

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGE

Daniela Cristina da Silva Santos

**INVESTIGAÇÃO DA ATRATIVIDADE DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
POR LINHAS DE TRANSMISSÃO BASEADA NA APLICAÇÃO DO MODELO
DO LÍDER BIPOLAR PRECURSOR DE DESCARGA**

Belo Horizonte
2024

Daniela Cristina da Silva Santos

**INVESTIGAÇÃO DA ATRATIVIDADE DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
POR LINHAS DE TRANSMISSÃO BASEADA NA APLICAÇÃO DO MODELO
DO LÍDER BIPOLAR PRECURSOR DE DESCARGA**

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

Área de concentração: Engenharia de Potência

Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Prof. Silvério Visacro Filho

Belo Horizonte
2024

S237i	<p>Santos, Daniela Cristina da Silva. Investigação da atratividade de descargas atmosféricas por linhas de transmissão baseada na aplicação do modelo do líder bipolar precursor de descarga [recurso eletrônico] / Daniela Cristina da Silva Santos. – 2024. 1 recurso online (71 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Silverio Visacro Filho.</p> <p>Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 66-71.</p> <p>1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Descargas elétricas – Teses. 3. Linhas elétricas – Postes e torres – Teses. 4. Correntes elétricas – Teses. I. Visacro Filho, Silverio. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p>CDU: 621.3(043)</p>
-------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

"INVESTIGAÇÃO DA ATRATIVIDADE DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS POR LINHAS DE TRANSMISSÃO BASEADA NA APLICAÇÃO DO MODELO DO LÍDER BIPOLAR PRECURSOR DE DESCARGA"

DANIELA CRISTINA DA SILVA SANTOS

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 02 de agosto de 2024. Por:

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

Prof. Dr. Fernando Henrique Silveira
DEE (UFMG)

Prof. Dr. Ronaldo Eugenio de Souza Filho
ICT (UNIFEI - Campus de Itabira)

Prof. Dr. Barbara Pereira Silva
LRC/DEE (UFMG)



Documento assinado eletronicamente por **Silverio Visacro Filho, Professor do Magistério Superior**, em 02/08/2024, às 12:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Henrique Silveira, Professor do Magistério Superior**, em 02/08/2024, às 14:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bárbara Pereira Silva, Usuário Externo**, em 09/08/2024, às 10:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ronaldo Eugenio de Souza Filho, Usuário Externo**, em 12/08/2024, às 11:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 3414149 e o código CRC **C55EA0EE**.

Referência: Processo nº 23072.241829/2024-06

SEI nº 3414149

Agradecimentos

Agradeço,

À Deus, por me dar saúde e vida para conquistar os meus sonhos.

À minha família, por ser minha base de amor, segurança emocional e financeira.

Ao professor Silverio, por compartilhar comigo o seu conhecimento e me ajudar a tornar uma profissional melhor.

Aos meus amigos, que mesmo distantes me apoiaram seja espiritualmente, emocionalmente e me proporcionaram momentos de diversão.

Aos professores do LRC: Maria Helena, Fernando Silveira e Alberto de Conti por ensinarem o conteúdo de uma forma excepcional, o que me ajudou a fixar melhor a matéria das disciplinas cursadas.

Aos colegas do LRC: Gabriel, por me ajudar todas as vezes em que eu precisei compreender os desenvolvimentos das dissertações anteriores; Wayna e Amanda pela parceria no desenvolvimento dos artigos; Bárbara pela troca de conhecimento em nossa área de atuação e pela companhia nos almoços.

À CAPES, pelo apoio financeiro que permitiu a minha permanência no mestrado.

Resumo

Este trabalho investiga a atratividade das descargas atmosféricas por linhas de transmissão. Para tal, faz-se a aplicação sistemática de uma ferramenta computacional que implementa o modelo do “*lightning leader*” (canal precursor de descarga) bipolar, bidirecional e de carga líquida nula. Inicialmente, o modelo foi aplicado para descontaminação da distribuição de picos de correntes de primeiras descargas obtida a partir da medição em torres instrumentadas, posicionadas em alto de morro, objetivando mitigar o efeito de maior atratividade de “*leaders*” com correntes prospectivas de descargas incidentes na torre de maiores valores de pico. Em seguida, a ferramenta foi ajustada e aplicada para determinar a atratividade de descargas por linhas de transmissão, usando a distribuição de picos de corrente descontaminada. A investigação teve foco na análise de dois parâmetros de maior interesse para a avaliação do desempenho das linhas de transmissão frente a descargas: o número N_L de descargas incidentes na linha e a correspondente distribuição de seus picos, que é afetada pela atratividade da linha. Como casos estudo, inicialmente a metodologia de descontaminação foi aplicada à distribuição de picos de corrente obtida na Estação do Morro do Cachimbo (MCS), resultando na redução da probabilidade dos maiores picos (valor mediano de pico reduzido de 43,3 para 32 kA). A análise de atratividade foi desenvolvida para duas linhas de transmissão, de 138 kV e 230 kV, com arranjos geométricos usuais e cabos de blindagem simples e duplo, respectivamente, considerando-se diferentes alturas desses cabos (de 20 m a 64 m). Os resultados mostram que o número N_L derivado desta abordagem mais elaborada é significativamente inferior ao valor obtido da abordagem tradicional, correspondente à aplicação de fórmula recomendada pela Norma IEEE 1243. Verificam-se reduções entre 74% a 34%. Mostram, também, o aumento da probabilidade de maiores picos na distribuição das correntes das descargas atraídas pela linha em relação à distribuição descontaminada considerada na região no entorno da linha (valor mediano de pico das descargas incidentes na linha de 38 kA contra 32 kA da distribuição descontaminada). Entretanto, a mediana da distribuição de picos de correntes das descargas atraídas pela linha é ainda inferior ao valor da distribuição obtida das medições em torre instrumentada (valor mediano de 43,3 kA), que é empregada nos estudos tradicionais de avaliação de desempenho de linhas. Embora a aplicação tenha considerado condições específicas (de distribuição de picos de corrente e de geometria das linhas dos casos estudo), a metodologia pode ser aplicada de forma generalizada a outras distribuições de picos e geometrias de linhas.

Palavras-chave: atratividade das descargas por linhas de transmissão; descontaminação da distribuição de pico de corrente; modelo do líder precursor da descarga, bidirecional e bipolar.

Abstract

This work investigates the attractiveness of lightning strikes on transmission lines. To this end, a computational tool that implements the bipolar, bidirectional, zero net charge lightning leader model is systematically applied. Initially, the model was applied to decontaminate the peak current distribution of first discharges obtained from measurements on instrumented towers positioned on hilltops, to mitigate the effect of greater attractiveness of lightning leaders with prospective discharge currents incident on the tower with the highest peaks. The tool was then adjusted and applied to determine the attractiveness of discharges by transmission lines, using the distribution of decontaminated current peaks. The investigation focused on the analysis of two parameters of greatest interest for assessing the performance of transmission lines against discharges: the N_L number of discharges incident on the line and the corresponding distribution of their peaks, which is affected by the attractiveness of the line. As case studies, the decontamination methodology was initially applied to the distribution of current peaks obtained at the Morro do Cachimbo Station (MCS), resulting in a reduction in the probability of the largest peaks (median peak value reduced from 43.3 to 32 kA). The attractiveness analysis was developed for two transmission lines, 138 kV and 230 kV, with the usual geometric arrangements and single and double shielded cables, respectively, considering different heights of these cables (from 20 m to 64 m). The results show that the N_L number derived from this more elaborate approach is significantly lower than the value obtained from the traditional approach, corresponding to the application of the formula recommended by IEEE Standard 1243. There are reductions of between 74% and 34%. They also show an increase in the probability of higher peaks in the distribution of line-attracted discharge currents compared to the decontaminated distribution considered in the region surrounding the line (median peak value of line-attracted discharges of 38 kA compared to 32 kA for the decontaminated distribution). However, the median of the distribution of peak currents of discharges attracted by the line is still lower than the value of the distribution obtained from measurements on an instrumented tower (median value of 43.3 kA), which is used in traditional line performance assessment studies. Although the application considered specific conditions (peak current distribution and line geometry of the case studies), the methodology can be applied in a generalized way to other peak distributions and line geometries.

Keywords: lightning attractiveness of transmission lines; decontamination of peak current distribution; bidirectional and bipolar discharge precursor leader model.

Sumário

1	Introdução.....	11
1.1	Relevância e motivação.....	11
1.2	Objetivos.....	13
1.3	Metodologia.....	14
1.4	Estrutura do texto	15
2	Modelagem do processo físico de formação da descarga negativa.....	17
2.1	Considerações Iniciais	17
2.2	Modelo físico do sistema correspondente ao canal de descarga	17
2.2.1	Modelo do líder bipolar de Kasemir.....	18
2.3	Principais componentes e modelos utilizados no processo de formação da descarga	19
2.3.1	O canal negativo descendente (DNL).....	20
2.3.2	O canal positivo ascendente (UPL)	21
2.3.3	O campo elétrico.....	23
2.3.4	Modelo da nuvem de tempestade	24
2.3.5	Modelos dos corpos condutores	26
2.3.6	Modelo de representação do solo	27
2.3.7	Descrição da rotina computacional	28
2.4	Condições da simulação específicas para este trabalho.....	31
2.4.1	Limiar do campo elétrico para início do UPL.....	31
2.4.2	Variação no diâmetro da nuvem padrão	32
2.5	Considerações Finais	32
3	Metodologia de descontaminação da distribuição probabilística de picos de corrente de descargas atmosféricas.....	34
3.1	Introdução.....	34

3.2	Procedimento adotado para encontrar o raio de atratividade e sua respectiva área de atratividade	35
3.3	Processo de tortuosidade do canal descendente	40
3.3.1	Crítério limite para o quociente das distâncias vertical e lateral do líder em “R” à torre para possibilidade de incidência nesta.....	41
3.3.2	Carga transferida e corrente de retorno	43
3.4	Processo adotado para encontrar o fator de descontaminação	44
3.5	Recuperação da distribuição de picos de corrente ao redor de MCS pela dedução do efeito da montanha e do relevo do solo	46
3.6	Considerações Finais	47
4	Determinação da atratividade de descargas atmosféricas por linhas de transmissão	49
4.1	Introdução.....	49
4.2	Análise da atratividade: metodologia	50
4.2.1	Relação entre carga e corrente de retorno para a LT.....	52
4.3	Estudo de caso 1: LT 138 kV, 30 m	53
4.3.1	Determinação da distribuição de picos de corrente das descargas para a LT	57
4.3.2	Determinação do número (N_L) de descargas atraídas para a LT....	58
4.4	Estudo de Caso 2: Explorando o efeito da altura e geometria da LT .	58
4.4.1	Determinação da distribuição de picos de corrente das descargas para as diferentes configurações da LT.....	60
4.4.2	Determinação do número (N_L) de descargas atraídas para as linhas para as diferentes configurações destas.....	62
4.5	Considerações Finais	63
5	Conclusões.....	64
5.1	Conclusões iniciais	64
5.2	Conclusões gerais	64

5.3	Propostas de continuidade	65
6	Referências Bibliográficas.....	66



1 Introdução

1.1 Relevância e motivação

A descarga atmosférica é um fenômeno natural que tem origem, em grande parte, nas nuvens de tempestades (*cumulus nimbus*), é comumente conhecida como raio e caracterizada por ser um fenômeno complexo. Ela consiste em um fluxo de corrente impulsiva de grande intensidade e de curta duração. Além disso, possui um percurso de alguns quilômetros que se inicia na nuvem e, em alguns casos, atinge a superfície terrestre. No processo de formação da descarga é criado um canal ionizado e durante a passagem deste fluxo de corrente intenso por ele, gera temperaturas superiores a 3000° C que resulta em um efeito luminoso, o relâmpago, e devido a expansão rápida do ar circunvizinho, em uma onda sonora, conhecida como trovão.

Segundo Visacro [1], os efeitos mais severos da descarga decorrem da sua incidência direta, ou seja, quando ela atinge diretamente prédios, seres vivos, estruturas, podendo gerar destruição ou até mesmo morte, devido à potência elétrica dissipada no percurso da corrente sobre a vítima. Porém, embora menos danoso, a incidência indireta da descarga é mais frequente e pode gerar danos ou interferências aos sistemas elétricos e eletrônicos próximos, pois com a variação rápida de corrente, gera-se uma fonte de distúrbios eletromagnéticos capaz de induzir esses efeitos.

Visando investigar a natureza complexa da descarga e seus efeitos, a CEMIG desenvolveu um trabalho a partir da década de 90 para caracterizar os parâmetros de descargas. Posteriormente, incorporou a investigação à equipe da UFMG, especialista no tema e na resposta transitória de aterramento elétricos. Como resultado desta junção e do trabalho de investigação, no final dos anos 90 foi criado o Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas, ou *Lightning Research Center*

(LRC), que atualmente é referência na pesquisa teórica e aplicada sobre os raios, seus efeitos e técnicas de proteção. O núcleo conta com a Estação do Morro do Cachimbo (Morro do Cachimbo Station - MCS), localizada nos arredores da cidade de Belo Horizonte – MG, onde é realizada a medição de correntes de raios, de campo elétrico, de luminosidade e a gravação de vídeos obtidos pelas câmeras de alta velocidade que detectam as descargas incidentes na torre instrumentada.

A constituição do LRC possibilitou o desenvolvimento de pesquisas relacionadas às descargas atmosféricas, de grande relevância para a literatura. As primeiras análises estatísticas em relação às medições realizadas no MCS foram publicadas por Visacro *et al.* [2], onde foram avaliadas 31 descargas descendentes negativas nuvem-solo e encontrados valores medianos dos picos de corrente de 45,3 kA e 16,3 kA para as primeiras correntes de retorno e subsequentes, respectivamente.

Visacro *et al.* [3] publicaram experimentos de cinco descargas negativas e dois líderes ascendentes que não lograram contactar o canal descendente, medidos no MCS, para avaliar o comportamento padrão das correntes antes do fechamento do canal de descarga (*attachment*). Esses experimentos foram apresentados com detalhes em diferentes janelas de tempo e amplitude, o que complementou o entendimento a respeito de tais padrões.

No decorrer dos anos, o número de amostras referente às descargas medidas no MCS aumentou (atualmente 53 amostras) e novas publicações foram realizadas por Visacro *et al.* [4] e Silveira *et al.* [5] (mais atual) a respeito das análises estatísticas. Em particular, o valor mediano das primeiras correntes de retorno e subsequentes que antes eram 45,3 kA e 16,3 kA passaram a ser 43,3 kA e 17,3 kA, respectivamente.

Um sistema de medição de campo elétrico foi instalado no MCS possibilitando novas observações a respeito do fenômeno, como a detecção simultânea de corrente e campo pela primeira vez de componentes M nas primeiras correntes de retorno, de acordo com Visacro *et al.* [6], e de descargas ascendentes em regiões tropicais, segundo Guimarães *et al.* [7].

A modernização da MCS nos últimos anos, com a ampliação do sistema de campo elétrico, bem como o aumento na taxa de gravação dos vídeos de incidências na torre, contribuiu significativamente para a melhor interpretação física dos processos

relacionados ao desenvolvimento do canal de descarga, como descrito em Guimarães [8], Visacro *et al.* [9] e Visacro *et al.* [10]. Em complemento, Guimarães *et al.* [11] publicaram pela primeira vez os resultados do valor do campo elétrico no solo, próximo à estrutura aterrada, no instante do surgimento do canal ascendente, em descargas negativas nuvem-solo.

Posteriormente, Louro [12] iniciou o desenvolvimento de uma rotina computacional, baseado no Método de Simulação de Cargas (MSC), para simular a formação do canal de descarga até o *attachment*, avaliando as grandezas envolvidas, em particular o campo elétrico, a partir de uma abordagem eletrostática por passos. Na sequência, este modelo computacional foi aprimorado por Arcanjo [13] no que concerne aos meios para avaliar o campo elétrico medido ao nível do solo, no topo das estruturas aterradas, nas proximidades do ponto de incidência da descarga, bem como à corrente média que flui por essas estruturas. Recentemente, Almeida [14] desenvolveu uma nova metodologia para representação do relevo não regular do solo com resultados de potenciais e campos elétricos mais exatos se comparados aos resultados de trabalhos anteriores. Ademais, estimou o valor do campo elétrico mínimo acima da torre requerido para início do canal ascendente, já que o modelo permite calcular o campo elétrico em diversos pontos do espaço.

Esta dissertação trata da aplicação da última versão do modelo computacional para investigar a atratividade das descargas atmosféricas por linhas de transmissão (LTs). É utilizada a distribuição de picos de corrente descontaminada de MCS para encontrar o número de descargas incidentes na linha (N_L) e a distribuição de picos de corrente dessas descargas. Portanto, é um tema original de interesse prático que tem potencial para complementar o conhecimento na área da engenharia de proteção.

1.2 Objetivos

Este trabalho teve por objetivo utilizar a ferramenta computacional desenvolvida no LRC em trabalhos anteriores para investigar a atratividade das descargas atmosféricas pelas LTs. O modelo do “*leader*” bidirecional foi aplicado para encontrar uma curva de atratividade das descargas pela torre instrumentada, considerando a influência do relevo do solo nas redondezas de MCS. Na sequência, um fator de descontaminação foi determinado a partir da curva e este foi aplicado à curva de distribuição de picos de

corrente natural de MCS para determinar uma nova curva de distribuição de picos de corrente descontaminada.

Por fim, foi utilizada a curva de distribuição de picos de corrente descontaminada para realizar estudo de casos em linhas com torres e arranjos típicos de 138 kV e 230 kV, instaladas em solo plano, variando suas alturas e o número de cabos de blindagem, nos quais se determinou o número de descargas que incidiriam na torre. Os resultados foram comparados com os obtidos pela fórmula recomendada na literatura e, além disso, a distribuição dos picos de corrente das descargas que incidiriam na LT foi determinada.

1.3 Metodologia

A primeira etapa desta dissertação consistiu em uma revisão bibliográfica, com ênfase no trabalho apresentado em Almeida [14], por ser a versão mais recente do modelo computacional. Paralelamente, foram realizadas adaptações no código objetivando prepará-lo para receber os dados referentes ao solo real de MCS, além de ajustes para possibilitar a variação do diâmetro e cargas das nuvens e adoção de inclinação do *leader* precursor da descarga.

A segunda etapa consistiu na simulação intensiva com uso do modelo computacional e aplicação dos resultados para obter um fator de descontaminação que, aplicado à curva de distribuição de picos de corrente natural de MCS, permitiu encontrar uma nova curva “descontaminada”, capaz de representar a distribuição de picos de corrente para aquele solo, desconsiderando o efeito da atratividade gerado pelo seu relevo montanhoso.

Na parte final do trabalho, a nova curva de distribuição de picos de corrente descontaminada foi aplicada em exemplos práticos de LTs, a fim de determinar o número de descargas atmosféricas atraídas por estas, segundo esta metodologia. Tal número foi comparado com aquele determinado pelos procedimentos tradicionais adotados atualmente. Também foi determinada a distribuição dos valores de picos de corrente das descargas atraídas pelas LTs.

1.4 Estrutura do texto

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, sendo o **Capítulo 1** esta introdução que abrange uma visão geral sobre o tema.

