ao nível do solo ou do campo elétrico médio sobre a torre, apesar do aumento da carga com o aumento do raio associada à parte inferior e aos 50 m da extremidade inferior do canal da descarga nuvem-solo. Destaca-se ainda o comportamento constante do valor da carga transferida para o solo para os raios de canal avaliados;

- Após o estabelecimento do raio do canal da descarga nuvem-solo igual a 1 m, a inclusão de torre no problema implica o aumento do campo elétrico médio sobre a torre, embora a maior intensidade não seja significativa em relação à condição com solo plano. Por outro lado, o campo elétrico ao nível do solo apresenta diferenças a partir dos passos finais de evolução do canal descendente e resulta em uma menor intensidade final, de cerca de 60%, na condição com a presença de torre. Outro aspecto se refere à carga positiva acumulada na torre. Esta, da ordem de poucos miliCoulombs, é muito inferior àquela presente na extremidade inferior do canal descendente negativo, da ordem de Coulombs;

- O cômputo do relevo de MCS, em relação a um solo plano, para a condição com torre aumenta os níveis de campo elétrico médio sobre a estrutura aterrada em cerca de 6%. O campo elétrico ao nível do solo se intensifica com a consideração do relevo, sendo 130% maior que o caso com solo plano. O aumento da carga na torre também é notável para a condição com relevo, sendo, aproximadamente, três vezes maior que o caso com solo plano no último passo de evolução do canal de descarga nuvem-solo;

- A inclusão do canal ascendente, de forma geral, resulta em uma menor intensidade do campo elétrico médio e ao nível do solo. O campo elétrico médio resultante no passo final de evolução do canal descendente negativo é, em média, 20% menor que a condição sem a presença do canal ascendente. Em relação ao campo elétrico ao nível do solo a 50 m de distância do ponto de incidência, a diminuição é de 45% no valor final com a introdução do canal ascendente. Percebe-se ainda que a carga na extremidade inferior do canal descendente negativo é menor com a presença do canal ascendente.

Observa-se que a inclusão do relevo aumenta em 4,5% o valor final do campo elétrico médio entre o canal descendente negativo e o topo do canal ascendente e em 87% a intensidade do campo elétrico ao nível do solo a 50 m de distância do ponto de incidência. Ademais, a carga presente nos 50 m da extremidade inferior do

canal da descarga nuvem-solo é 2% maior com a presença do relevo quando comparada a condição com solo plano. Como no caso com a presença de torre, a carga final no conjunto torre/canal ascendente é da ordem de  $mC$ , muito menor que a apresentada na parte inferior do canal descendente negativo, da ordem de  $C$ ;

- Considerando a presença de torre com canal ascendente, a introdução de uma ramificação no canal da descarga nuvem-solo intensifica o campo elétrico médio entre este e o topo do canal ascendente em torno de 4,5%, enquanto o campo elétrico ao nível do solo a 50 m do ponto de incidência aumenta de, aproximadamente, 12%. A carga nos 50 m da extremidade inferior do canal descendente negativo é, em média, 4% menor com a presença da ramificação em relação ao caso sem ramo. Observa-se ainda que a carga presente na ramificação no último passo de evolução do canal descendente negativo é de, aproximadamente, 0,6  $C$ .

A consideração do relevo de MCS nas simulações resulta no aumento de 7,1% do valor final do campo elétrico médio entre o canal descendente negativo e o topo do canal ascendente quando comparado ao caso com solo plano. Para o campo elétrico ao nível do solo, o aumento é de 55,6%. A carga nos 50 m da extremidade inferior do canal descendente é cerca de 9% maior com o cômputo do relevo do solo. Destaca-se que o cômputo do relevo presente em MCS nas simulações implica o aumento da intensidade dos parâmetros elétricos, em particular os de campo elétrico, quando comparado à condição com solo plano.

Mazur e Ruhnke [7] não desenvolveram resultados para condições diferentes da básica deste trabalho, não sendo possível comparar os resultados obtidos com a presença do solo, torre, canal ascendente e ramificação. Entretanto, mesmo no caso básico, observou-se um ponto diferencial, que é o impacto das extremidades ou pontas do canal da descarga nuvem-solo na distribuição de cargas apresentadas neste associado ao processo de descarga de retorno. Ao invés da distribuição de cargas uniforme do canal próximo ao solo apresentada em [7], percebe-se nas simulações que, não só a extremidade superior, mas também a inferior apresentam maior valor de carga em relação àquelas apresentadas ao longo do canal. Atribui-se esta característica ao refinamento da representação adotada no trabalho em relação àquela de Mazur e Ruhnke, notadamente a representação de passo de evolução de 50 m nas simulações em relação aos 500 m apresentados em [7].