O **Capítulo 2** apresenta uma revisão bibliográfica, que considera o modelo de Kasemir de formação da descarga atmosférica. Mostra as estruturas computacionais dos componentes envolvidos neste processo (canal, nuvem, solo, estruturas aterradas), segundo tal modelo, e realça a importância do campo elétrico na detecção e evolução do canal de descarga. Além disso, descreve a rotina computacional e as condições específicas adotadas no desenvolvimento deste trabalho.

O **Capítulo 3** apresenta a nova metodologia de descontaminação da distribuição dos picos de corrente em torres instrumentadas. A metodologia foi utilizada considerando a representação do solo de MCS no programa simulado para criar uma curva de atratividade, que expressa o percentual de descargas na área no entorno da torre atraídas para esta em função do valor prospectivo de pico de corrente de descarga. Para cada valor de pico de corrente, o inverso do termo em pu correspondente ao respectivo percentual é multiplicado pela frequência de ocorrência das amostras desse pico nas primeiras correntes negativas em MCS para gerar a descontaminação do efeito de maior atratividade das correntes de descargas prospectivas de maiores picos. O resultado é uma nova curva de frequência de ocorrência descontaminada que, quando integrada, gera a curva descontaminada de distribuição cumulativa dos picos de corrente. Tal curva expressa a distribuição dos picos de corrente das descargas que incidiriam na região de MCS, quando os efeitos de atratividade exercidos tanto pela torre quanto pelo relevo montanhoso fossem suprimidos. O capítulo contém, ainda, análises dos resultados e as considerações finais.

O **Capítulo 4** apresenta a aplicação da curva de distribuição cumulativa de valores de pico de correntes de MCS descontaminada na investigação da atratividade das descargas atmosféricas pelas LTs. Esta análise foi realizada em LTs de 138 kV e 230 kV, com diferentes configurações geométricas, alturas e número de cabos de blindagem, para se determinar o número N_L de descargas que seriam atraídas para a LT e a distribuição dos picos de corrente prospectivos dessas descargas. São apresentados os resultados juntamente com suas análises e as considerações finais.

O **Capítulo 5** apresenta as conclusões em torno dos resultados obtidos e as propostas de continuidade da pesquisa.



2 Modelagem do processo físico de formação da descarga negativa

2.1 Considerações Iniciais

Este capítulo descreve os modelos computacionais utilizados para representar os componentes fundamentais no processo de formação da descarga negativa nuvem-solo, além de estabelecer os critérios particulares adotados nas simulações deste trabalho.

O termo “*lightning leader*” se refere ao filamento de plasma, de raio da ordem de 1 cm e comprimento de alguns metros, constituído por uma descarga elétrica no processo de formação do canal da descarga atmosférica. Este é referido como canal precursor de descarga. Como neste texto o termo é repetido exaustivamente, decidiu-se designá-lo de uma forma simplificada como “líder”. Usualmente ele é seguido da palavra ascendente ou descendente, consoante a direção de sua propagação.

2.2 Modelo físico do sistema correspondente ao canal de descarga

Na literatura atual, existem dois modelos amplamente divulgados que explicam o processo físico de formação de uma descarga atmosférica. O primeiro deles foi apresentado por Schonland [15] que defende a ideia do líder descendente negativo, canal precursor de descarga, ser unipolar e unidirecional. Este seria alimentado por um centro de cargas transferidas para o líder até o encontro com o líder ascendente positivo. Desse encontro resultaria a corrente impulsiva de retorno, onde as cargas negativas seriam

transferidas para o solo. Entretanto, essa teoria é questionável, pois as constantes de tempo associadas ao deslocamento de íons em meios gasosos isolantes observadas em laboratório são superiores aos tempos envolvidos no processo de formação da descarga, de acordo com Kasemir [16]. Esta limitação tem tornado prevalente no meio científico a aceitação do modelo de Kasemir [17], considerado em seguida, que constitui a base desta dissertação.

2.2.1 Modelo do líder bipolar de Kasemir

O Modelo do Líder Bidirecional foi proposto pela primeira vez por Kasemir [17] e mais tarde fortalecida pela teoria eletrostática descrita em Kasemir [18].

Após o estabelecimento da nuvem de tempestade (*cumulus nimbus*), ela fica carregada com cargas positivas em sua extremidade superior e cargas negativas com pequenos bolsões de cargas positivas em sua extremidade inferior. Tal disposição, gera a indução de cargas positivas no solo, ocasionando uma diferença de potencial muito intensa entre a sua superfície e a base da nuvem, gerando também campos elétricos muito intensos, segundo Visacro [1]. Algumas regiões internas à base da nuvem alcançam valores superiores à rigidez dielétrica, que é o campo elétrico por metro necessário para que um meio isolante perca as suas características e passe a conduzir.

Na teoria de Kasemir, o processo de formação da descarga no interior de um meio isolante se faz pelo estabelecimento de um arco elétrico (faísca) que constitui um canal alongado de plasma (líder) de carga líquida total nula. Este canal se origina na região de campo elétrico mais intenso da nuvem que é capaz de arrancar os elétrons dos átomos das moléculas do isolante e acelerá-los para uma das extremidades do canal (na direção contrária ao campo elétrico), deixando a outra extremidade carregada positivamente. E assim é constituído o líder bipolar, bidirecional de carga líquida total nula. A teoria também considera que o líder positivo se desenvolve continuamente, enquanto o líder negativo se desenvolve por passos.

As cargas depositadas nas extremidades deste canal, geram um campo elétrico que sobreposto ao campo elétrico de fundo ou *background field* (campo elétrico da nuvem), ensejam, ou não, novas rupturas (faíscas) e isso determina o alongamento do líder. Este processo se tiver várias sequências, gera respectivos alongamentos do líder até a sua conexão com o solo.

Ao contrário do que aponta a teoria de Schonland [15], a teoria do Líder Bidirecional não coleta cargas de uma região da nuvem, mas o canal é gerado por ionização, através de processos disruptivos em ambas as extremidades, segundo Mazur e Ruhnke [19]. A Figura 2.1 ilustra a representação gráfica do processo apresentado por Kasemir [18]. As partes (a) e (b) representam a descarga negativa nuvem-solo durante o desenvolvimento do canal bidirecional e no instante que antecede o *attachment*, respectivamente. Já as partes (c) e (d) representam uma descarga intranuvem no início e no final da sua propagação, respectivamente.

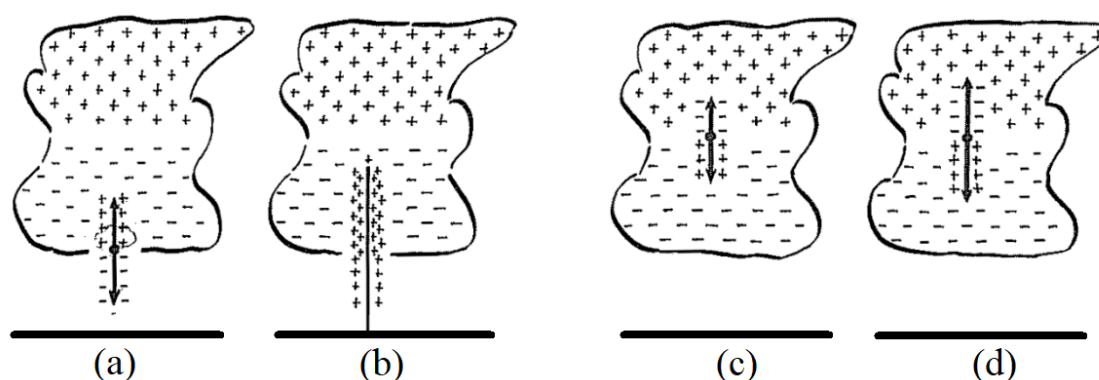


Figura 2.1 - Distribuições das cargas no líder: em uma descarga negativa nuvem-solo (a) e (b); em uma descarga intranuvem (c) e (d). Adaptado de Kasemir [18].

Posteriormente, alguns trabalhos foram desenvolvidos e contribuíram para a teoria do Líder Bidirecional. No trabalho apresentado por Warner et al [20], foi observado o desenvolvimento ao ar livre de canais bidirecionais próximo a um canal previamente estabelecido, além da diferença de propagação das extremidades positiva e negativa. Os trabalhos de Velde e Montanya [21] e Tran e Rakov [22] também apresentam a característica de evolução bidirecional do líder.

2.3 Principais componentes e modelos utilizados no processo de formação da descarga

O ciclo completo da descarga negativa nuvem-solo, desde a sua formação, desenvolvimento e o seu *attachment*, envolve componentes fundamentais como a nuvem de tempestade, o campo elétrico, o canal negativo descendente, o canal positivo ascendente, o solo e os elementos aterrados. Nas seções seguintes serão descritas as

características de cada um destes componentes, bem como os modelos adotados neste trabalho e a rotina computacional deste processo.

2.3.1 O canal negativo descendente (DNL)

Downward Negative Leader (DNL), Canal Negativo Descendente, é o nome dado à porção inferior do líder bipolar flutuante. O DNL é carregado negativamente e é quem determina a macrorregião de incidência da descarga e o responsável pela intensificação do campo elétrico ao longo do solo e das superfícies aterradas, segundo Visacro [1].

Os trabalhos desenvolvidos por Biagi *et al.* [23] e Hill *et al.* [24] identificaram a presença de elementos que precedem a formação do DNL em descargas negativas. Eles são corpos de plasma flutuante (*stems*) que se formam abaixo da ponta do líder. Estas observações feitas através de câmera de alta velocidade coincidem com os experimentos laboratoriais apresentados por Bazelyan e Raizer [25] sobre a extensão de canais negativos.

Hill *et al.* [24] apresentou um esboço das etapas do processo de formação do líder. Ele decompôs este processo sequencial em cinco partes, que foram derivadas das imagens obtidas por vídeo, conforme a Figura 2.2.

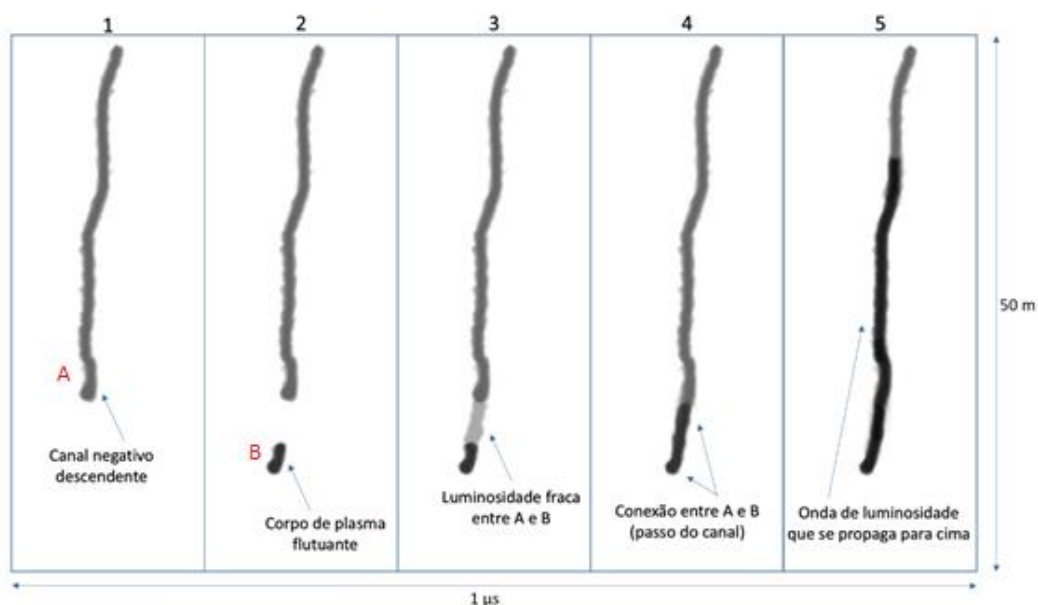


Figura 2.2 - Modelo de propagação do líder descendente negativo (por passos). Adaptado de Hill *et al.* [24]

De acordo com o esquema, pode ser observado a formação de segmentos luminosos flutuantes à frente da região de corona do canal (1 m a 10 m de distância) com comprimentos estimados entre 1 m e 4 m. No primeiro estágio (1), é apresentado o canal negativo com pouca luminosidade, após um passo anterior do líder. O segundo estágio (2) mostra a presença de um *stem* localizado alguns metros abaixo da ponta do líder. No terceiro estágio (3), o *stem* começa a se reconectar ao líder, exibindo baixo nível de luminosidade (região de corona). No quarto estágio (4), o *stem* se conecta totalmente ao líder e exibe um brilho intenso. Por fim, no quinto (5) e último estágio, uma onda de luminosidade se propaga por algumas dezenas de metros acima do líder, consolidando a conexão entre ambos os canais.

O DNL se desenvolve por passos e entende-se como intervalo entre esses passos, o tempo médio transcorrido para cada extensão abrupta do canal.

Os trabalhos de Hill *et al.* [24], Biagi *et al.* [26] e Qi *et al.* [27], que utilizaram registros de vídeo para acompanhar a evolução do canal, encontraram tempos médios entre 13 μs e 18 μs . Visacro *et al.* [3] utilizou registros da fase inicial de correntes referentes às descargas negativas incidentes na torre de MCS e associou os pulsos induzidos na torre à evolução por passos do canal negativo. Ele encontrou intervalos regulares entre os passos variando entre 40 μs e 50 μs . Mais tarde, Arcanjo *et al.* [28] ampliou a análise destes dados e realizou a descontaminação, tendo em vista que os pulsos de corrente induzidos poderiam estar associados às diferentes ramificações do canal negativo descendente. Por fim, encontrou um intervalo médio entre os passos de 39 μs .

2.3.2 O canal positivo ascendente (UPL)

Upward Positive Leader (UPL), Canal Positivo Ascendente, é o nome dado ao canal induzido pelo DNL ao nível do solo ou nas estruturas aterradas que, se evolui, eventualmente pode conectar-se ao líder negativo descendente, gerando a corrente de retorno. Segundo Visacro [1], ele é quem determina o ponto exato de incidência da descarga atmosférica.

O UPL possui característica de propagação diferente do DNL. Ensaios laboratoriais indicam que o modo típico de propagação dos canais positivos se dá de forma contínua e sem variações abruptas em sua geometria, devido ao aumento progressivo de temperatura na ponta do canal, resultante do confinamento de vários

streamers nesta região, segundo Bazelyan e Raizer [25]; Rakov e Uman [29]; Mazur [30]. Entretanto, alguns pesquisadores divergem desta hipótese e acreditam que a evolução do líder positivo se dê por passos, assim como o líder negativo, embora não tenha evidência que sustente tal hipótese.

A elevação do campo elétrico nas estruturas aterradas, enseja o início do efeito corona, que é a liberação de íons positivos nas extremidades das estruturas. Esta camada pode inibir a evolução dos processos disruptivos iniciados, devido à redução local do campo elétrico. Entretanto, se o canal descendente em evolução continua a aproximar-se da estrutura, a variação do campo elétrico gera energia adicional para superar este efeito e dar início ao canal ascendente positivo, segundo Visacro *et al.* [9].

Analisando os perfis de corrente durante a fase inicial de um canal ascendente, verifica-se pulsos unipolares de corrente superpostos a uma corrente contínua medida. Alguns autores associam esta característica a uma propagação por passos do canal ascendente, porém, quando o canal ascendente não é induzido, tal característica não é observada.

Em seu trabalho, Visacro *et al.* [9] observou a propagação do canal ascendente positivo de forma contínua e afirmou que se os pulsos de corrente induzidos fossem atribuídos ao canal ascendente positivo, as mesmas características na propagação por passos deveriam ser observadas. Identificou-se intensificações de luminosidade devido ao surto de corrente induzido ao longo do canal, porém isso não evidencia o desenvolvimento por passos do canal positivo. Além disso, a detecção de pulsos magnéticos e pulsos irradiados não sustentam a hipótese, já que podem ter origem tanto da corrente induzida no canal ascendente como da corrente que flui do canal descendente quando novos passos são formados.

Saba *et al.* [31] também identificou pulsos nos registros de campo elétrico referentes à incidência de descargas positivas no instante que precede o *attachment*. Entretanto, tais pulsos só foram detectados após o surgimento de um canal negativo ascendente nas estruturas aterradas e, portanto, não podem ser associados ao canal positivo descendente, mas sim à evolução do canal negativo.

2.3.3 O campo elétrico

A medição direta e indireta de correntes relacionadas às descargas atmosféricas não é uma tarefa fácil, sendo assim, o campo elétrico ao nível do solo tem sido utilizado como um parâmetro para a detecção de atividade atmosférica, pois contém assinatura do seu processo de formação e evolução.

Equipamentos como *field mild* e antenas tipo *plate* ou *whip* são exemplos de medidores utilizados para monitorar valores de campo elétrico ambiente, antes e depois de rápidas variações que se relacionam ao início da descarga, e a variação rápida de campo elétrico observada durante a formação da descarga, respectivamente, segundo Guimarães [8]. A medição do campo elétrico interno às nuvens também pode ser realizada a partir de balões instrumentados e aviões, entretanto, é uma tarefa complexa conforme pondera Rakov e Uman [29].

Uman [32], durante sua pesquisa, apresentou uma caracterização do campo elétrico de descargas negativas nuvem-solo. As três etapas iniciais do campo elétrico se referem a momentos anteriores ao desenvolvimento da descarga. Cada etapa se refere a uma fase de formação do líder e o perfil do campo elétrico é designado **BIL**. A primeira etapa **B** (*breakdown*) corresponde ao processo inicial de ruptura do ar interno à nuvem e ao início de propagação do canal descendente; a segunda etapa **I** (*intermediate*) corresponde à lenta variação do campo elétrico, indicando o desenvolvimento do canal ainda interno à nuvem; a terceira etapa **L** (líder) corresponde à evolução do canal para fora da nuvem, onde se observa maiores alterações no campo elétrico. Nesta análise, considera-se a convenção atmosférica para a interpretação do campo elétrico e, portanto, um campo elétrico que aponta para cima é considerado negativo.

Existem ainda duas etapas posteriores à formação do canal: a fase **R** (*return stroke*), que corresponde ao fluxo da corrente de retorno e, por fim, a etapa **J**, que corresponde à etapa de variação lenta do campo elétrico após a ocorrência da corrente de retorno. A partir de determinada distância, o comportamento do campo elétrico pode sofrer uma inversão, conforme indicado pelas partes (a) e (b) da Figura 2.3, que ilustra todas as etapas mencionadas.

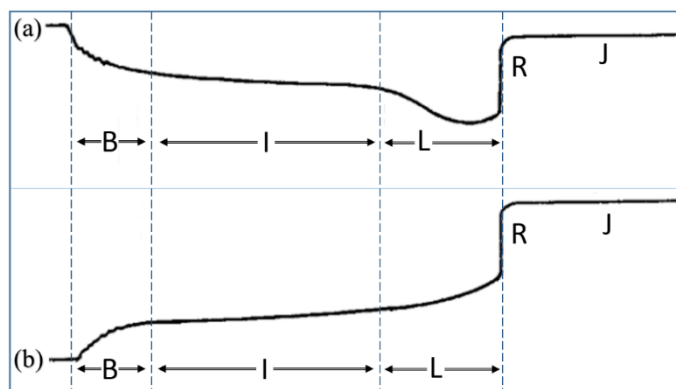


Figura 2.3 - Perfil de campo elétrico ilustrando as fases BIL de uma descarga negativa descendente nas distâncias de (a) 2 km e (b) 5 km, segundo a convenção atmosférica. Adaptado de Uman [32].

2.3.4 Modelo da nuvem de tempestade

Um modelo fidedigno adotado para a nuvem de tempestade deve ser capaz de reproduzir valores similares aos das grandezas envolvidas no processo de evolução do canal da descarga atmosférica. Os modelos disponíveis na literatura, em grande parte, utilizam as sondagens realizadas por balões, que contribuem para a determinação do campo elétrico e, conseqüentemente, da modelagem da nuvem a partir da distribuição espacial e intensidade das cargas elétricas. Apesar da divergência nos resultados das medições dentro das nuvens de tempestades, conforme resultados apresentados por Stolzenburg e Marshall [33] e Karunarathna *et al.* [34], todos apresentam uma característica tripolar, segundo Mazur e Ruhnke [19].

Rakov e Uman [29] desenvolveram um modelo tripolar que se divide em uma região central negativa, uma positiva acima e uma pequena porção positiva abaixo. A disposição das cargas está diretamente ligada ao comportamento das medições do campo elétrico ao nível do solo, que inverte a sua polaridade à medida que a nuvem passa pelos sensores. A Figura 2.4 ilustra os três centros de carga da nuvem (Q_P , Q_N e Q_{LP}), posicionados verticalmente e alinhados horizontalmente (H_P , H_N e H_{LP}).

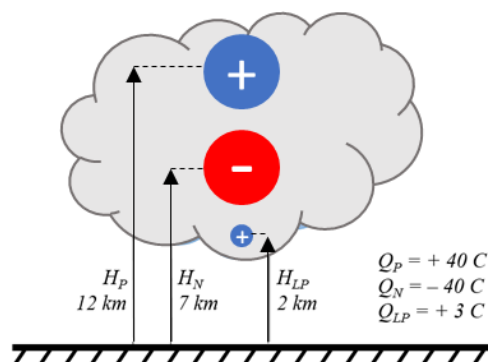


Figura 2.4 – Modelo tripolar de nuvem de tempestade. Adaptado de Rakov e Uman [29]

Este trabalho utiliza o modelo final da nuvem de tempestade apresentado por Mazur e Ruhnke [19] e que foi implementado por Louro [12]. Ele representa a nuvem a partir de distribuições cilíndricas e uniformes de carga conforme a Figura 2.5, onde se nota simetria axial, em que diâmetro e extensão vertical são iguais a 10 *km*.

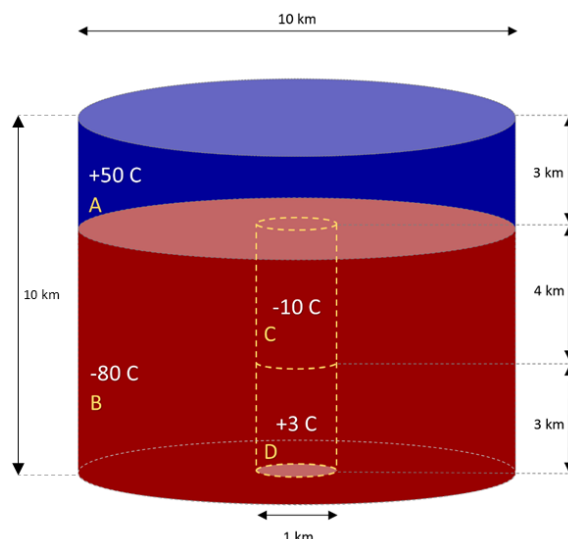


Figura 2.5 - Representação da nuvem de tempestade por estruturas cilíndricas. Desenho sem escala. Adaptado de Mazur e Ruhnke [19].

Esta estrutura cilíndrica é composta por quatro regiões. As duas regiões principais A e B estão carregadas, respectivamente, com 50 *C* e - 80 *C*, possuindo densidade de carga de 0,212 *nC/m*³ e -0,147 *nC/m*³. As duas regiões secundárias são posicionadas ao centro para representar a célula de tempestade, conforme aponta Kuettner [35]. A célula recebe fortes correntes de ar ascendente que são responsáveis, em grande parte, pela geração de cargas na nuvem e possui diâmetro igual a 1 *km*. A região C é carregada com -10 *C* e a região D com 3 *C*, possuindo densidade de carga igual a -3,18 *nC/m*³ e 1,27 *nC/m*³, respectivamente. As estruturas cilíndricas foram modeladas como cargas pontuais, igualmente espaçadas entre si. A implementação resumida da nuvem é apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Detalhamento da estrutura cilíndrica da nuvem de tempestade. Adaptado de Louro [12]

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

Além de produzir perfis de potencial e campo elétrico adequados na atmosfera ao longo do eixo cilíndrico, essa estrutura é capaz de reproduzir campos elétricos ao nível do solo conforme às condições e assinaturas percebidas durante uma descarga atmosférica nuvem–solo.

2.3.5 Modelos dos corpos condutores

Os modelos de corpos condutores foram introduzidos por Louro [12] e Arcanjo [13] para representar o canal de descarga (líder bipolar) e as estruturas aterradas. De acordo com a geometria pretendida, as cargas que compõem estes corpos condutores são modificadas.

2.3.5.1 Modelo do líder bipolar

O canal de descarga trata-se de um condutor vertical de raio r , cujo comprimento é variável. Ele se expande em ambas as direções, sendo que o líder positivo ascendente se propaga para cima, enquanto o líder negativo descendente propaga-se para baixo em direção ao solo.

A modelagem do líder é feita por cargas pontuais, igualmente espaçadas (distância d) e distribuídas ao longo do eixo de comprimento do condutor. Estas cargas possuem valor e polaridade desconhecidos. À medida que a simulação é realizada, em cada passo, o valor da carga varia de acordo com o potencial do líder. O perfil de potencial é calculado com base nas cargas da nuvem. O valor de cada carga é tal que as condições desejadas são obedecidas. A Figura 2.6 ilustra o exemplo deste condutor.

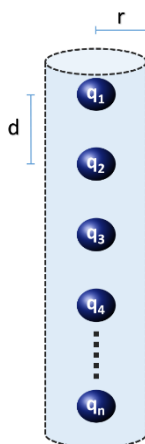


Figura 2.6 - Modelo do corpo condutor. Arcanjo [13]

2.3.5.2 Modelo de estruturas aterradas

Como o próprio nome sugere, este modelo é utilizado para representar estruturas aterradas, tais como, postes em uma rua, torre instrumentada, linhas de transmissão, dentre outros exemplos. O modelo implementado utiliza uma geometria cilíndrica e um arranjo linear de cargas que são induzidas ao longo do corpo condutor e essas cargas mantêm o potencial calculado sempre igual a zero na superfície de raio r para qualquer condição eletrostática à qual o sistema está submetido.

2.3.6 Modelo de representação do solo

O modelo de representação do solo utilizado neste trabalho é o proposto por Almeida [14]. Diferente dos trabalhos anteriores que alocavam cargas pontuais a uma determinada profundidade do solo para que o seu potencial, resultante das contribuições de todas as cargas, fosse nulo, este modelo introduz uma abordagem de representação do relevo do solo a partir de distribuições superficiais de cargas. O relevo é representado por placas finas e quadradas localizadas exatamente na superfície do solo, onde cada placa possui densidade superficial de carga uniforme diferente uma da outra devido a seus tamanhos distintos. A densidade de pontos na região próxima à torre é maior e, portanto, a dimensão das placas nesta região é menor. A Figura 2.7 representa a configuração final das placas no relevo da região de MCS.

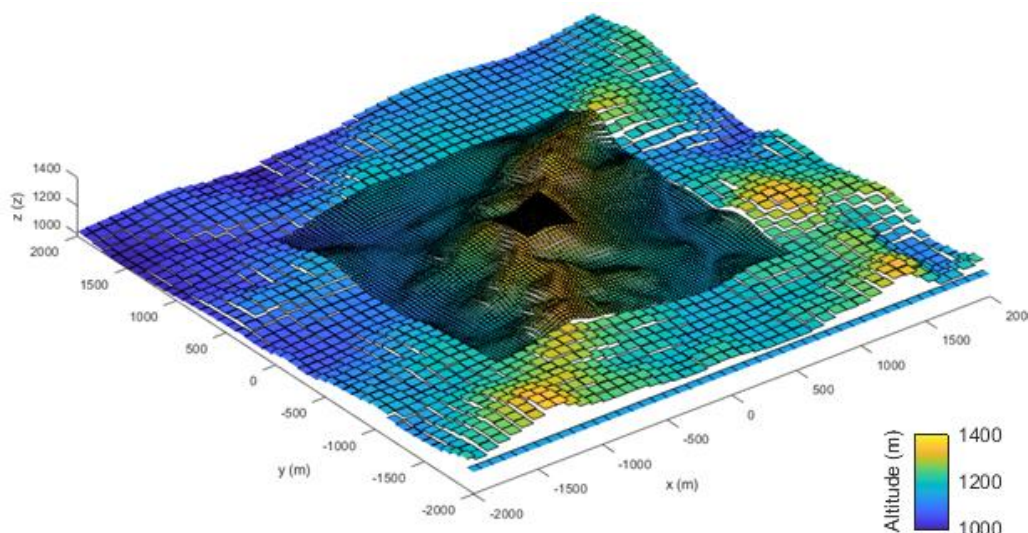


Figura 2.7 - Representação do relevo do solo na região de MCS por placas superficiais. Almeida [14]

Este modelo, conforme aponta Almeida [14], possui resultados mais robustos e exatos se comparado ao modelo de cargas pontuais, considerando que o campo elétrico pode ser facilmente encontrado a partir da constante de permissividade elétrica e da densidade superficial de carga de cada placa, como informa as equações 2.1 e 2.2 apresentadas por Almeida e Visacro [36].

$$D_n = \rho_s \quad (2.1)$$

$$\vec{E}_n = \frac{\vec{D}_n}{\varepsilon} \quad [V/m] \quad (2.2)$$

2.3.7 Descrição da rotina computacional

Considerando uma “fotografia” do sistema, onde a nuvem e as estruturas aterradas têm suas posições fixadas e o líder tem seu comprimento estabelecido, é possível determinar o potencial e campo elétrico em qualquer ponto espacial, além das cargas induzidas para uma condição de potencial e a corrente média que flui nas estruturas aterradas, ao considerar os passos sucessivos da simulação.

Para determinar os valores das grandezas elétricas envolvidas no processo de formação da descarga, Louro [12], Arcanjo [13] e Almeida [14] utilizaram o Método de Simulação de Cargas (MSC) que consiste em alocar cargas discretas a uma distância de onde se deseja conhecer os valores de potencial ou do campo elétrico. Estes valores são obtidos por superposição, de modo que os valores das cargas discretas satisfaçam as condições de contorno. As formulações matemáticas estão detalhadas nos três trabalhos supracitados.

De acordo com Arcanjo [13] a simulação pode ser dividida em três macro etapas, onde na primeira etapa é realizada a leitura dos dados de entrada, além da inicialização das estruturas que são utilizadas na simulação. A segunda e terceira etapas tratam da resolução do problema de potencial à medida que o líder e o canal ascendente se desenvolvem, respectivamente.

A implementação realizada por Almeida [14] (representação do solo a partir de distribuições superficiais de carga em superfícies planas e quadradas) foi inserida na etapa de “Leitura dos dados de entrada”, neste trabalho em particular para representar o relevo

de MCS. Ademais, as representações das estruturas físicas da nuvem e torre são criadas. A Tabela 2.2 detalha os dados que são informados na entrada.

Tabela 2.2 – Parâmetros de entrada da simulação. Adaptado de Arcanjo [13]

Nome	Descrição	Valor típico neste trabalho
Altitude	Altitude da base inferior da estrutura aterrada.	1401 m
Raio	Raio do canal bipolar de descarga.	1,00 m
raio_asc	Raio do canal ascendente.	0,20 m
raio_torre	Raio da estrutura aterrada.	0,20 m
altura_central	Altitude de início do líder.	5401 m
h_inf	Altitude da base inferior da estrutura aterrada.	1401 m (solo MCS)
h_sup	Altitude da base superior da estrutura aterrada.	1461 m (solo MCS)
Comp	Comprimento total do líder	8000 m
Np	Número de pontos da estrutura auxiliar de medição de potencial	801
Test	Valor de indicação do tipo de solo. Para solo plano (0) ou solo de MCS (1)	1 (solo de MCS)

A segunda etapa determina a posição inicial e final do DNL no passo correspondente e através da resolução das condições de fronteira, as cargas induzidas nas estruturas do sistema são encontradas. Neste trabalho, para encontrar os raios de atratividade, (descritos no Capítulo 3), o critério de parada utilizado foi apenas o número de passos adotados, não sendo necessário estabelecer o limiar para início do UPL como em Arcanjo [13], ou seja, a terceira etapa não foi utilizada.

A terceira etapa inicia o desenvolvimento do UPL e verifica as condições geométricas do DNL e UPL para constatar o *attachment*. Enquanto o DNL permanece estático, durante 10 passos, o UPL continua se desenvolvendo. Isto garante o caráter contínuo do canal ascendente e por passos do canal descendente. Neste trabalho, essa etapa é utilizada apenas para determinar as cargas transferidas (descritos na segunda parte do Capítulo 3). O limiar para início do UPL é apresentado na seção seguinte.

A Figura 2.8 ilustra um fluxograma simplificado do funcionamento do programa, de acordo com Arcanjo [13].

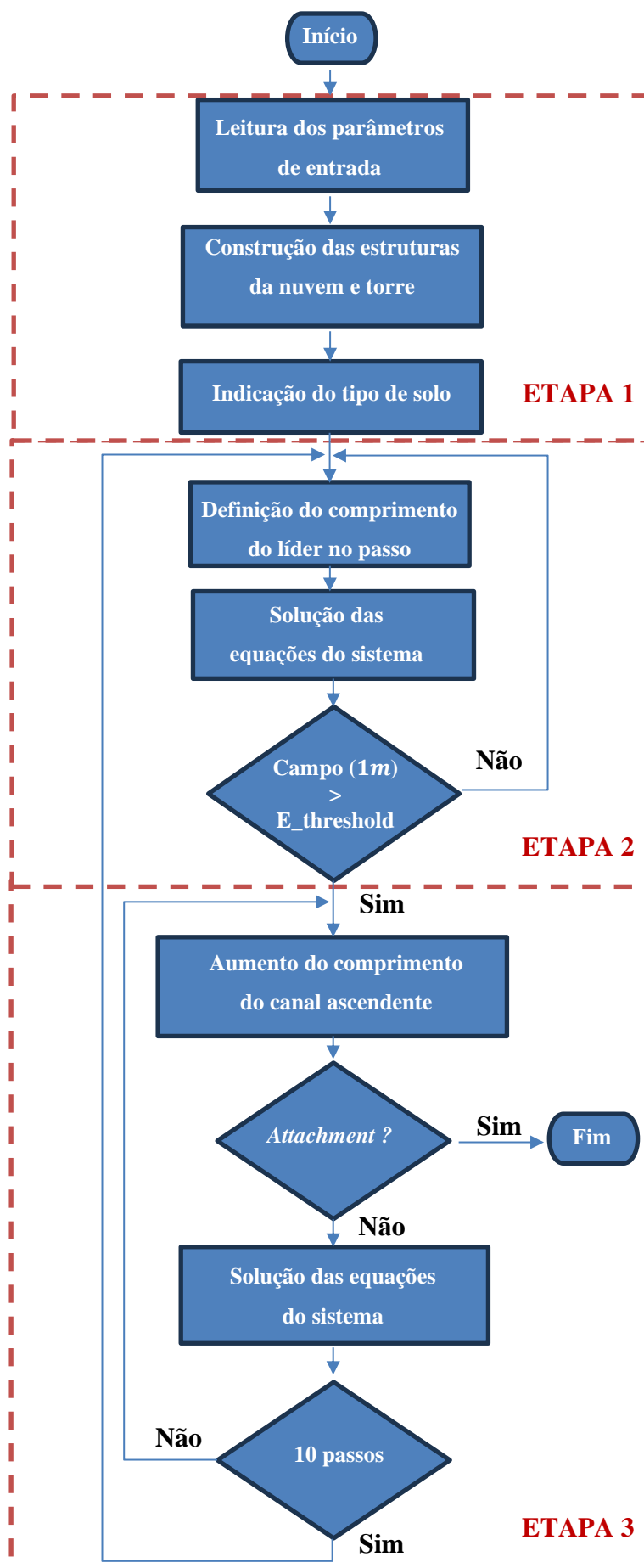


Figura 2.8 – Fluxograma simplificado da rotina computacional. Arcanjo [13]

2.4 Condições da simulação específicas para este trabalho

Para obter os resultados desenvolvidos neste trabalho, foi necessário definir e configurar algumas condições de simulação específicas. Elas serão apresentadas nas seções seguintes.

2.4.1 Limiar do campo elétrico para início do UPL

Conforme discutido em seções anteriores, para que haja a condução no ar é necessário um campo elétrico específico capaz de vencer sua rigidez dielétrica. Além disso, o UPL é induzido pelo DNL passo a passo.

Em seu trabalho, Guimaraes *et. al* [11] acompanhou o campo elétrico ao nível do solo medido a 50 m de distância da base da torre de MCS, durante o desenvolvimento do líder e encontrou um valor de campo elétrico para surgimento do UPL, igual a 64,2 kV/m.

A partir deste resultado, Almeida [14] traduziu o valor do campo elétrico medido a 50 m de distância da torre (E_{50m}) para o campo elétrico medido 1 m acima da torre de MCS (E_{1m}). Como não havia equipamentos posicionados acima da torre, ele recorreu à simulação para encontrar o limiar de campo elétrico E_{1m} , que é igual a 624 kV/m quando E_{50m} é igual a 64,2 kV/m. Portanto, este trabalho utiliza esse valor de campo como critério para surgimento do canal ascendente acima de qualquer estrutura aterrada. A Figura 2.9 ilustra a representação esquemática simulada.

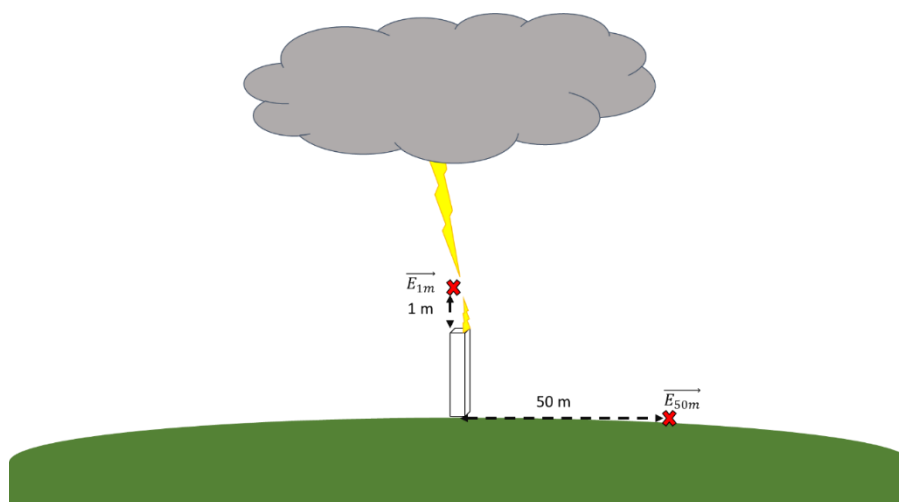


Figura 2.9 - Representação esquemática simulada para a tradução do campo elétrico medido a 50 m de distância da torre (E_{50m}) para o campo elétrico medido 1 m acima da torre (E_{1m}). Almeida [14].