A fim de ilustrar a característica descrita acima, a Figura 5.29 apresenta uma representação da densidade de cargas no canal da descarga nuvem-solo no instante anterior ao seu contato com o solo, na descarga de retorno e a final após este processo. O aumento das cargas nas extremidades do canal, apresentada apenas na parte superior do canal em [7], é destacado por círculos na Figura 5.29.

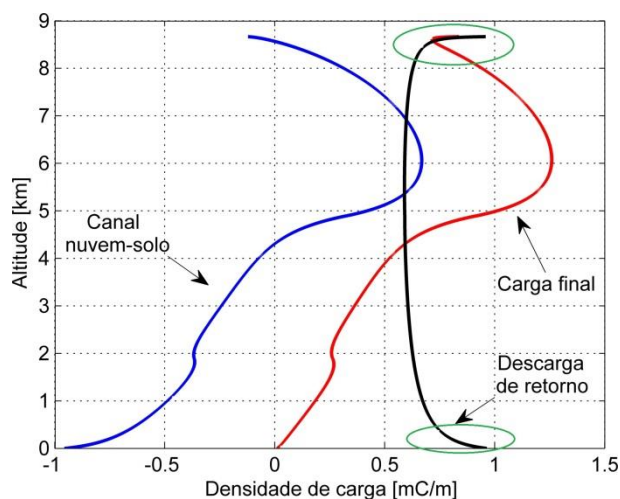


Figura 5.29 – Representação da densidade de carga para um caso sem torre, com destaque para o aumento das cargas na extremidade do canal descendente negativo na descarga de retorno

A característica ilustrada na Figura 5.29 permite a elaboração de uma representação esquemática das cargas do canal da descarga nuvem-solo similar à apresentada em [7], mas que leva em conta o aumento das cargas nas pontas do canal. Esta representação é mostrada na Figura 5.30.

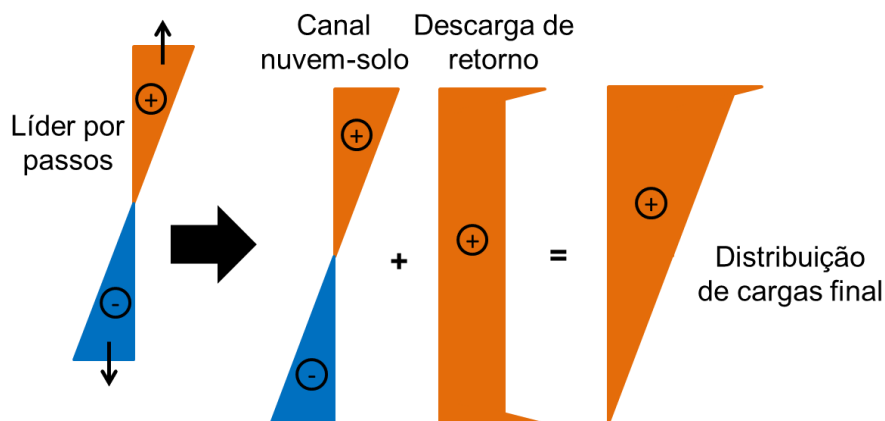


Figura 5.30 – Representação esquemática da densidade de carga no canal da descarga nuvem-solo para um caso sem torre que evidencia o aumento das cargas nas extremidades do canal na descarga de retorno e na distribuição de cargas final após o processo

# Capítulo 6

## CONCLUSÕES

---

### 6.1 Conclusões gerais

Nesta dissertação, implementou-se uma ferramenta computacional baseada no modelo do *leader* bidirecional para simulação da formação dos canais de descarga atmosférica, seguindo a formulação básica desenvolvida por Mazur e Ruhnke [7].

Foi usado o tradicional método de simulação de cargas, mas foram desenvolvidas algumas contribuições particulares, importantes para superar as dificuldades relativas às limitações de memória na representação do sistema físico e à complexidade de representação do relevo real do solo nas imediações da Estação do Morro do Cachimbo. O potencial de fundo criado pelas cargas da nuvem de tempestade foi utilizado para o cálculo do potencial elétrico gerado pelas cargas induzidas na região do canal descendente negativo e aqueles da torre/canal ascendente. Desta forma, dispensou-se a necessidade de se considerar o enorme número de cargas da nuvem de tempestade nas matrizes associadas ao método de simulação de cargas e, assim, viabilizou-se o estudo dos casos com um gasto de memória e, conseqüentemente, custo computacional muito menor.

A aproximação do solo por cargas pontuais desenvolvida neste trabalho permitiu o cômputo do relevo do solo similar ao das redondezas da Estação do

Morro do Cachimbo. Além disso, possibilita diminuir o custo computacional do problema, pois as cargas imagem introduzidas pela aplicação do método das imagens são descartadas com o uso da técnica.