2.4.2 *Variação no diâmetro da nuvem padrão*

É possível extrair da literatura algumas expressões que relacionam a carga transferida e o valor de pico da corrente. A Equação 2.3, por exemplo, foi apresentada por Cooray *et al* [37] e representa a correlação linear entre carga e corrente de retorno referente às medições dos primeiros 100 μs das descargas medidas no Monte San - Salvatore. Os 100 μs abrangem toda a carga neutralizada durante o primeiro pico de corrente. A Equação 2.4 foi apresentada por Almeida e Visacro [36] e representa a relação entre toda a carga transferida durante o processo e o valor de pico de corrente das descargas medidas na Estação do Morro do Cachimbo.

$$Q_{100 \mu s} = 0,061 \cdot I_p \quad (2.3)$$

$$Q_t = 0,14 \cdot I_p^{0.979} \quad (2.4)$$

Assim como introduzido e apresentado em Almeida [14], este trabalho avaliou a atratividade em diferentes condições de corrente de retorno e, para isso, variou-se o diâmetro da nuvem padrão de 2,5 *km* até 55 *km*, utilizando as cargas (simples) apresentadas na Tabela 2.1. Foi considerado uma condição extra para o diâmetro da nuvem de 5 *km*, utilizando as mesmas cargas da Tabela 2.1, porém dobradas.

Através da Equação 2.4, relacionou-se a carga obtida em cada caso para encontrar o pico de corrente. A carga transferida é dada pela diferença entre as cargas acumuladas ao longo do canal após o *attachment* e as cargas acumuladas ao longo do canal no momento imediatamente anterior ao *attachment*. Esta metodologia foi apresentada por Arcanjo [13] e é aplicada no próximo capítulo para encontrar os diferentes picos de corrente.

2.5 **Considerações Finais**

Este capítulo apresentou uma revisão bibliográfica dos principais modelos que descrevem o processo físico de formação de uma descarga atmosférica. O primeiro deles se baseia num líder unipolar, unilateral e de carga líquida total negativa (Schonland); o segundo, se baseia num líder bilateral, bipolar e de carga líquida total nula (Kasemir). Esse último foi o modelo adotado neste trabalho.

A segunda etapa apresentou os principais componentes e as estruturas computacionais utilizadas na simulação de trabalhos anteriores e que serviram de base para o desenvolvimento deste. Foram apresentadas as estruturas da nuvem de tempestade, do canal de descarga, do solo e das estruturas aterradas.

Por fim, foi descrito um resumo do funcionamento do programa computacional e os critérios específicos adotados no desenvolvimento deste trabalho.

3 Metodologia de descontaminação da distribuição probabilística de picos de corrente de descargas atmosféricas

3.1 Introdução

Nesta etapa do trabalho, aplicou-se a ferramenta computacional implementada em dissertações anteriores para determinar uma curva de distribuição de picos de corrente que possa ser utilizada no estudo de LTs. Para obter tal resultado, utiliza-se a engenharia reversa, descontaminando uma curva de distribuição de picos de corrente real (MCS).

O primeiro passo deste processo consistiu em encontrar uma curva de atratividade, que expressa o percentual de descargas atraídas para a torre de MCS de acordo com o pico de corrente. Esta curva é corrigida por um fator de correção, descrito nas seções seguintes, para determinar a curva que expressa um fator de descontaminação. Por fim, esse fator de descontaminação é multiplicado pela curva de distribuição de picos de corrente de MCS, resultando na nova curva de distribuição de picos de corrente

descontaminada e que é utilizada no estudo das LTs. Esta curva descontaminada desconsidera a influência que o relevo montanhoso de MCS exerce sobre as descargas.

As próximas sessões se destinam a apresentar o desenvolvimento passo a passo desta metodologia, além dos resultados e análises.

3.2 Procedimento adotado para encontrar o raio de atratividade e sua respectiva área de atratividade

O processo de desenvolvimento do líder bipolar, bidirecional e com carga líquida total nula, foi simulado a partir da última versão da ferramenta computacional descrita em Almeida [14]. Nesta etapa, o líder se desenvolve verticalmente e a evolução do campo elétrico é acompanhado em um ponto de medição fixo, 1 m acima da torre instrumentada (E_t), e outro variável, de acordo com a projeção do líder, situado no solo a uma distância d perpendicular ao eixo da torre (E_s), conforme ilustra a Figura 3.1.

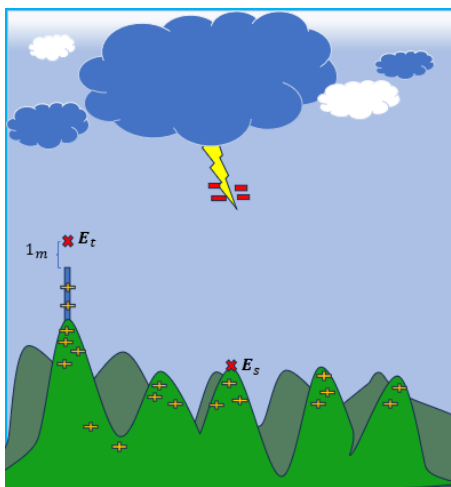


Figura 3.1 – Representação esquemática dos pontos de medição do campo elétrico: E_t (Campo 1 m acima da torre); E_s (Campo na projeção do líder no solo).

Conforme comentado no Capítulo 2, este trabalho utilizou diferentes cenários de picos de corrente para investigar o efeito da atratividade. Para gerar estes picos, a nuvem padrão de **10 km**, com cargas (simples) detalhadas na Tabela 2.1, teve seu diâmetro alterado para **55 km**, **20 km**, **5 km**, **2,5 km**, além disso, considerou-se uma situação extra para a nuvem com diâmetro de **5 km**, dobrando suas cargas. Os picos de corrente resultantes foram: **17 kA**, **38 kA**, **62 kA**, **98 kA**, **144 kA** e **201 kA**.

Para cada um dos seis cenários, o líder foi deslocado para diferentes distâncias horizontais R_x (raio) em relação à torre, objetivando verificar a evolução do campo elétrico **acima da torre** e no **ponto de projeção** desse líder no solo, conforme ilustra a Figura 3.2. Além disso, a distância vertical ($dist_h$) entre a ponta do líder e o topo da torre foi calculada à medida que ele evoluía e se aproximava do solo.

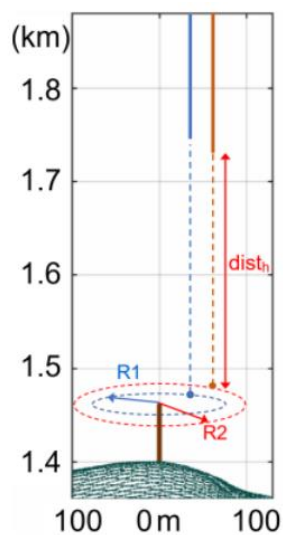
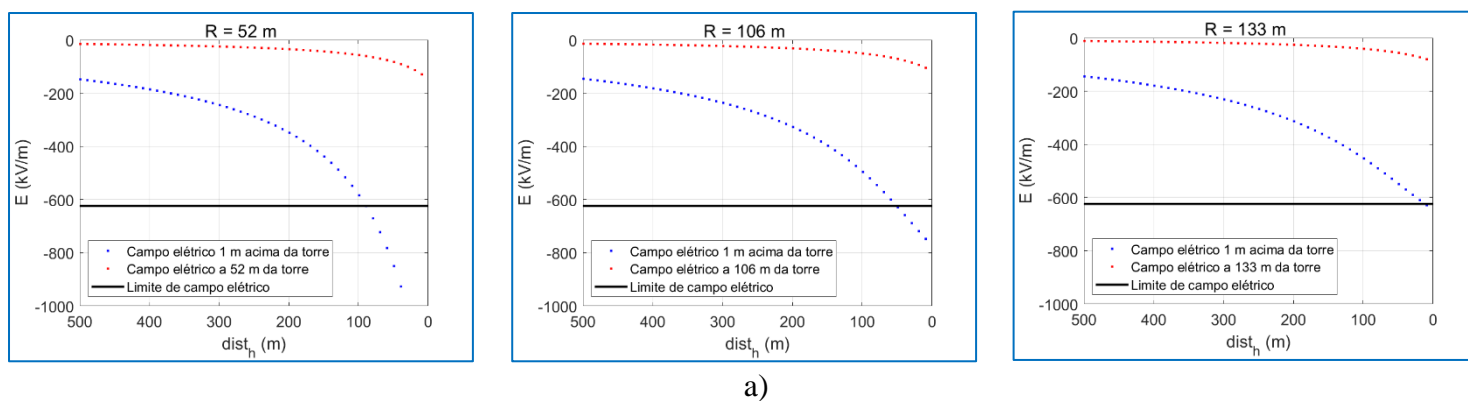
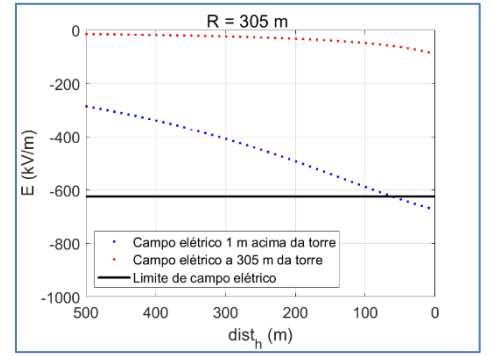
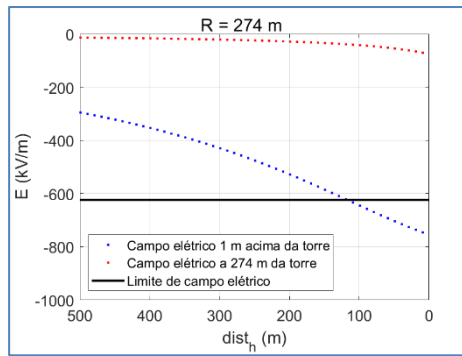
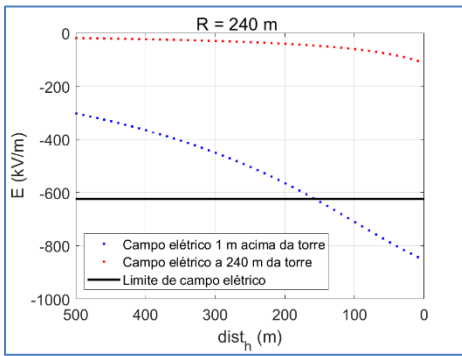


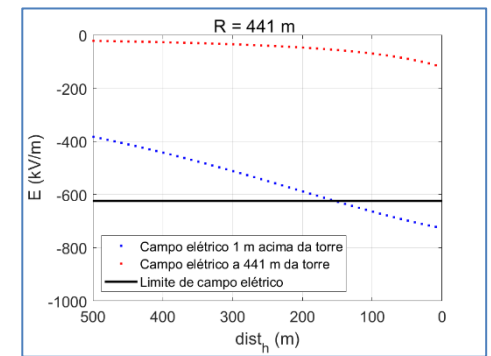
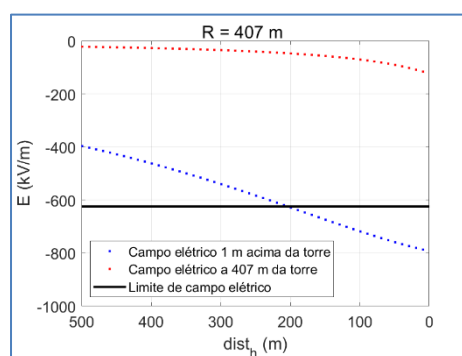
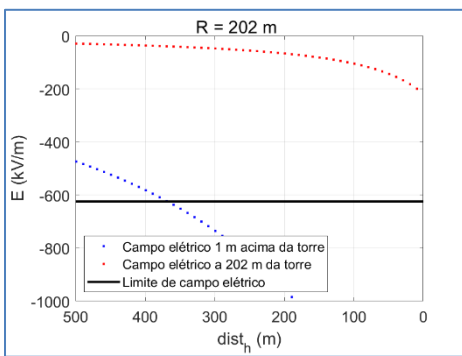
Figura 3.2 – Esquema de representação das condições simuladas: os líderes negativos se aproximam do solo ao longo de caminhos verticais os quais possuem projeções em diferentes distancias ($R_1, R_2 \dots$).

A Figura 3.3 ilustra os resultados da relação campo elétrico pela $dist_h$ para três distâncias R_x em cada cenário. Nota-se um limiar de 624 kV/m em todos os gráficos. Ele representa o campo elétrico crítico necessário para início do UPL encontrado por Almeida [14].

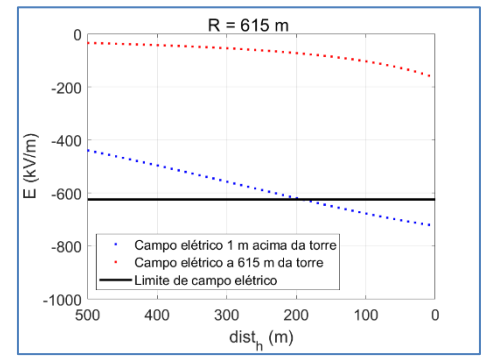
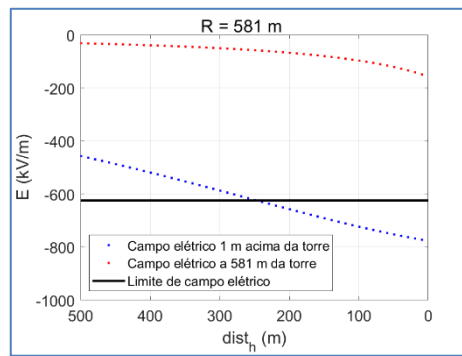
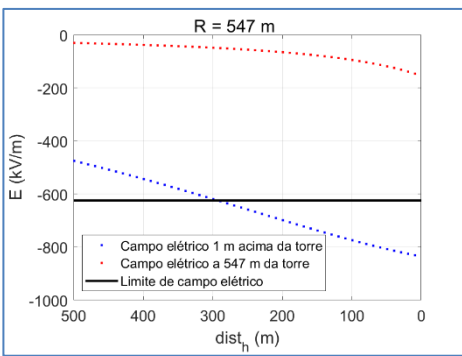




b)



c)



d)

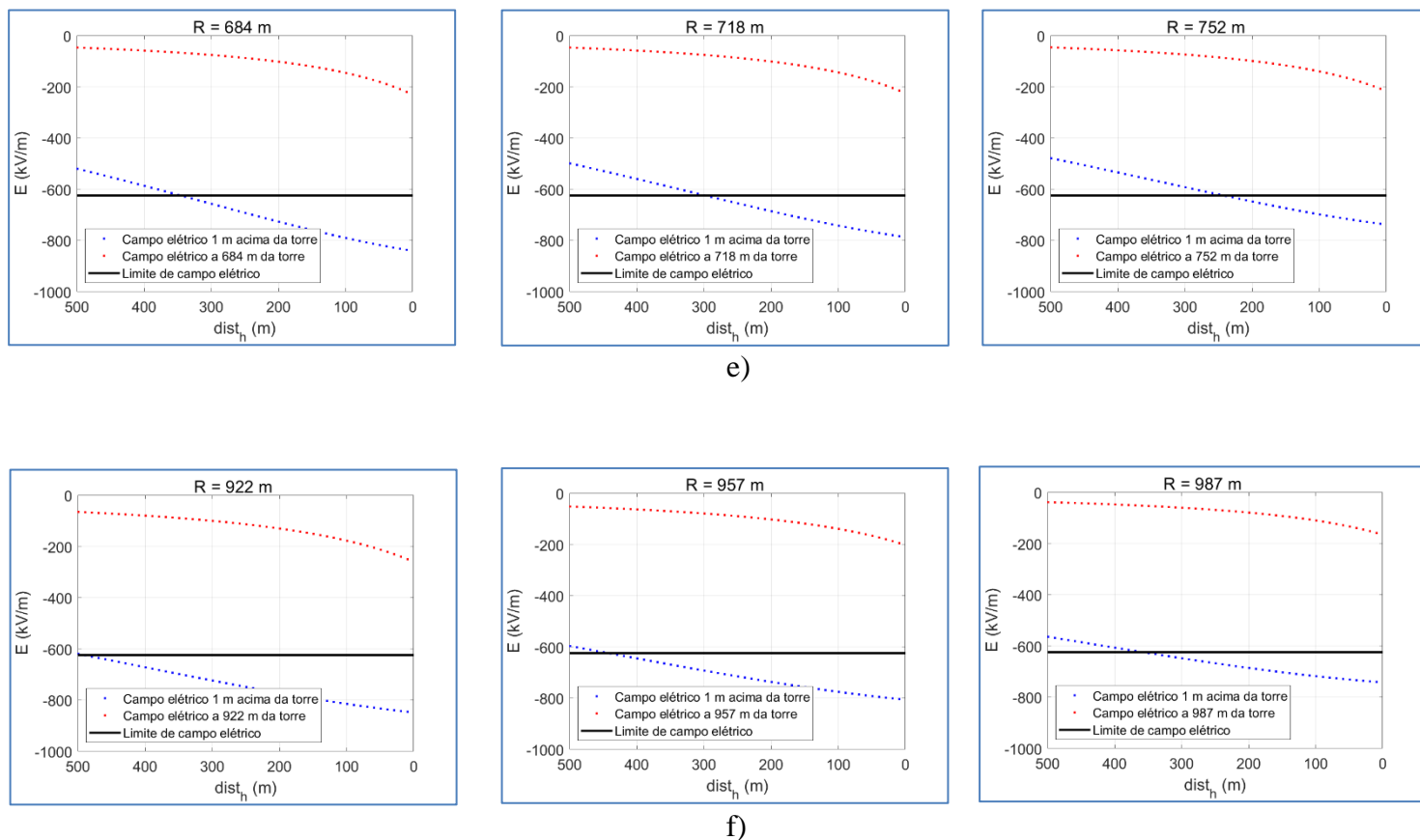


Figura 3.3 – Curvas exibindo a evolução do campo elétrico no solo e a 1 m acima do topo da torre à medida que o líder descendente se desenvolve. (a) 17 kA; (b) 38 kA; (c) 62 kA; (d) 98 kA; (e) 144 kA; (f) 201 kA.

Extrai-se dos gráficos da Figura 3.3 um crescente aumento do campo elétrico, enquanto o líder negativo se desenvolve, tanto acima da torre como no solo. Entretanto, o campo predominante em todos os casos é o medido 1 m acima da torre.

Avaliando-se os gráficos de (a), observa-se que para R igual a 52 m, o campo elétrico para início do UPL foi alcançado quando $dist_h$ era aproximadamente 100 m; para R igual a 133 m, a $dist_h$ é aproximadamente 30 m. Nesse caso, o líder descendente não seria atraído para a torre, diferente do primeiro caso no qual a $dist_h$ é praticamente o dobro da distância R considerada. Por fim, quando R é igual a 106 m, o campo para início do UPL foi alcançado em $dist_h$ igual a 50 m. A partir desse resultado, determinou-se o critério para definir a máxima distância na qual a descarga seria atraída para a torre, nomeada raio de atratividade. Esse critério é atendido quando a $dist_h$ é aproximadamente metade da distância R no surgimento do canal ascendente da torre, conforme ilustra a Figura 3.4.

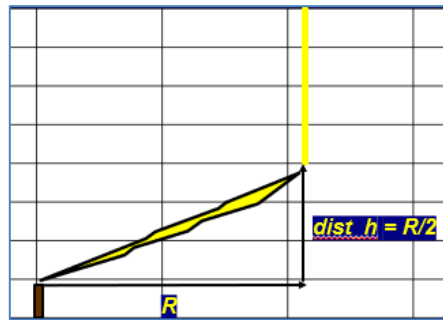
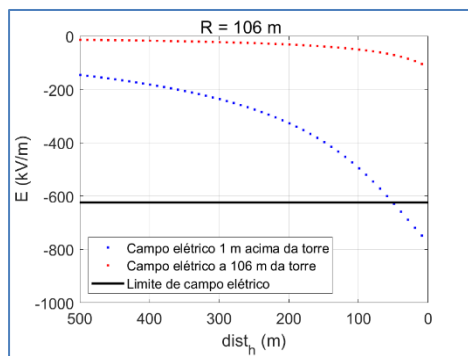
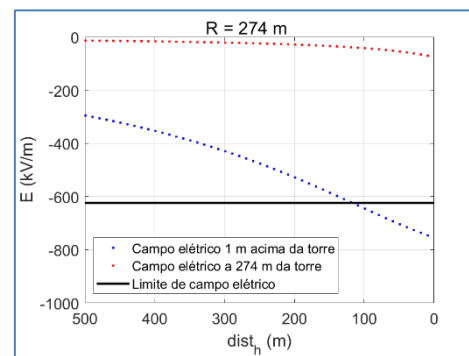


Figura 3.4 – Condição limite de incidência lateral: a distância vertical **dist_h** deve ser igual ou maior à metade da distância horizontal **R** entre a linha de projeção do canal e a torre.

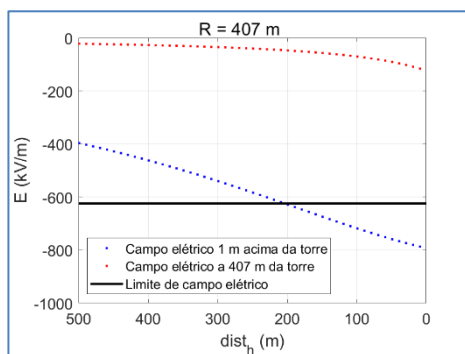
Respeitando o critério adotado, definiu-se os raios de atratividade para cada pico de corrente. Eles estão representados na Figura 3.5.



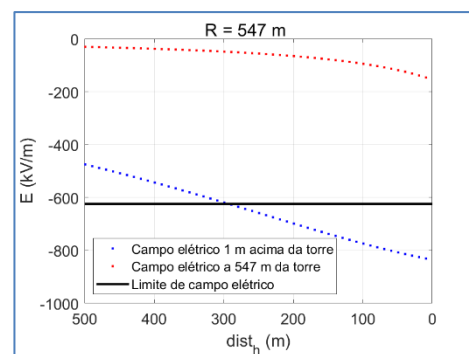
a)



b)



c)



d)

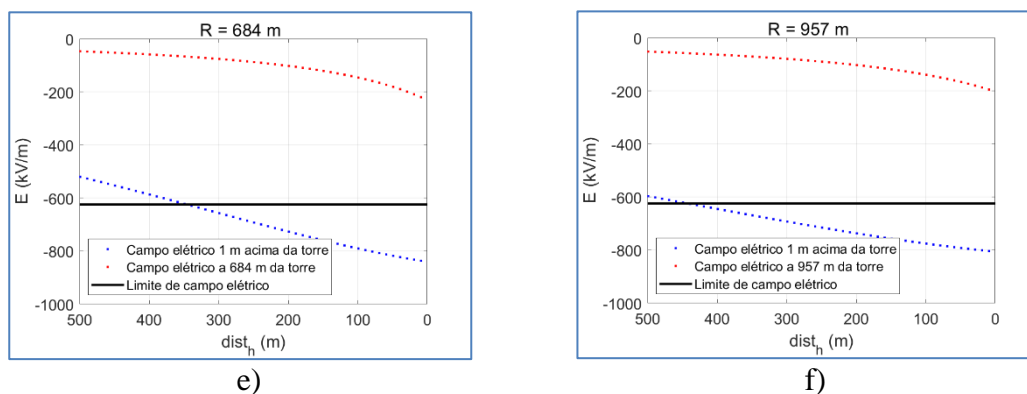


Figura 3.5 - Curvas que refletem os raios de atratividade escolhidos de acordo com o pico de corrente. (a) 17 kA; (b) 38 kA; (c) 62 kA; (d) 98 kA; (e) 144 kA; (f) 201 kA.

A partir destes dados, determinou-se a máxima área para a qual uma descarga seria atraída em cada cenário, a área de atratividade. A Tabela 3.1 apresenta o raio de atratividade e sua respectiva área de atratividade de acordo com o pico de corrente correspondente.

Tabela 3.1 – Relação entre o pico de corrente e seus respectivos raio e área de atratividade

Corrente de retorno (kA)	Distância de atratividade máxima R (m)	Área de atratividade πR^2 (km²)
17	106	3,5
38	274	23,6
62	407	52
98	547	94
144	684	147
201	957	287,6

3.3 Processo de tortuosidade do canal descendente

Na seção anterior, foi descrito o processo para encontrar o raio de atratividade e a área de atratividade em função do valor de pico de corrente. Os próximos passos se destinam a explicar o processo que determinou cada um dos seis picos de corrente, resultantes das transferências de cargas.

O primeiro passo consistiu em modificar o percurso vertical do líder, tornando-o diagonal, a partir de determinada altura. De acordo com Visacro [38], o canal negativo se desenvolve por passos, gerando ramificações. O deslocamento diagonal do líder

pretende representar o fechamento de uma dessas ramificações (que percorre quilômetros de distância) na torre, conforme Figura 3.6.

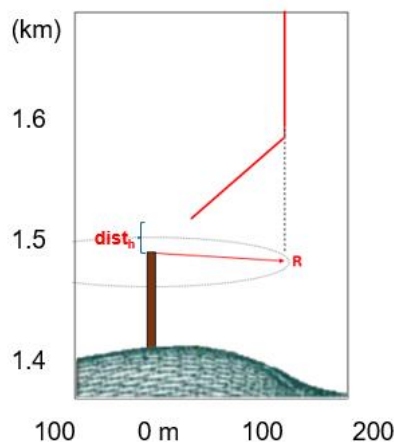


Figura 3.6 – Esquema de representação da diagonalização do líder a partir de determinada altura.

3.3.1 Critério limite para o quociente das distâncias vertical e lateral do líder em “R” à torre para possibilidade de incidência nesta

Os gráficos da Figura 3.5 trazem informações a respeito do início do UPL, em particular, a distância vertical $dist_h$ entre a ponta do líder e o topo da torre. A partir disso, foi possível encontrar a coordenada Z, referente à altura em que o líder se encontrava no surgimento do canal ascendente. Portanto, essa altura foi o ponto escolhido para início da “diagonalização” do líder em direção à torre.

Para todos os cenários, determinou-se a altura Z, conforme apresenta a Tabela 3.2. Vale salientar que os raios de atratividade utilizados são os mesmos apresentados na Tabela 3.1 e que a “diagonalização do canal foi utilizada apenas para determinar a carga transferida.

Tabela 3.2 - Altura para início da “diagonalização” em cada cenário

Raio de atratividade (m)	Dist_h no início da diagonalização (m)	Altura Z da ponta do líder descendente (m)
106	49	1510
274	119	1580
407	209	1670
547	299	1760
684	359	1820
957	459	1920
* A coordenada Z referente à altura da torre é 1461 m		

À medida que o canal diagonal se aproximava da torre, o campo elétrico deveria ficar mais intenso se comparado ao canal totalmente vertical. Objetivando validar este processo, novas simulações foram realizadas, utilizando os raios de atratividade pré-estabelecidos em cada cenário, considerando o deslocamento diagonal do líder. A Figura 3.7 ilustra os gráficos resultantes da comparação entre a evolução do campo elétrico obtido com o canal totalmente vertical e com o deslocamento diagonal.

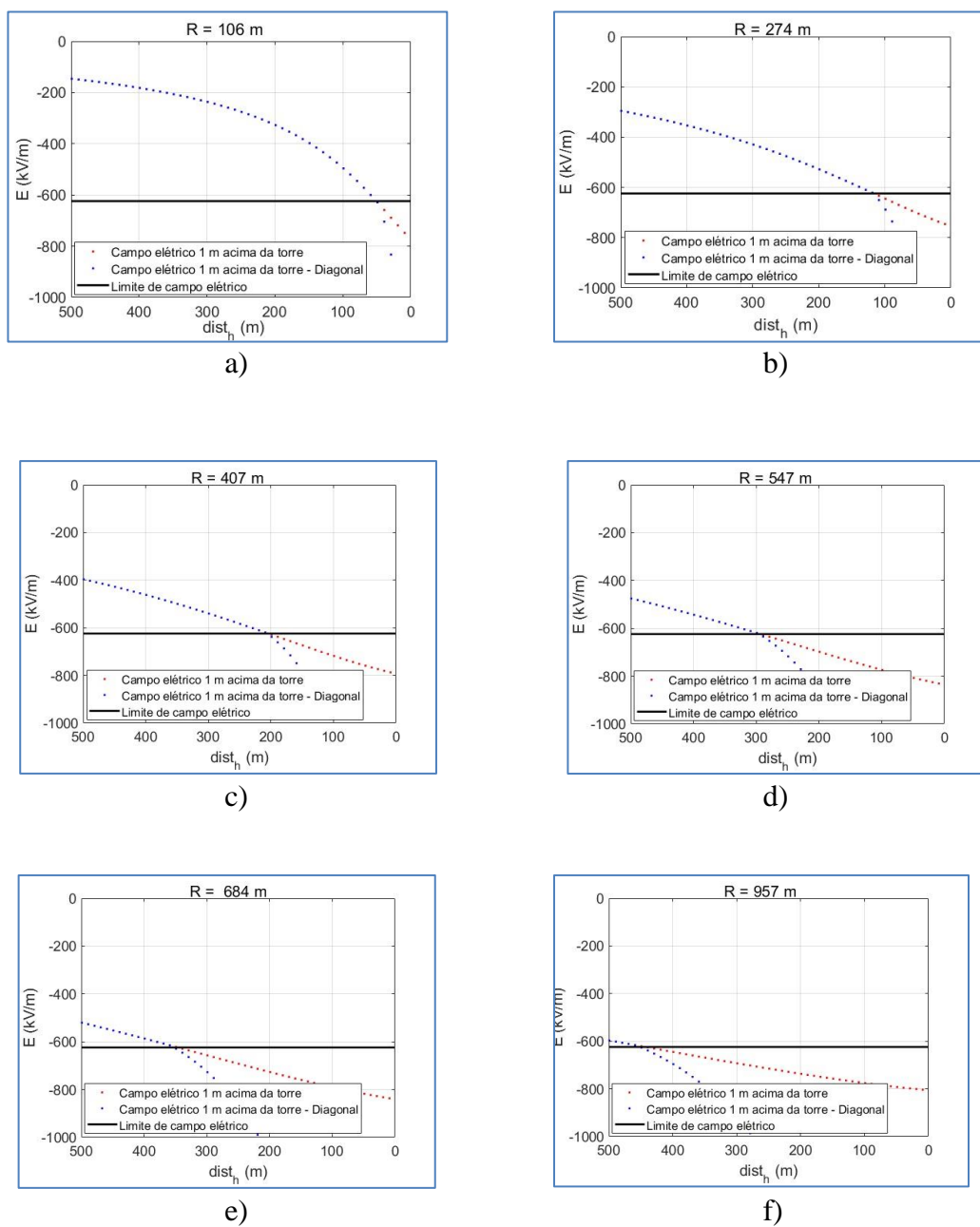
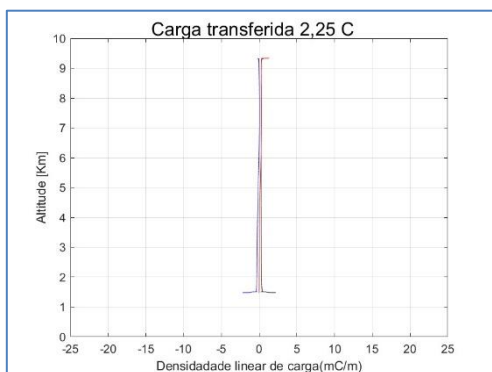


Figura 3.7 – Evolução do campo elétrico na torre para o canal vertical (vermelho) e o canal diagonal (azul)

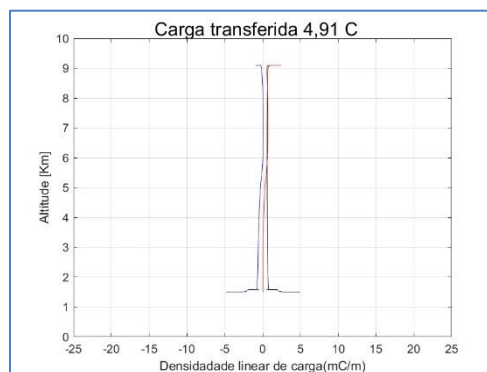
Nota-se que em cada situação a evolução do campo elétrico se intensifica muito mais após a “diagonalização” do canal, isto porque a cada passo ele se aproxima da torre e a atração entre eles é maior, gerando campo elétrico mais intenso, quando comparado ao campo elétrico resultante do canal totalmente vertical. Por exemplo, no caso (a) para uma $dist_h$ igual a 39 m, o campo elétrico do canal diagonal é 704 kV/m enquanto para o canal vertical é 658 kV/m.

3.3.2 Carga transferida e corrente de retorno

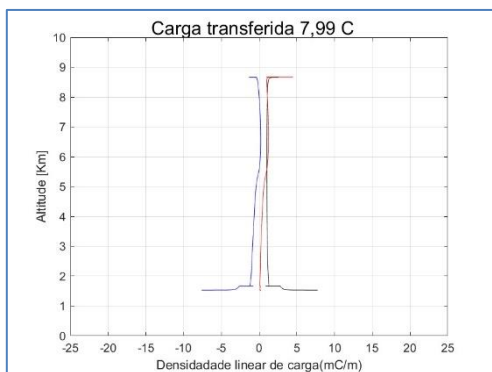
No capítulo 2, apresentou-se a Equação 2.4. Ela foi utilizada como base para o cálculo da carga transferida em cada cenário. A metodologia utilizada foi introduzida por Arcanjo [13], onde a carga total transferida (Q_t) é a diferença entre a carga acumulada no canal imediatamente após o *attachment* (Q_{PA}) e a carga acumulada no canal imediatamente antes do *attachment* (Q_{AA}). A Figura 3.8 ilustra os resultados em todos os casos.



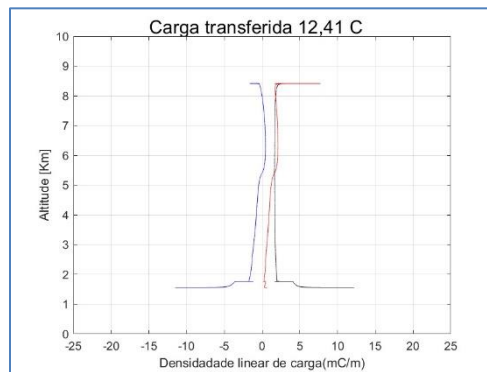
(a) R = 106 m



(b) R = 274 m



(c) R = 407 m



(d) R = 547 m

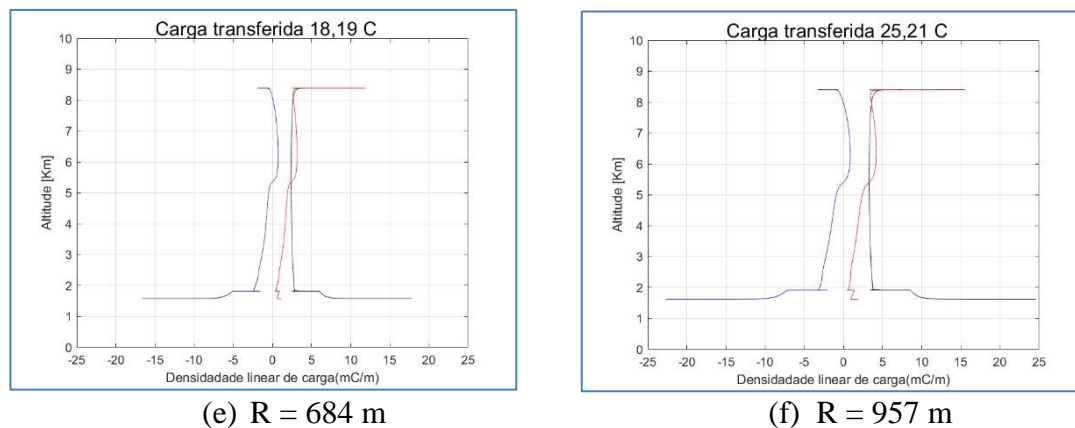


Figura 3.8 - Carga transferida (preto); Carga acumulada no canal antes do attachment (azul); Carga acumulada no canal após attachment (vermelho).

Conhecendo o valor da carga transferida, encontrou-se o valor da corrente de retorno simplesmente rearranjando a Equação 2.4. A Tabela 3.3 apresenta os valores dos picos de corrente de acordo com as cargas transferidas, resultantes da variação no diâmetro da nuvem, e o raio de atratividade.

Tabela 3.3 – Diâmetro da nuvem, carga transferida e corrente de retorno de acordo com o raio de atratividade para o MCS.

Raio de atratividade (m)	Diâmetro da nuvem (km)	Carga transferida (C)	Corrente de retorno (kA)
957	5 ^{***}	25,21	201
684	2,5	18,19	144
547	5 ^{**}	12,41	98
407	10 [*]	7,99	62
274	20	4,92	38
106	55	2,25	17

* nuvem padrão; ** nuvem com carga padrão e diâmetro alterado; *** nuvem com carga padrão dobrada e diâmetro alterado.