A ferramenta foi utilizada para simular a formação da descarga, em termos do desenvolvimento dos seus canais antes do *attachment*, e para analisar o comportamento de algumas grandezas associadas durante a evolução dos canais, em algumas situações de interesse prático.

Como conclusões preliminares dos resultados de simulação, pode-se destacar:

- O aumento da intensidade do campo elétrico médio entre o canal descendente negativo e o topo da torre, devido à presença desta, não é tão significativo quanto muitas vezes se assume em relação ao caso sem a estrutura aterrada;
- A carga transferida após a descarga de retorno devido ao canal de descarga nuvem-solo varia muito pouco em função da presença de torre, canal ascendente ou ramificação;
- O cômputo do relevo similar ao presente aos arredores da Estação do Morro do Cachimbo possui o efeito de aumentar o campo elétrico médio sobre a torre e o ao nível do solo em relação ao caso com solo plano.

## 6.2 Propostas de continuidade

Os desenvolvimentos do trabalho e os resultados gerados mostram a capacidade e eficiência da ferramenta desenvolvida para simulação da formação dos canais da descarga negativa nuvem-solo.

Contudo, é prudente observar que, a despeito da consistência dos resultados qualitativos desenvolvidos no trabalho, as avaliações quantitativas carecem, ainda, de melhor elaboração na representação do problema físico.

A aplicação da ferramenta nos casos analisados no trabalho mostrou que é possível alcançar tal elaboração pela realização de exaustivas e laboriosas análises de sensibilidade, o que constitui a proposta principal de continuidade do trabalho.

---

Também, novas condições de simulação que correspondem a situações concretas devem ser acrescentadas aos casos de simulação, tal qual a inclusão de ramificações múltiplas superiores.

# REFERÊNCIAS

---

- [1] VISACRO, S. **Descargas Atmosféricas: uma abordagem de engenharia**. 1ª ed. [São Paulo]: Artliber Editora, 2005.
- [2] VISACRO, S. et al. Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station. **J. Geophys. Res.**, v. 109, no. D01105, pp. 1–11, 2004.
- [3] VISACRO, S.; VALE, M. H. M.; CORREA, G.; TEIXEIRA, A. Early phase of lightning currents measured in a short tower associated with direct and nearby lightning strikes. **J. Geophys. Res.**, v. 115, no. D16104, pp. 1–11, 2010.
- [4] VISACRO, S.; ARAÚJO, L.; GUIMARÃES, M.; VALE, M. H. M. M-component currents of first return strokes in natural negative cloud-to-ground lightning. **J. Geophys. Res.**, v. 118, no. 21, pp. 12132–12138, 2013.
- [5] ARAÚJO, L. et al. Assessing currents of upward lightning measured in tropical regions. **Atmos. Res.**, v. 149, pp. 324–332, 2014.
- [6] GUIMARÃES, M.; ARCANJO, M.; VALE, M. H. M.; VISACRO, S. Unusual features of negative leaders' development in natural lightning, according to simultaneous records of current, electric field, luminosity, and high-speed vídeo. **J. Geophys. Res.**, v. 122, no. 4, pp. 2325–2333, 2017.
- [7] MAZUR, V.; RUHNKE, L. H. Model of electric charges in thunderstorms and associated lightning. **J. Geophys. Res.**, v. 103, no. D18, pp. 23299–23308, 1998.
- [8] RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: Physics and Effects**. 1<sup>st</sup> ed. [New York]: Cambridge University Press, 2003.
- [9] SCHONLAND, B. F. J. Progressive Lightning IV - The Discharge Mechanism. **A Math. Phys. Eng. Sci.**, v. 164, no. 916, pp. 132–150, 1938.
- [10] SCHONLAND, B. F. J.; COLLENS, H. Progressive Lightning. **A Math. Phys. Eng. Sci.**, v. 143, no. 850, pp. 654–674, 1934.
- [11] SCHONLAND, B. F. J.; MALAN, D. J.; COLLENS, H. Progressive Lightning – II. **A Math. Phys. Eng. Sci.**, v. 152, no. 877, pp. 595–625, 1935.

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

[13] KASEMIR, H. W. Qualitative Übersicht über Potential-, Feld- und Ladungsverhältnisse bei einer Blitzenladung in der Gewitterwolke. **H. Israel**, Ed. Leipzig: Akad. Verlagsges, 1950, pp. 112–126.

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

[15] SIMPSON, G.; SCRASE, F. J. The Distribution of Electricity in Thunderclouds. **Proc. R. Soc. London A Math. Phys. Eng. Sci.**, v. 161, no. 906, pp. 309–352, Aug. 1937.