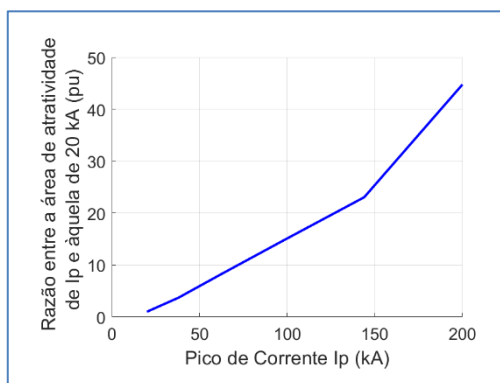
3.4 Processo adotado para encontrar o fator de descontaminação

Assumindo que os picos referentes às primeiras correntes de retorno na região de MCS são sempre maiores que 20 kA (I_{p_m} – pico mínimo), pôde-se determinar a área de atratividade (A_m – área mínima) para este pico de corrente por interpolação, utilizando as áreas da Tabela 3.1, e verificar o número de vezes que a probabilidade de qualquer pico de corrente (I_{p_x}), maior que 20 kA, ser atraída para a torre foi aumentada,

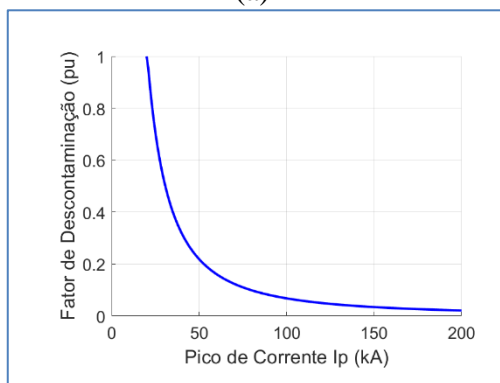
simplesmente realizando a divisão de A_x por A_m , onde A_x representa cada área de atratividade da Tabela 3.1.

Esta metodologia foi interessante, pois mostrou a maior atratividade de MCS por picos de corrente maiores, incluindo o efeito da montanha, qualquer que seja a probabilidade de ambas as correntes (I_{p_x}, I_{p_m}) na curva de distribuição original na região de MCS. Isso pode ser verificado no gráfico (a) da Figura 3.9 que ilustra a relação A_x/A_m pelo pico de corrente, onde observa-se o incremento da área de atratividade à medida que o pico de corrente aumenta. A curva obtida foi designada curva de atratividade e expressa o percentual de descargas atraídas para a torre de MCS.

Estes valores foram contaminados pelo efeito da atratividade e com o objetivo de corrigi-los, um fator de correção, correspondente ao inverso da razão calculada em (a) para cada pico de corrente, foi aplicado para determinar a curva correspondente ao fator de descontaminação, conforme o gráfico (b) da Figura 3.9.



(a)



(b)

Figura 3.9 – Curva de atratividade do MCS (a); Fator de descontaminação (b)

3.5 Recuperação da distribuição de picos de corrente ao redor de MCS pela dedução do efeito da montanha e do relevo do solo

A curva de frequência de ocorrência de primeiras descargas medidas em MCS descontaminada (Probability Density Function – PDF), em vermelho, foi obtida multiplicando-se o fator de descontaminação determinado na seção anterior pela PDF original de MCS (curva azul). Assim, o fator de descontaminação (Figura 3.9 – b), referente a um determinado pico de corrente I_p , foi multiplicado pela probabilidade de ocorrência deste mesmo I_p na PDF (curva azul) da Figura 3.10, recuperando sua frequência original de ocorrência, desconsiderando o efeito da atratividade da torre e da região montanhosa. A Figura 3.10 exibe as PDFs dos picos de corrente original e descontaminada da região de MCS.

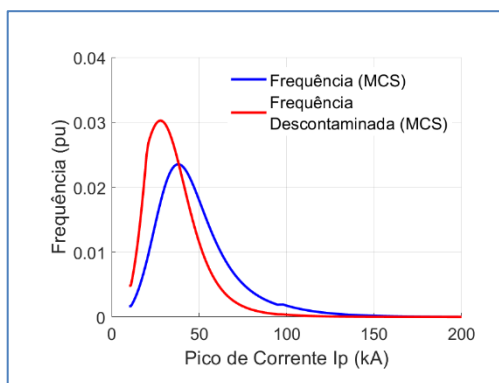
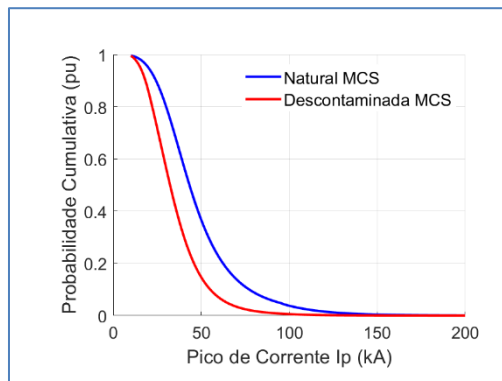


Figura 3.10 – PDFs original (azul) e descontaminada (vermelha) de MCS.

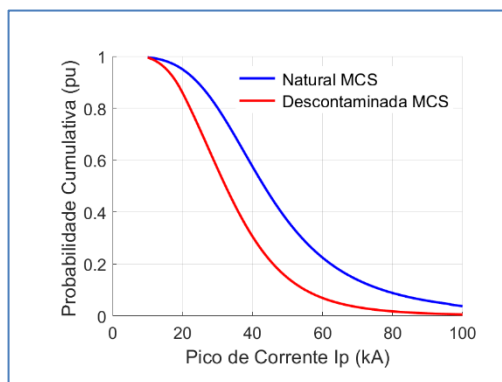
Conforme esperado, após a descontaminação da PDF original de MCS, a ocorrência dos líderes com maiores picos de corrente foi substancialmente diminuída, enquanto a frequência dos líderes com menores picos de corrente foi substancialmente aumentada (deslocamento do pico da curva)

Estas curvas foram integradas para fornecer a curva lognormal de distribuição cumulativa (Cumulative Distribution Function – CDF) de picos de corrente de MCS, tanto a original (curva azul) quanto a descontaminada (curva vermelha). O valor mediano de pico da distribuição descontaminada (32 kA) foi bem menor do que aquele da

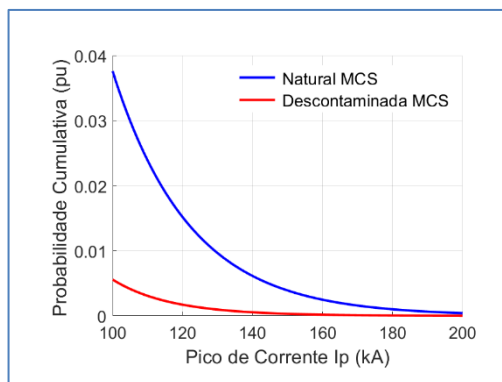
distribuição original de MCS (43,3 kA), conforme pode ser visto nos gráficos da Figura 3.11.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.11 – (a) CDFs original (azul) e descontaminada (vermelha) de MCS com dois detalhes: (b) até 100 kA; (c) acima de 100 kA.

3.6 Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma nova metodologia para descontaminar a curva real de distribuição de picos de corrente de uma torre instrumentada, em específico, das primeiras descargas medidas na Estação do Morro do Cachimbo.

A ferramenta computacional, que simula a evolução do líder passo a passo, foi utilizada para gerar a curva de atratividade das descargas pelo relevo montanhoso e torre. Ela foi construída a partir de diferentes cenários de pico de corrente, simplesmente variando o diâmetro da nuvem padrão, onde os maiores picos demonstraram sofrer maior influência dessa atratividade.

A partir da curva de atratividade, um fator de descontaminação foi determinado para cada valor de pico de corrente como sendo o inverso desse valor correspondente na curva. O resultado, que é menor ou igual a unidade, foi aplicado à PDF original de MCS para descontaminá-la e determinar uma nova PDF que deduz o efeito da atratividade da torre e do relevo montanhoso sobre as descargas.

Por fim, ao integrar a PDF descontaminada para encontrar a CDF descontaminada, verificou-se uma diminuição no valor mediano do pico de corrente que foi reduzido de 43,3 *kA* para 32 *kA*.

4 Determinação da atratividade de descargas atmosféricas por linhas de transmissão

4.1 Introdução

Na avaliação do desempenho das LTs frente descargas atmosféricas, um dos principais desafios científicos consiste em determinar-se, de forma confiável, o número estimado de descargas (N_L – descargas/100-km/ano) atraídas para a linha, em conjunto com a distribuição de picos de corrente destas descargas.

O conhecimento de N_L é fundamental, pois o número de desligamentos N_D das LTs é praticamente proporcional ao N_L . Também, a distribuição de picos de corrente de descargas incidentes na linha influencia o valor de N_D . Essa distribuição seria diferente daquela que existiria na ausência da LT nessa mesma área, segundo Visacro *et al.* [39].

O N_L é proporcional a três parâmetros: à densidade de descargas atmosféricas N_g (descargas/km²/ano) na região onde se faz análise, à área A (km²) ocupada pela linha e ao redor dela e ao F_{LA} , que é o fator de atratividade da LT, conforme Equação 4.1.

$$N_L = N_g \cdot (A \cdot F_{LA}) \text{ (descargas/100-km/ano)} \quad (4.1)$$

Os modelos existentes na literatura trazem uma fonte de incerteza em relação ao F_{LA} porque não possuem uma validação experimental. Por isso, é importante estudá-lo para que os resultados possam ser mais confiáveis. Os trabalhos têm utilizado expressões mais simples para expressar o efeito da atratividade. Uma expressão muito disseminada é a recomendada pela Norma do IEEE 1243 [40] , conforme Equação 4.2.

$$N_L = N_g \cdot \left[\frac{28 \cdot h^{0.6} + b}{10} \right] \text{ (descargas/100-km/ano)} \quad (4.2)$$

Onde N_g é a densidade de descargas atmosféricas (descargas/km²/ano); h é a altura da torre (m) e b é a distância entre os cabos de blindagem (m).

Este capítulo aplica a PDF de MCS descontaminada para analisar a atratividade das descargas pelas LTs, utilizando a metodologia proposta neste trabalho (Equação 4.1) e a expressão recomendada pelo IEEE (Equação 4.2). Ademais, apresenta os resultados da distribuição dos picos de corrente das descargas incidentes na LT, considerando-se que na região de instalação da LT fosse válida a distribuição PDF descontaminada.

4.2 Análise da atratividade: metodologia

A metodologia de análise da atratividade das LTs por descargas atmosféricas foi introduzida por Almeida [14] e consiste em monitorar o campo elétrico em pontos estratégicos na região onde a linha se encontra. A Figura 4.1 ilustra a representação esquemática (vista superior) da área utilizada para a análise da atratividade das descargas pelas LTs.

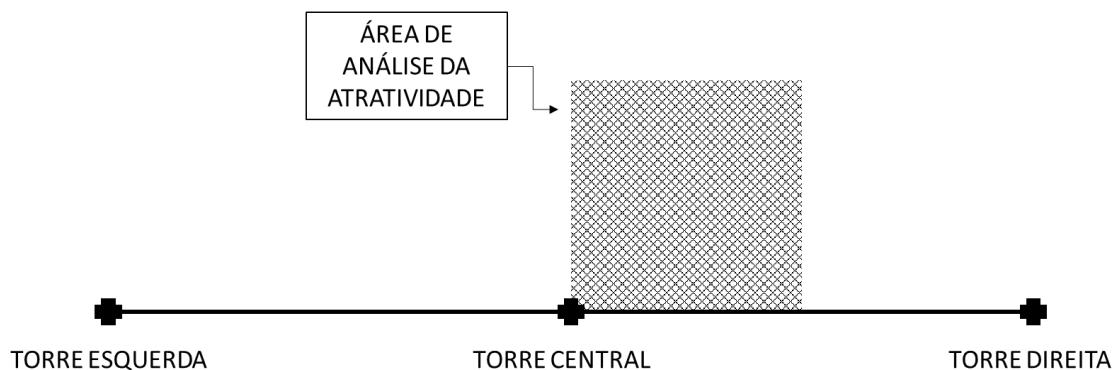


Figura 4.1 – Área de análise da atratividade das descargas pela LT. Almeida [14]

Para a análise de atratividade, é realizada a comparação do campo elétrico em três pontos críticos: 1 m acima da torre central, 1 m acima de um objeto auxiliar posicionado ao nível do solo na projeção do DNL e 1 m acima do cabo para-raios (blindagem) na posição mais próxima da projeção do DNL no solo, conforme apresenta a Figura 4.2.

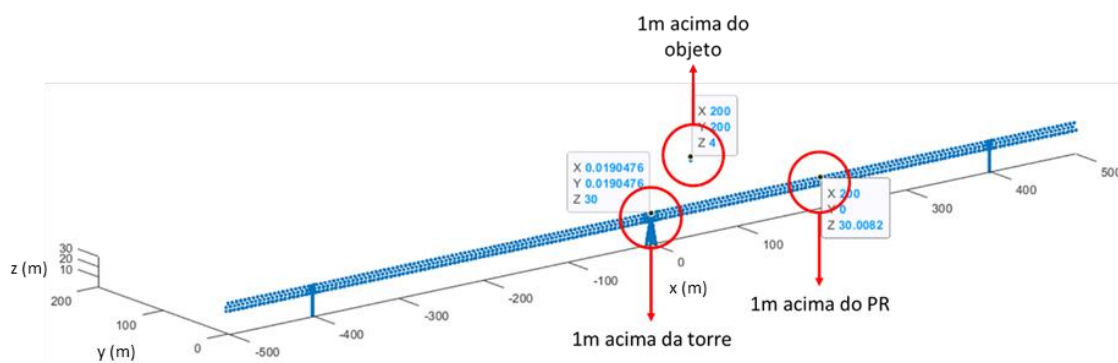


Figura 4.2 – Pontos de medição do campo elétrico na área de avaliação de atratividade das descargas pela LT: 1 m acima da torre central; 1 m acima do cabo para-raios; 1 m acima do objeto auxiliar. Almeida [14]

Considera-se a evolução do líder vertical em várias posições, cuja projeção no solo corresponde às posições no interior da área quadrada, indicada na Figura 4.3. A lateral inferior do quadrado (eixo x) corresponde à metade do vão da LT e a lateral esquerda (eixo y) corresponde à distância da faixa lateral considerada. Cada ponto de projeção do líder recebe uma identificação alfanumérica representada nos eixos secundários para facilitar o armazenamento dos dados.

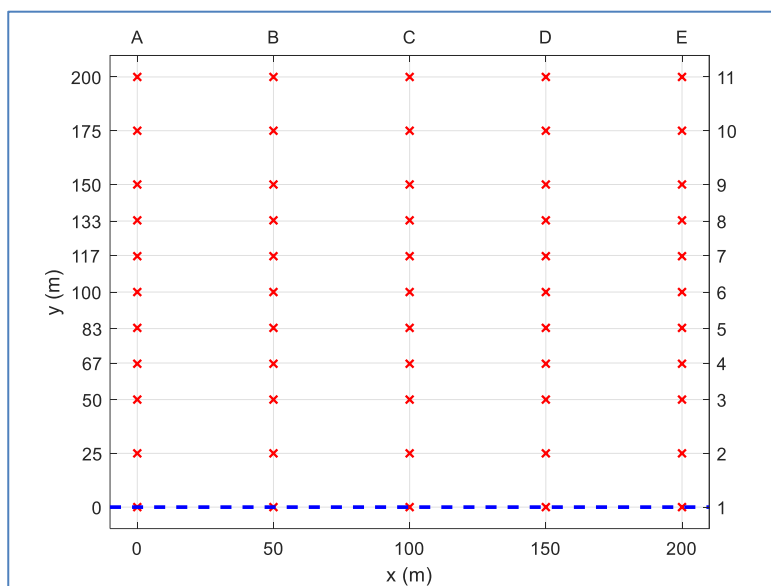


Figura 4.3 – Pontos utilizados para a projeção do líder. Almeida [14]

4.2.1 Relação entre carga e corrente de retorno para a LT

Para obter diferentes cenários de corrente de retorno e diferentes condições para análise da atratividade, Almeida [14] também variou o diâmetro da nuvem de 2,5 km a 55 km e utilizou o MCS para obter a carga transferida e conseqüentemente a corrente transferida para a LT, localizada em solo plano, em cada situação. Os resultados se encontram na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Relação entre carga transferida e corrente de retorno para a LT. (a) nuvem padrão; (b) nuvem com carga padrão e diâmetro alterado; (c) nuvem com carga padrão dobrada e diâmetro alterado. Adaptado de Almeida [14].

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

Conforme observa-se, a variação no diâmetro da nuvem resultou em diferentes cenários de pico de corrente se comparados àqueles encontrados para as mesmas condições de diâmetro da nuvem no caso de MCS (Tabela 3.3). Esses resultados são consistentes uma vez que o relevo observado para a LT é plano, enquanto o relevo de MCS é montanhoso.

4.3 Estudo de caso 1: LT 138 kV, 30 m

O primeiro caso estudado consistiu em uma LT de 138 kV, com um vão de 400 m e um único cabo de blindagem, situado em solo plano, conforme a Figura 4.4.

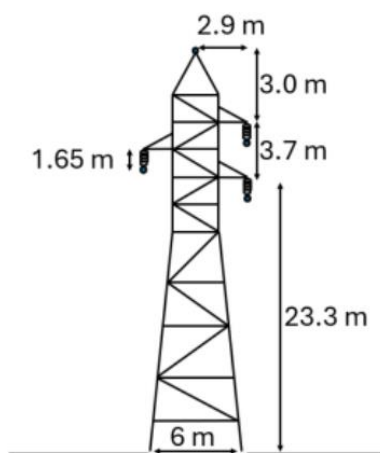
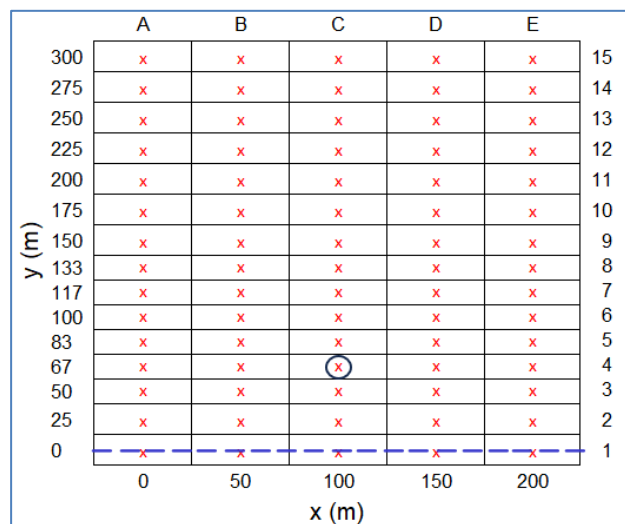
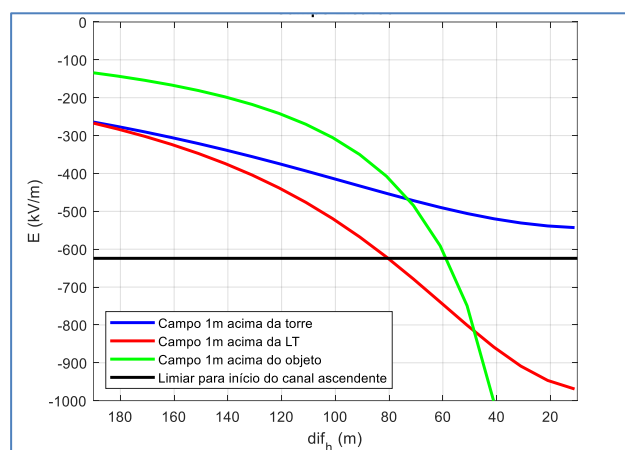


Figura 4.4 – Representação simplificada da geometria da torre e altura do cabo de blindagem para a LT de 138 kV. Visacro *et al.* [41]

O cenário da Figura 4.5 (a) corresponde à área cuja faixa lateral possui 300 m de largura a partir do cabo de blindagem e 200 m de comprimento (meio vão, de um lado da LT apenas). Segundo Visacro *et al.* [42], essa área foi dividida em 75 subáreas e a evolução do líder vertical em cada posição, cuja projeção (x) é indicada na figura, foi simulada, observando-se o comportamento do campo elétrico nos três pontos críticos supracitados. A figura mostra o deslocamento da posição de evolução deste líder a cada 50 m ao longo do vão, a partir do eixo da torre, porém, com deslocamentos variados ao longo da faixa lateral. Isto foi feito para contemplar a atratividade de descargas com picos de corrente menores, levando a posições não uniformemente espaçadas. A parte (a) exemplifica a projeção do líder no ponto (100,67) para uma corrente prospectiva de 47 kA e a parte (b) ilustra o resultado da evolução do campo elétrico.