[16] WILSON, C. T. R. The electric field of a thundercloud and some of its effects. **Proc. Phys. Soc. London**, v. 37, pp. 32–37, 1924.

[17] DE OLIVEIRA, R. Z. **Sistema para Medição de Parâmetros de Canais Ascendentes de Descargas Atmosféricas na Estação de Pesquisas do Morro do Cachimbo**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

[18] SCHROEDER, M. A. de O. **Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas e Corrente de Descarga Atmosférica: Aplicação às Medições da Estação do Morro do Cachimbo**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)–Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

[19] STOLZENBURG, M. **A Observational Study of Electrical Structure in Convective Regions of Mesoscale Convective Systems**. 1996. Tese (Doutorado em Física)–The University of Oklahoma, Norman, 1996.

[20] KUETTNER J. The electrical and meteorological conditions inside thunderclouds. **J. Meteorol.**, v. 7, pp. 322–332, 1950.

[21] PROCTOR, D. E. Regions where lightning flashes began. **J. Geophys. Res.**, v. 96, no. D3, pp. 5099–5112, 1991.

[22] FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **The Feynman Lectures on Physics, Desktop Edition Volume II: The New Millennium Edition**. [New York]: Basic Books, 2013.

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

[24] MASLOWSKI, G.; RAKOV, V. A. A study of the lightning channel corona sheath. **J. Geophys. Res.**, v. 111, no. D14, p. D14110, 2006.

[25] RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application. **IEEE Trans. Electromagn. Compat.**, v. 40, no. 4, pp. 403–426, 1998.

[26] MAZUR, V.; RUHNKE, L. H. Common Physical Processes in Natural and Artificially Triggered Lightning. **J. Geophys. Res.**, v. 98, no. D7, pp. 12913–12930, 1993.

# Apêndice A

## AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA IONOSFERA NAS REGIÕES DE INTERESSE PARA O MODELO DE NUVEM DE TEMPESTADE AVALIADO

---

A consideração da ionosfera, ainda que de forma muito simplificada, no artigo de Mazur e Ruhnke [7], motiva a avaliação de sua influência no potencial e campo elétrico gerado pela nuvem de tempestade. Para esta análise, optou-se pelo desenvolvimento de uma rotina que permite considerar e desconsiderar a presença da ionosfera, cujo potencial elétrico em sua superfície é definida com valor igual a 400 kV. O fluxograma para a rotina do programa *myThundercloud* sem a presença da ionosfera é apresentada na Figura A.1.

Os resultados de potencial e campo elétrico, desconsiderando a ionosfera, são apresentados, respectivamente, Figura A.2 e A.3.

O comportamento do potencial até a altitude de 12 km para diferentes distâncias do eixo axial da nuvem de tempestade se mantém o mesmo quando se desconsidera a presença da ionosfera, como apresentado na Figura A.2 e A.3, em relação à Figura 3.9 e Figura 3.10. Destaca-se a região do solo até o topo da nuvem de tempestade por ser a de interesse do trabalho, pois é o local em que a descarga nuvem-solo pode progredir. Assim, os valores de potencial e campo elétrico calculados para as altitudes de 2, 5, 9 e 12 km são apresentados na Tabela A.1, enquanto a Figura A.4 e A.5 mostram gráficos comparativos para os casos com e sem ionosfera em diferentes faixas de altura do domínio simulado. A partir dos

resultados obtidos, percebe-se que apenas à distância de 5 km do eixo axial que há uma diferença entre o potencial elétrico com e sem a ionosfera. As maiores diferenças relativas percentuais entre os casos com e sem ionosfera para as distâncias de 50, 700 e 2500 m são de 1,00% para o potencial e 10,68% para o campo elétrico. Já para a distância de 5000 m, tem-se como maiores diferenças 46,29% para o potencial e 74,46% para o campo elétrico.

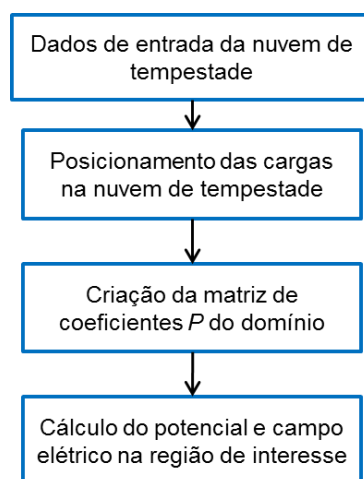


Figura A.1 – Fluxograma do programa *myThundercloud* desenvolvido (a) sem e (b) com a presença de cargas para representar a camada da ionosfera

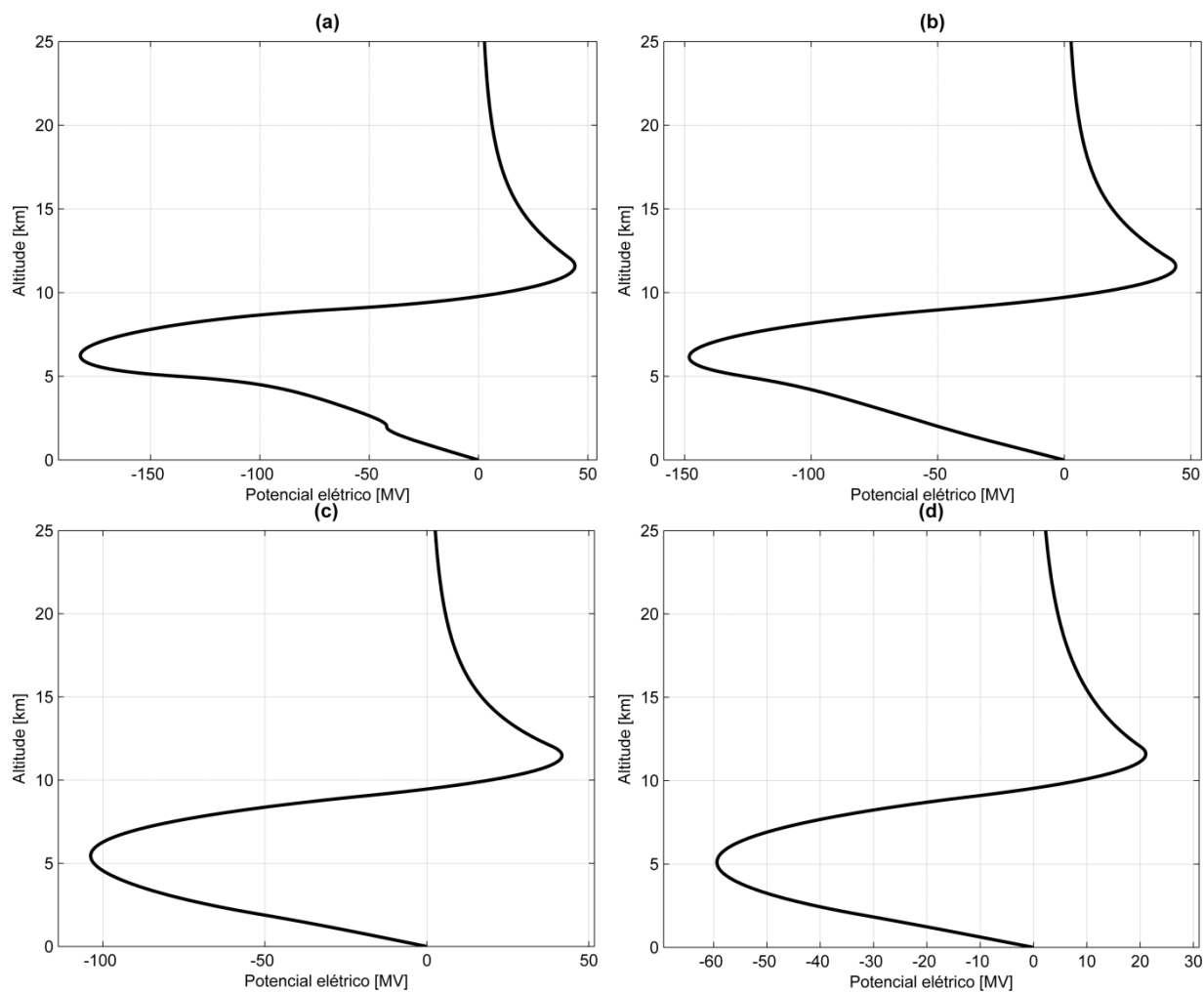


Figura A.2 – Distribuição de potencial elétrico, sem a presença da ionosfera, para distâncias iguais a (a) 50, (b) 700, (c) 2500 e (d) 5000 m do eixo axial da nuvem de tempestade