(a)



(b)

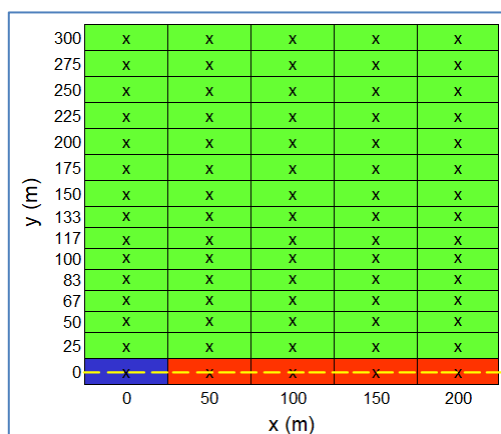
Figura 4.5 – Representação do ponto escolhido para projeção do líder para uma corrente prospectiva de 47 kA (a) e o resultado da evolução do campo elétrico nos pontos críticos (b). Adaptado de Visacro *et al.* [42].

Assim como utilizado no capítulo anterior, o critério adotado para definir a terminação da descarga (solo, torre ou cabo de blindagem) enquanto o líder se desenvolvia, consistiu em avaliar o primeiro dos pontos críticos a alcançar o limiar de campo elétrico de 624 kV/m . Em particular, para avaliar o campo elétrico no solo, ele foi monitorado 1 m acima de um objeto piramidal de 4 m de altura, com raio de 1,5 m no solo, que diminui para 0,25 m na altura de 4 m, para representar árvores ou arbustos que normalmente existem na região ao redor das LTs.

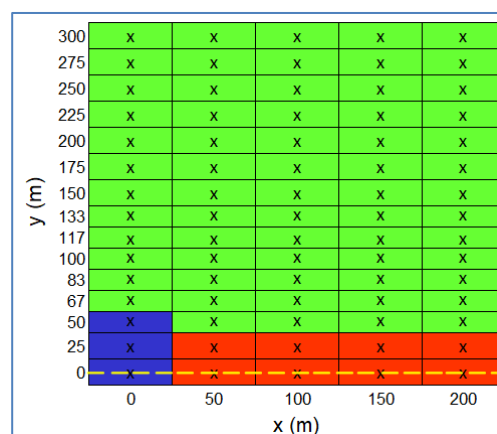
Verifica-se que neste ponto, da Figura 4.5 (a), o campo elétrico acima do cabo de blindagem alcança o limiar para início do UPL primeiro se comparado à torre e ao objeto

no solo, aproximadamente quando a distância vertical entre o líder e ele é 80 m. Portanto, o cabo de blindagem constitui o ponto preferencial de incidência (maior atratividade).

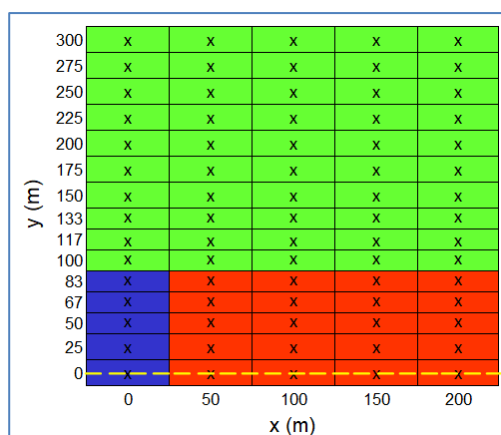
Aplicando esta abordagem aos seis cenários, em cada uma das 75 posições (450 análises), construiu-se mapas de atratividade que representam as terminações do líder no solo (verde), no cabo de blindagem (vermelho) ou na torre (azul), assim como ilustra a Figura 4.6.



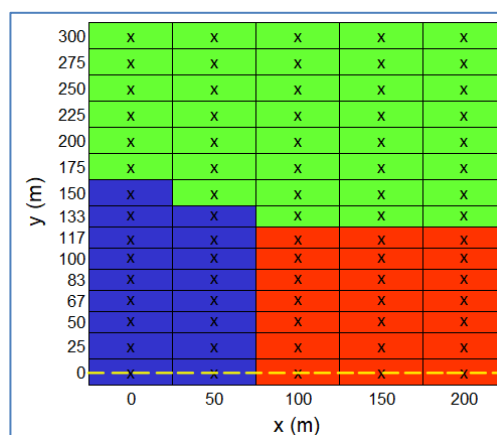
(a)



(b)



(c)



(d)

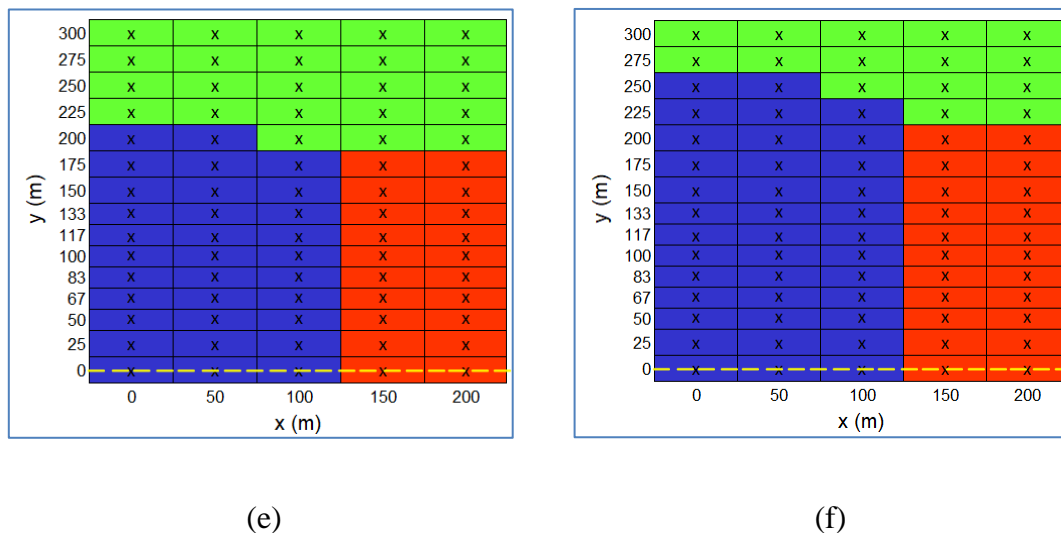


Figura 4.6 – Mapas de atratividade para os seis cenários de pico de corrente. (a) 10 kA, (b) 24 kA, (c) 47 kA, (d) 83 kA, (e) 128 kA, (f) 167 kA. Visacro *et al.* [42]

Extrai-se da figura acima a maior atratividade de descargas com maiores picos de corrente (cabo de blindagem e torre) pela LT. Enquanto o mapa da corrente de 10 kA alcança uma faixa lateral de 12,5 m de atração para a LT, o mapa da corrente de 167 kA alcança uma faixa lateral de aproximadamente 262,5 m.

Os resultados da Figura 4.6 podem ser apresentados numa forma gráfica que melhor expressa quantitativamente a atratividade exercida pela LT, colocada na Figura 4.7. Assumindo-se uma distribuição espacial uniforme dos líderes que se aproximam do solo para cada um dos picos de corrente, o gráfico apresenta o percentual do número de descargas que foram atraídas pela LT, que terminariam no solo na ausência dela. Assim, a curva indica a atratividade da LT, como o quociente entre as descargas atraídas pela LT e aquelas que incidiriam na área total (300 m x 200 m) para cada pico de corrente, expresso em valor percentual.

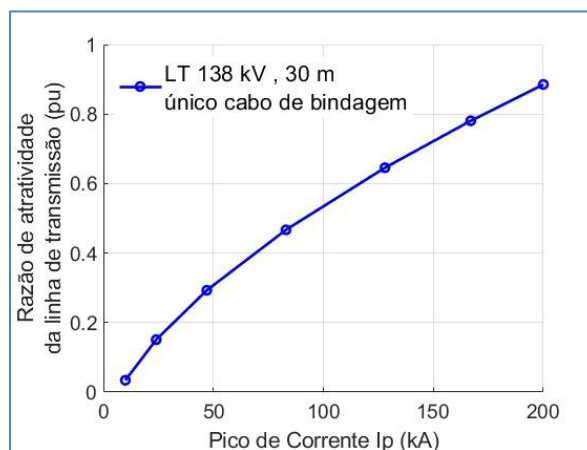
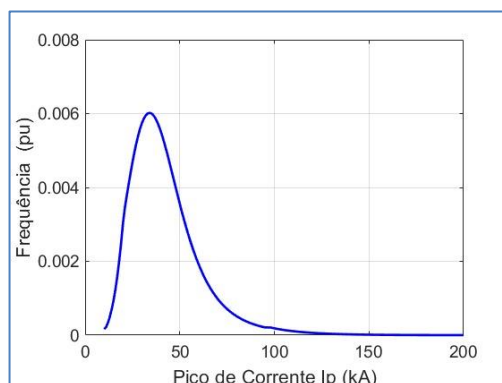


Figura 4.7 – Razão entre a área atrativa da LT e a área total de atratividade.

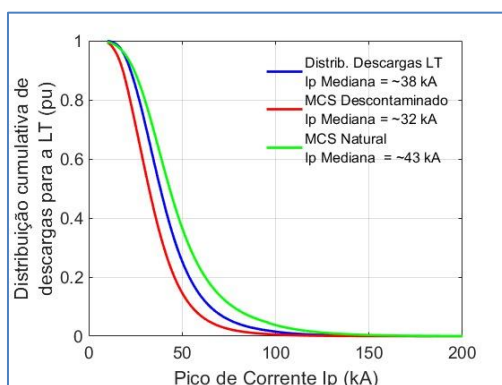
O resultado apresentado na Figura 4.7 corrobora a afirmativa anterior, onde é notável o crescimento dos eventos terminados na LT à medida que o pico de corrente aumenta.

4.3.1 Determinação da distribuição de picos de corrente das descargas para a LT

A distribuição dos picos de corrente das descargas incidentes na LT foi obtida multiplicando-se a frequência de ocorrência de cada pico de corrente na área lateral (300 m x 200 m) pela razão de atratividade correspondente a este mesmo pico de corrente. Considerando a PDF descontaminada de MCS (Figura 3.10) e a razão da atratividade da Figura 4.7, realizou-se esta operação, obtendo o resultado demonstrado na parte (a) da Figura 4.8. Em seguida, a nova CDF para as descargas incidentes na LT pôde ser determinada (azul) por meio de integração dos valores da PDF. Esta distribuição é comparada com as distribuições original (verde) e descontaminada (vermelho) da MCS, conforme ilustra a parte (b).



(a)



(b)

Figura 4.8 – (a) PDF da LT; (b) CDF: MCS (verde), MCS descontaminada (vermelho), LT (azul).

Ao integrar a PDF da LT, encontrou-se um valor menor que a unidade (0,22) que corresponde ao percentual de 22 % das descargas que deveriam terminar na faixa lateral de 300 m, mas que foram atraídas para a LT. Sendo assim, no cálculo da CDF, este valor foi utilizado para representar 100 % dos eventos terminados na LT.

A curva PDF também demonstrou uma diferença significativa (aumento) na ocorrência das correntes com picos maiores em relação àquela de MCS descontaminada (Figura 3.10), enfatizando o efeito de atratividade da LT nesses picos. Isso pode ser observado e confirmado através da CDF da LT, que resultou em um valor mediano de pico de corrente igual a 38 kA contra 32 kA da CDF descontaminada de MCS. A CDF original de MCS possui um valor mediano de 43,3 kA. Assim, a distribuição dos picos de corrente das descargas atraídas pela LT apresenta um comportamento intermediário.

4.3.2 Determinação do número (N_L) de descargas atraídas para a LT

O número de descargas atraídas para a LT pode ser facilmente determinado através da Equação 4.1. A área correspondente é aquela equivalente a duas vezes a faixa ao redor da LT e o F_{LA} é o resultado da integração da curva da Figura 4.8 (a), que é igual a 0,22. Multiplicando estes componentes por 100 km por ano e deixando em função da densidade de descargas ao redor da LT, o resultado do N_L é apresentado na Equação 4.3.

$$N_L = Ng \cdot (2 \cdot 0,3 \cdot 100) \cdot 0,22 = 13,2 Ng \text{ (descargas/100-km/ano)} \quad (4.3)$$

Vale ressaltar que além do número de descargas atraídas para a LT, a distribuição cumulativa dos picos de corrente também tem influência na taxa de desligamento calculada para ela.

4.4 Estudo de Caso 2: Explorando o efeito da altura e geometria da LT

O processo apresentado na seção anterior foi aplicado para explorar diferentes condições da altura e do número de cabos de blindagem nos resultados. A LT de 138 kV (Figura 4.4) com único cabo de blindagem foi simulada nas alturas de

20 m, 30 m e 40 m , enquanto a LT de 230 kV com duplo cabo de blindagem (espaçamento de 7,5 m) foi simulada nas alturas de 40 m e 64 m . Os detalhes da geometria da torre e altura dos cabos de blindagem para essa última linha podem ser vistos na Figura 4.9.

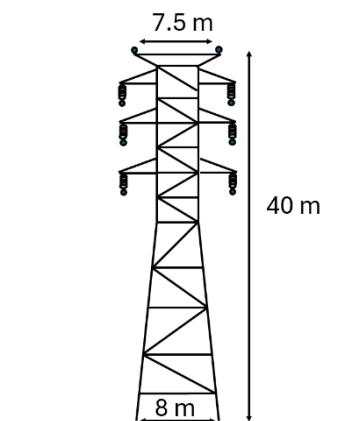


Figura 4.9 – Representação simplificada da geometria da torre e altura dos cabos de blindagem para a LT de 230 kV. Visacro et al. [41]

Para avaliar-se a atratividade nesse caso, utilizou-se uma área lateral tal qual na Figura 4.5 (a). Entretanto, embora o comprimento do cabo de blindagem (meio vão) tenha sido mantido de 200 m, a largura da faixa lateral foi dobrada e passou a ter um valor de 600 m. A maior largura da faixa lateral se fez necessária devido à maior distância de atratividade das correntes com pico maior para a altura da torre de 64 m. Esta área foi dividida em 150 subáreas com espaçamento lateral entre o centro delas, após a distância de 300 m, igual a 25 m. O deslocamento do líder foi simulado em cada uma das 150 posições, avaliando a evolução do campo elétrico e a sua terminação nos pontos críticos (cabo de blindagem, torre ou solo) para gerar mapas de atratividade como os da Figura 4.6.

Este processo foi realizado para cada uma das cinco configurações da LT e para cada um dos seis cenários de pico de corrente (4500 análises). Os resultados dos mapas de atratividade foram transformados em curvas de razão de atratividade para demonstrar o percentual em p.u das descargas atraídas para a LT, conforme apresenta a Figura 4.10.

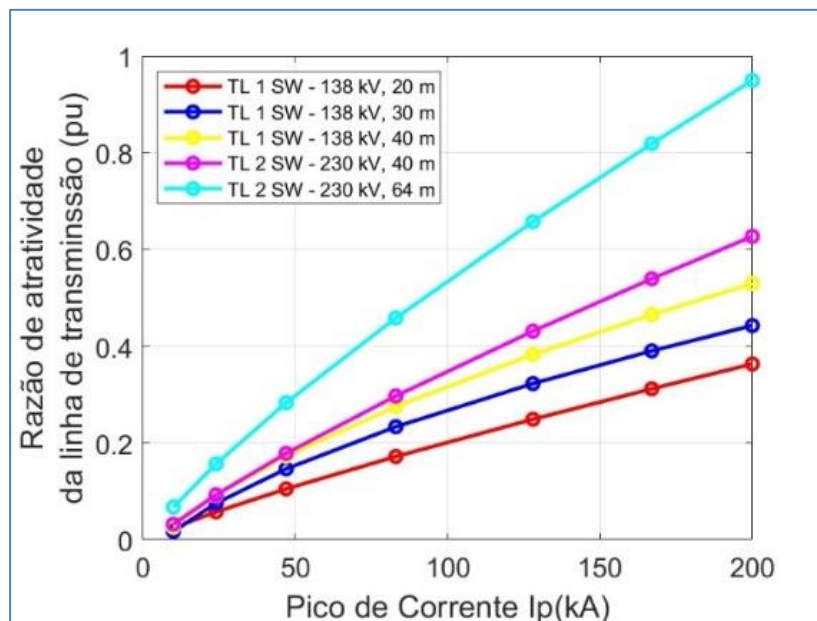


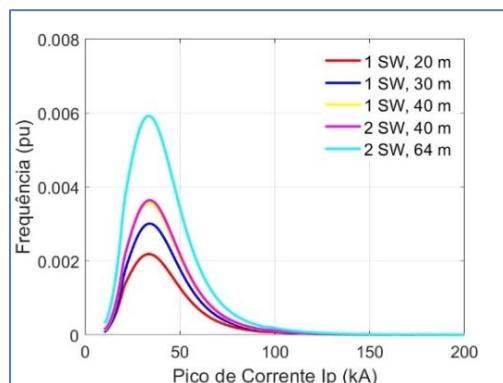
Figura 4.10 – Atratividade das linhas de 138 kV e 230 kV: Razão entre as descargas atraídas para a LT e o número de descargas que terminariam no solo cuja faixa lateral é de 600 m. SW = Shield wire (cabo de blindagem)

Nota-se que devido à utilização da faixa lateral de 600 m para ter uma mesma base de comparação e incluir as curvas de percentual das correntes atraídas pela LT, com cabo de blindagem em alturas mais elevadas, houve uma redução pela metade no percentual de descargas atraídas para a LT de 138 kV a 30 m de altura. Isso pode ser visto, por exemplo, ao avaliar a corrente de 200 kA que na Figura 4.7 tem um percentual de 0,87 contra 0,44 na Figura 4.10. Como o número de descargas atraídas não se alterou (será visto posteriormente na Tabela 4.2), mas a largura da faixa dobrou, esta redução manteve a proporção, não alterando a informação que ambas as curvas trazem (para a faixa de 300 m e 600 m).