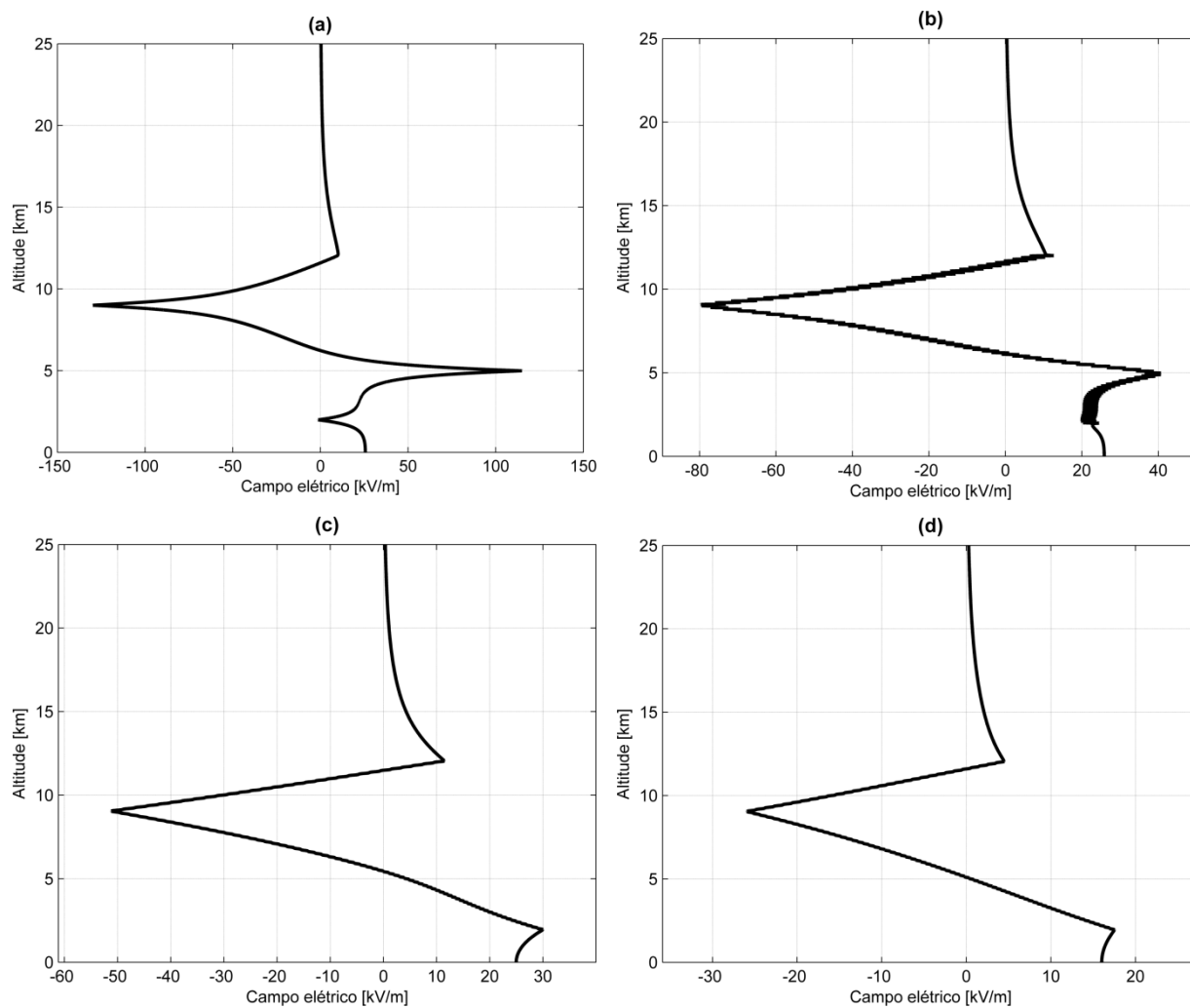


Figura A.3 – Distribuição do campo elétrico, sem a presença da ionosfera, para distâncias iguais a (a) 50, (b) 700, (c) 2500 e (d) 5000 m do eixo axial da nuvem de tempestade

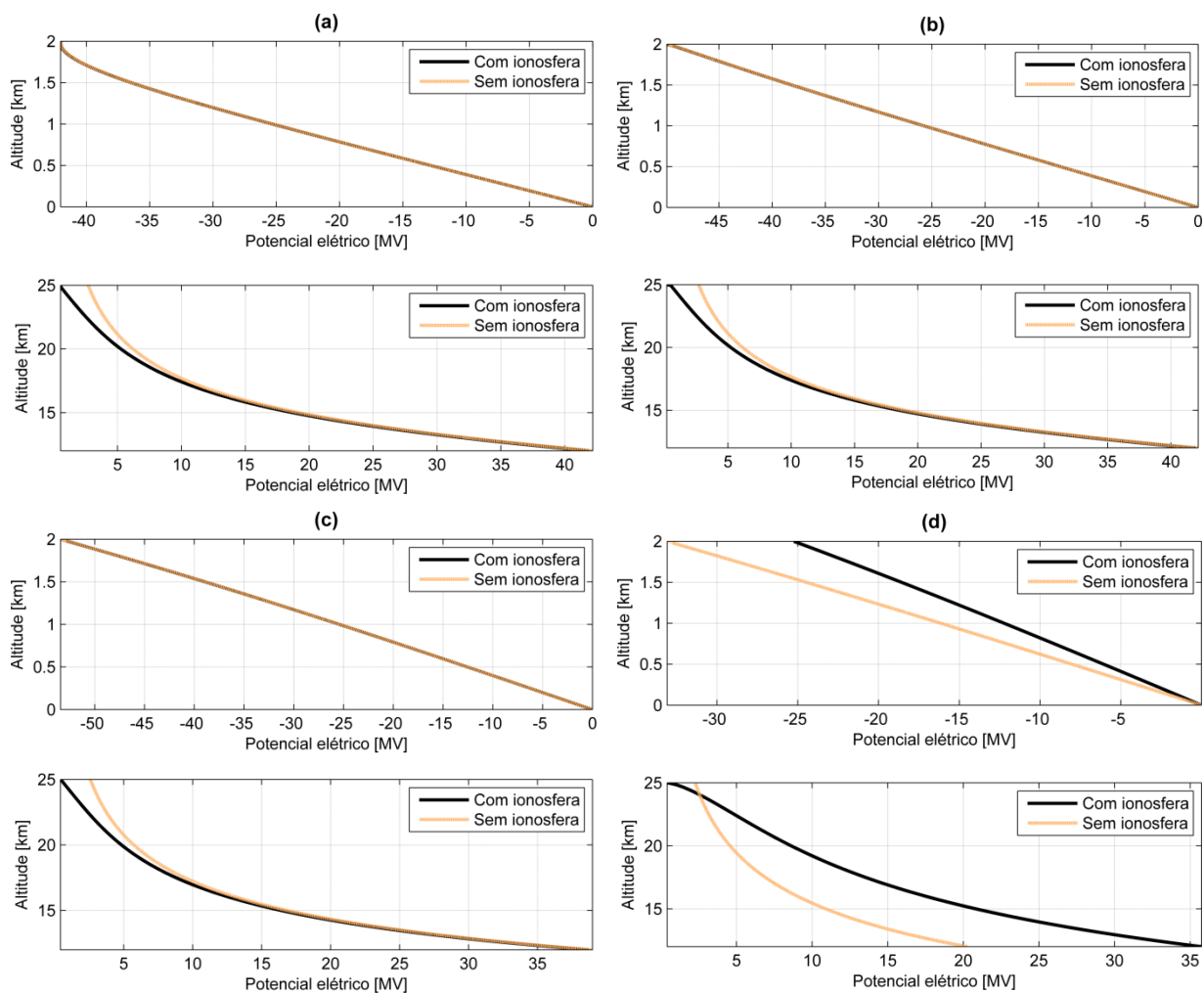


Figura A.4 – Comparação do potencial elétrico, sem e com a presença da ionosfera, para distâncias iguais a (a) 50, (b) 700, (c) 2500 e (d) 5000 m do eixo axial da nuvem de tempestade

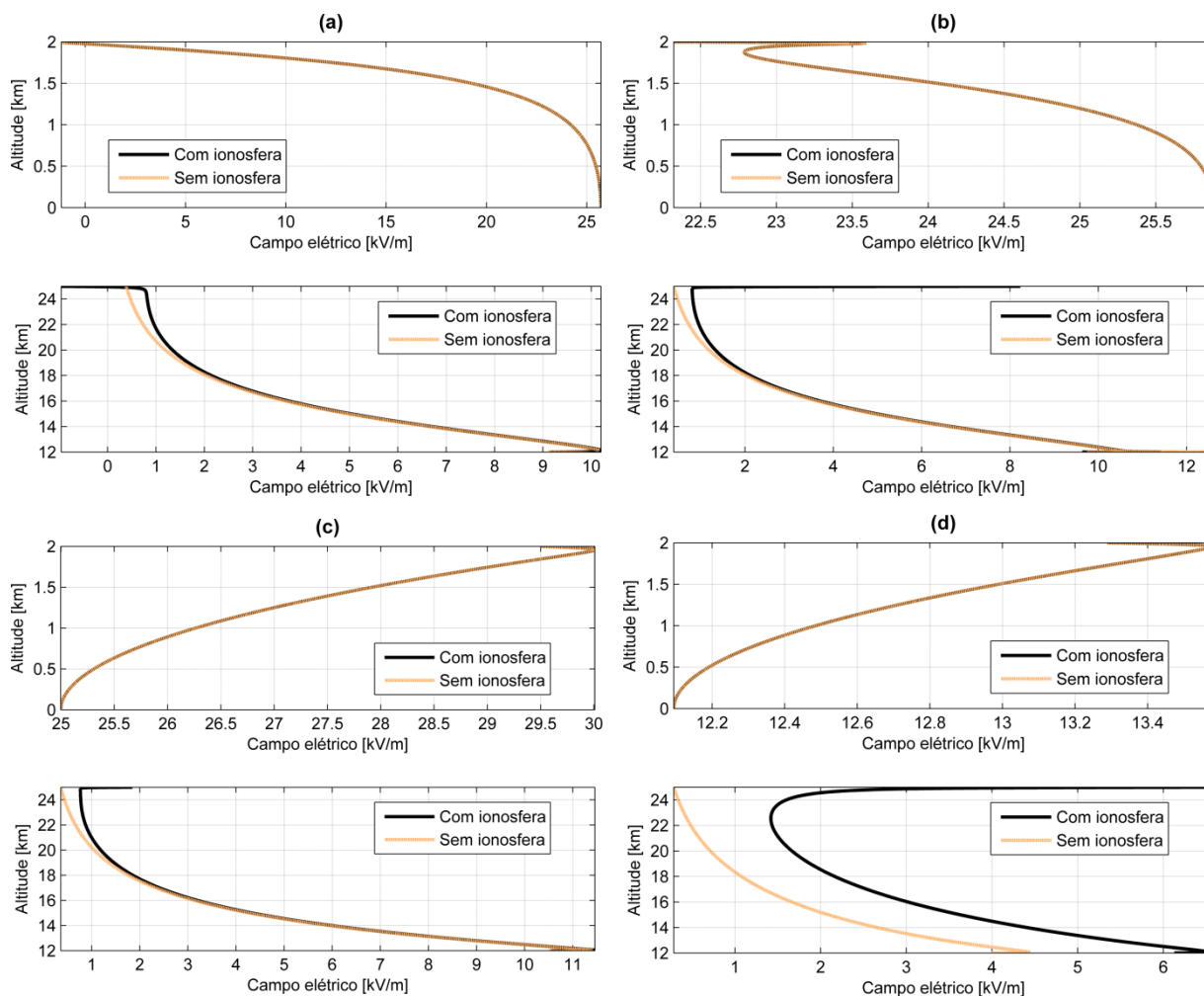


Figura A.5 – Comparação do campo elétrico, sem e com a presença da ionosfera, para distâncias iguais a (a) 50, (b) 700, (c) 2500 e (d) 5000 m do eixo axial da nuvem de tempestade

Tabela A.1 – Resultados de potencial e campo elétrico para diferentes distâncias nos pontos de interface e limítrofes da nuvem de tempestade simulada com o CSM por cargas pontuais

Sem ionosfera	<b>50 m do eixo axial da nuvem</b>				
	<b>Altitude [km]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>12</b>
	Potencial elétrico [MV]	- 41,99	- 137,12	- 64,96	42,19
	Campo elétrico [kV/m]	-0,88	113,75	- 129,16	9,10
	<b>700 m do eixo axial da nuvem</b>				
	<b>Altitude [km]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>12</b>
	Potencial elétrico [MV]	- 49,75	- 126,58	- 47,20	42,15
	Campo elétrico [kV/m]	22,20	38,40	- 77,44	7,86
	<b>2500 m do eixo axial da nuvem</b>				
	<b>Altitude [km]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>12</b>
	Potencial elétrico [MV]	- 53,40	- 102,77	- 21,78	38,98
	Campo elétrico [kV/m]	29,48	4,35	- 50,40	10,35
	<b>5000 m do eixo axial da nuvem</b>				
<b>Altitude [km]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	
Potencial elétrico [MV]	- 33,09	- 59,36	- 12,80	20,28	
Campo elétrico [kV/m]	17,22	0,59	- 25,56	3,91	
Com ionosfera	<b>50 m do eixo axial da nuvem</b>				
	<b>Altitude [km]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>12</b>
	Potencial elétrico [MV]	- 42,03	- 137,23	- 65,18	41,91
	Campo elétrico [kV/m]	-0,86	113,77	- 129,13	9,14
	<b>700 m do eixo axial da nuvem</b>				
	<b>Altitude [km]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>12</b>
	Potencial elétrico [MV]	- 49,89	- 126,80	- 47,53	41,98
	Campo elétrico [kV/m]	22,32	38,51	- 77,31	8,80
	<b>2500 m do eixo axial da nuvem</b>				
	<b>Altitude [km]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>12</b>
	Potencial elétrico [MV]	- 53,44	- 102,88	- 22,00	38,67
	Campo elétrico [kV/m]	29,50	4,37	- 50,37	10,39
	<b>5000 m do eixo axial da nuvem</b>				
<b>Altitude [km]</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>12</b>	
Potencial elétrico [MV]	- 25,24	- 40,64	8,75	35,75	
Campo elétrico [kV/m]	13,29	-2,31	- 24,11	6,05	