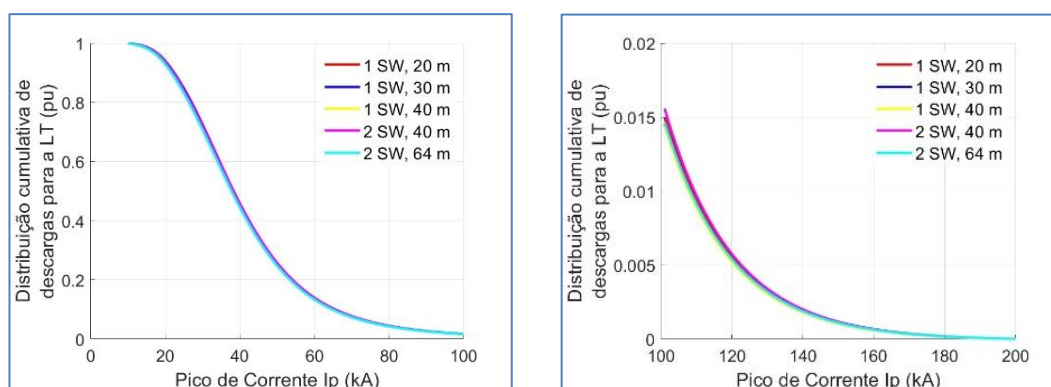
4.4.1 Determinação da distribuição de picos de corrente das descargas para as diferentes configurações da LT

Assim como no estudo de caso 1, a curva de distribuição de picos de corrente das descargas atraídas para a LT foi determinada multiplicando-se a frequência de ocorrência de cada pico de corrente da curva da Figura 3.10 (PDF descontaminada de MCS) pela razão de atratividade deste mesmo pico na Figura 4.10. Este processo foi realizado separadamente para cada uma das cinco curvas, referentes às diferentes configurações da LT, e os resultados podem ser vistos na Figura 4.11 (a). Ao integrá-las, gerou-se as novas CDFs para a LT, conforme Figura 4.11 (b). A integração resultou em valores menores

que a unidade e esses foram utilizados para representar 100 % descargas atraídas para a LT na faixa de 600 m no cálculo da CDF.



(a)



(b)

Figura 4.11 – (a) PDF; (b) CDF com dois detalhes: até 100 kA (esquerda), acima de 100 kA (direita). SW = Shield wire (cabo de blindagem).

Observa-se um aumento na probabilidade de ocorrência das correntes com picos maiores se comparada àquela da curva de distribuição de MCS descontaminada (Figura 3.10). O valor mediano aumentou de 32 kA para 38 kA (+19%).

O resultado inesperado é que apesar da modificação na configuração da LT (altura e número de cabos de blindagem), o que a fez ter uma CDF diferente daquela descontaminada de MCS (Figura 3.11), a variação da altura de 20 m a 64 m não afetou a distribuição. Isso demonstra que o aumento da probabilidade (incluindo o aumento do valor mediano para 38 kA) foi o mesmo qualquer que fosse a altura dos cabos de blindagem. Um resultado semelhante foi encontrado por Borgetti *et al.* [43] em seus estudos sobre a influência da altura da torre no efeito da atratividade utilizando o modelo eletro-geométrico.

4.4.2 Determinação do número (N_L) de descargas atraídas para as linhas para as diferentes configurações destas

O N_L para cada configuração da LT foi calculado utilizando tanto a equação 4.1 (foco deste trabalho) quanto a equação 4.2 (fórmula padrão disseminada na literatura). A Tabela 4.2 apresenta todos os resultados.

Tabela 4.2 – Determinação do número de descargas atraídas para a LT (N_L) de acordo com a metodologia deste trabalho e à utilizada pelo IEEE para comparação. $NG = 1$ (descarga/100-km/ano). Visacro *et al.* [41]

Tipo	H(m)	B(m)	W(km)	F_{LA}	N_L (descargas/100-km/ano)				ΔN_L (%)
					Este trabalho (A)	Δ (%)	IEEE (B)	Δ (%)	$[(B-A)/A \cdot 100]\%$
1 SW	20	0	0,6	0,0811	9,73	-	16,90		74%
1 SW	30	0	0,6	0,1098	13,18	35	21,55		64%
1SW	40	0	0,6	0,1307	15,68	61	25,61		64%
2 SW	40	7.5	0,6	0,1352	16,22	-	26,36		63%
2 SW	64	7.5	0,6	0,2193	26,32	62	34,70		34%

SW = Shield wire (cabo de blindagem); H = Altura; B = Espaçamento entre os cabos de blindagem; W = Largura da faixa lateral (cada lado da LT); F_{LA} = Fração de raios atraídos para a área atrativa da LT (Fator de atratividade).

A Tabela 4.2 apresenta resultados importantes. Fica claro o efeito significativo da altura no N_L . Para a LT de 138 kV verifica-se um aumento de 35 % e 61 % (de 9,73 para 13,18 e 15,68) no número de descargas atraídas para ela quando há um aumento na altura da torre de 50 % e 100 % (de 20 m para 30 m e 40 m), respectivamente. Já para a LT de 230 kV o aumento foi de 62 % (de 16,22 para 26,32) quando a altura da torre aumenta em 62 % (de 40 m para 64 m).

Ao analisar o número de cabos e o volume da torre (mesma altura de 40 m e cabos de blindagem simples e duplo) percebe-se que a atratividade da LT foi ligeiramente

influenciada, exceto para as correntes de picos maiores (Figura 4.10). O efeito global sobre o N_L foi muito pequeno, sendo 15,68 (descargas/100-km/ano) contra 16,22 (descargas/100-km/ano) para 1 e 2 cabos de blindagem, respectivamente. Isto representa um aumento de apenas 3,4 %.

Por fim, o N_L calculado a partir da Equação 4.2 (Padrão IEEE 1243) foi significativamente maior se comparado à metodologia proposta neste trabalho (Equação 4.1). É aproximadamente 64 % maior para as torres com 30 m e 40 m, aumentando para 74 % para a torre a 20 m e diminuindo para 34 % para a torre com cabo duplo a 64 m.

4.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou a aplicação da curva descontaminada de distribuição dos picos de corrente de MCS em duas LTs: 138 kV e 230 kV, situadas hipoteticamente em um solo plano, para avaliar a atratividade das descargas por elas. Tal análise foi realizada numa área correspondente a um quarto da área situada entre duas torres, a princípio, com 300 m de faixa lateral e depois com 600 m.

O campo elétrico foi medido em três pontos críticos: 1 m acima da torre, 1 m acima da linha e 1 m acima do objeto situado no solo. Através do comportamento desse campo em cada um destes pontos foi possível saber para onde o DNL seria atraído, de acordo com o limiar para surgimento do UPL (624 kV/m). Os resultados embasaram a criação dos mapas de atratividade. Este processo foi realizado para cada um dos seis cenários de pico de corrente: 10 kA, 24 kA, 47 kA, 83 kA, 128 kA, 167 kA.

Na sequência, as curvas de eventos terminados na LT (razão de atratividade) foram geradas para cada tipo de configuração da LT. A multiplicação delas pela PDF descontaminada de MCS gerou as curvas PDFs para a rota da linha, que são diferentes daquela correspondente ao solo na sua redondeza. A integração destas curvas resultou nas CDFs cujo valor mediano se manteve o mesmo em todos os casos (38 kA). Além disso, foi possível computar o N_L em cada caso, que se manteve menor se comparado aos resultados obtidos pela fórmula padrão da literatura.

5 Conclusões

5.1 Conclusões iniciais

Este trabalho faz parte do conjunto das dissertações desenvolvidas pelo grupo de pesquisa do *Lightning Research Center* (LRC) que utiliza o modelo de Kasemir em análises relativas a descargas atmosféricas e os efeitos de atratividade destas que assume que o líder é bipolar, bidirecional e de carga líquida total nula.

Utilizando a ferramenta computacional que implementou tal modelo, desenvolvida em três dissertações que abordaram o tema, elaborou-se uma metodologia para descontaminar a curva de distribuição de picos de correntes das descargas medidas na Estação do Morro do Cachimbo e a partir dela, avaliou-se o número N_L de descargas atraídos para linhas de transmissão em diferentes configurações e alturas, situadas em um solo plano.

5.2 Conclusões gerais

A metodologia proposta nesta dissertação para descontaminar uma curva real de distribuição de picos de corrente de torres instrumentadas e investigar a atratividade das descargas por LTs gerou resultados relevantes.

O primeiro resultado importante deste trabalho consistiu na **descontaminação da distribuição dos picos das primeiras correntes de retorno** medidas em MCS, cujo valor mediano passou a ser 32 kA contra $43,3\text{ kA}$ (obtido das medições em MCS).

O segundo resultado importante consistiu na **quantificação da atratividade** (F_{LA}) que as LTs exercem sobre as descargas, para diferentes alturas e arranjos geométricos de LTs. Este resultado possibilita o cálculo do valor do número N_L com maior confiabilidade.

O terceiro resultado importante consistiu na **determinação do número de descargas** (N_L) incidentes na LT. Os resultados da aplicação desta metodologia para encontrar o N_L das LTs estudadas, demonstraram uma diferença significativa em relação àqueles encontrados através da expressão tradicional recomendada pela Norma IEEE 1243. Esta diferença variou de 74 % a 34 %, decrescendo à medida que a altura dos cabos de blindagem aumenta (de 20 m a 64 m). Em todos os casos, os resultados do N_L obtidos pela metodologia utilizada no trabalho foram inferiores aos resultados da expressão citada.

O quarto e último resultado importante consistiu na **determinação da distribuição dos picos de corrente** das descargas que incidiram na LT. A distribuição cumulativa dos picos de corrente sofreu um aumento no valor mediano desta curva de 19% , em relação à curva de MCS descontaminada. Passou a ser 38 kA . Interessantemente, apesar das geometrias testadas tanto para a LT de 138 kV quanto para a de 230 kV serem diferentes, o valor mediano se manteve igual, indicando um mesmo aumento na probabilidade, qualquer que fosse a configuração.

5.3 Propostas de continuidade

Esta dissertação aplicou o modelo computacional de formação do canal de descarga de Kasemir para encontrar a curva de atratividade para a torre de MCS (incluído o efeito do relevo do solo). A partir da curva de atratividade promoveu-se a descontaminação da distribuição de picos de corrente das primeiras descargas medidas em MCS. Assim, esta curva descontaminada foi aplicada em dois modelos de LT situadas em solo plano para encontrar além do NL, a curva de distribuição de picos de corrente das descargas incidentes na linha.

Uma proposta de continuidade de interesse da engenharia e para fortalecer esta metodologia seria a aplicação sistemática em outras geometrias e alturas de LT, para produzir resultados que permitam gerar expressões simplificadas e confiáveis para o estudo da atratividade de LTs.

Uma segunda proposta seria a aplicação da metodologia de descontaminação em outras curvas reais de distribuição de corrente, a fim de avaliar sua aplicação em diferentes tipos de relevo do solo.

6 Referências Bibliográficas

- [1] S. Visacro, *Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem em Engenharia*, São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2005.
- [2] S. Visacro, A. Soares, M. Schroeder, L. Cherchiglia e V. Sousa, “Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station,” *Journal Geophysical Research*, vol. 109, n° D01105, pp. 1-11, 2004.
- [3] S. Visacro, M. Vale, G. Correa e A. Teixeira, “Early phase of lightning currents measured in a short tower associated with direct and nearby lightning strikes,” *Journal Geophysical Research*, vol. 115, n° D16104, pp. 1-11, 2010.
- [4] S. Visacro, C. Mesquita, A. d. Conti e F. Silveira, “Updated statistics of lightning currents measured at Morro do Cachimbo Station,” *Atmospheric Research*, vol. 117, pp. 55-63, 2012.
- [5] F. H. Silveira, F. S. Almeida e S. Visacro, *Assessing the influence of peak current distributions of first return strokes on the lightning performance of transmission lines: Instrumented tower distributions versus standard distributions*, Electric Power Systems Research, 2023.
- [6] S. Visacro, L. Araujo, M. Guimarães e M. Vale, “M-component currents of first return strokes in natural negative cloud-to-ground lightning,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 118, pp. 12132-12138, 2013a.
-

- [7] M. Guimarães, L. Araujo, C. Pereira, C. Mesquita e S. Visacro, “Assessing currents of upward lightning measured in tropical regions,” *Atmospheric Research (Print)*, vol. 149, pp. 324-332, 2014.
- [8] M. Guimarães, “Observação e modelagem dos processos físicos envolvidos na formação das descargas atmosféricas,” Belo Horizonte, 2017.
- [9] S. Visacro, M. Guimarães e M. Vale, “Features of upward positive leaders initiated from towers in natural CG lightning based on simultaneous high-speed videos, measured currents and electric fields,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 122, pp. 12786-12800, 2017a.
- [10] S. Visacro, M. Guimarães e M. Vale, “Striking distance determined from high-speed videos and measured currents in negative cloud-to-ground lightning,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 122, pp. 13356-13369, 2017b.
- [11] M. Guimarães, M. Vale e S. Visacro, “Electric Field During Upward Connecting Leader Initiation in Negative Cloud-to-Ground Lightning Measured at a 50-m Distance,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. PP, n° 99, pp. 1-4, 2018.
- [12] R. Louro, “Análise da Formação de Descargas Atmosféricas Baseada na Aplicação do Modelo do Leader Bidirecional,” Belo Horizonte, 2017.
- [13] M. Arcanjo, “Modelo Computacional para Simulação da Formação do Canal de Descargas Atmosféricas: Desenvolvimento e Aplicação para Monitoramento da Evolução das Grandezas Elétricas Envolvidas,” Belo Horizonte, 2018.
- [14] G. L. S. Almeida, “Modelo do leader bidirecional de formação do canal de descargas atmosféricas: nova metodologia de representação do relevo do solo e desenvolvimento de modelo de atratividade de descargas por linhas de transmissão,” 2022.
-

- [15] B. Schonland, "Progressive Lightning IV - The Discharge Mechanism," *A. Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 164, n° 916, pp. 132-150, 1938.
- [16] H. Kasemir, "Static discharge and triggered lightning," em Heinz-Wolfram Kasemir: His collected works, 1 ed., Wash. DC, American Geophysical Union, 2012, pp. 418-428.
- [17] H. W. Kasemir, "*Qualitative ubersicht uber potential-, feld-und ladungsverhaltnisse bei einer blitzentladung in der gewitterwolke (qualitative survey of the potential, field and charge conditions during a lightning discharge in the thunderstorm cloud)*", Das Gewitter, edited by H. Israel, Akadem. Verlagsgesellschaft, pp. 112-126, 1950.
- [18] H. W. Kasemir, "A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge," *Journal of Geophysical Research*, vol. 65, n° 7, pp. 1873-1878, 1960.
- [19] V. MAZUR e L. RUHNKE, "Model of electric charges in thunderstorms and associated lightning," *J. Geophys. Res.*, vol. 103, n° D18, p. 23299–23308, 1998.
- [20] T. Warner, M. Saba, C. Schumann, J. H. Jr. e R. Orville, "*Observations of bidirectional lightning leader initiation and development near positive leader channels,*" *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 121, pp. 9251-9260, 2016.
- [21] O. V. D. Velde e J. Montanya, "Asymmetries in bidirectional leader development of lightning flashes," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 118, pp. 13504-13519, 2013.
- [22] M. Tran e V. Rakov, "Initiation and propagation of cloud-to-ground lightning observed with a high-speed video camera," *Nature, Scientific Reports*, vol. 6, n° 1, pp. 1-11, 2016.
-

- [23] C. BIAGI, D. JORDAN, M. UMAN, J. HILL, W. BEASLEY e J. HOWARD, “Highspeed video observations of rocket-and-wire initiated lightning,” *Geophysical Research Letters*, vol. 36, n° 15, 2009.
- [24] J. D. HILL, M. A. UMAN e D. M. JORDAN, “High-speed video observations of a lightning stepped leader,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 116, n° D16, 2011.
- [25] E. M. BAZELYAN e Y. P. RAIZER, *Lightning physics and lightning protection*, CRC Press, 2000.
- [26] C. BIAGI, M. UMAN, J. HILL e D. JORDAN, “Negative leader step mechanisms observed in altitude triggered lightning,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 119, n° 13, pp. 8160-8168, 2014.
- [27] Q. QI, W. LU, Y. MA, L. CHEN, Y. ZHANG e V. RAKOV, “High-speed video observations of the fine structure of a natural negative stepped leader at close distance,” *Atmospheric Research*, vol. 178, pp. 260-267, 2016.
- [28] M. ARCANJO, M. GUIMARÃES, G. BERTOLIM, P. MATTIOLI e S. VISACRO, “On the interpeak interval of early phase of negative CG lightning currents,” em *XIV SIPDA – International Symposium on Lightning Protection*, Natal, Brasil, 2017.
- [29] V. Rakov e M. Uman, “*Lightning Physics and Effects*,” 2003.
- [30] V. MAZUR, *Principles of Lightning Physics*, IoP Publishing, 2016.
- [31] M. SABA, S. C., T. WARNER, J. HELSDON e R. ORVILLE, “High-speed video and electric field observation of a negative upward leader connecting a downward positive leader in a positive cloud-to-ground flash,” *Electric Power Systems Research*, vol. 118, pp. 89-92, 2015.
- [32] M. UMAN, *Lightning*, Pittsburgh, Pennsylvania: Westinghouse Research Laboratories, 1969.
-

- [33] M. STOLZENBURG e T. MARSHALL, “Electric field and charge structure in lightning-producing clouds. In H.-D. Betz,” em *Lightning: Principles, instruments and applications*, Springer, Dordrecht, 2009, pp. 57-82.
- [34] N. KARUNARATHNA, T. MARSHALL, S. KARUNARATHNE e M. STOLZENBURG, “Initiation locations of lightning flashes relative to radar reflectivity in four small Florida thunderstorms,” *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 122, n° 12, pp. 6565-6591, 2017.
- [35] J. KUETTNER, “The electrical and meteorological conditions inside thunderclouds,” *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 7, n° 5, pp. 322-332, 1950.
- [36] G. Almeida e G. Visacro, “A new approach for modeling the ground in negative cloud-to ground lightning simulation by an electrostatic-by-step representation of leaders,” em *GROUND2020/21 & 9th LPE Conference Proceedings*, Belo Horizonte, 2021.
- [37] V. Cooray, V. Rakov e N. Theethayi, “The lightning striking,” *Journal of Electrostatics*, vol. 65, n° 5-6, pp. 296-306, Maio 2007.
- [38] S. VISACRO, *On the processes leading to different modes of charge transfer in negative flashes according to fast videos and correlated records of current and electric field. Electric Power Systems Research*, v. 213, p. 108702, 2022..
- [39] S. Visacro, G. Almeida, M. Lacerda e F. Silveira, “*Lightning attractivity of transmission lines according to the bipolar leader approach*”. In *Proceedings of the 36th International Conference on Lightning Protection, Cape Town, South Africa*, 2022.
- [40] *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Standard 1243-1997, Dec. 1997.*
-

- [41] S. Visacro, D. C. S. Santos, W. V. O. Cruz e F. H. Silveira, *Lightning attractiveness of transmission lines obtained from the application of a bidirectional leader model. Electric Power System Research. May, 2024 (Submetido).*
- [42] S. Visacro, M. C. M. Lacerda, W. V. O. Cruz e F. H. Silveira, “*The lightning attractivity of transmission lines according to a bipolar leader model, in Proceedings of GROUND2023 & 10th LPE, Brazil, May 2023..*”
- [43] A. Borghetti, C. A. Nucci e M. Paolone, “*Estimation of the Statistical Distributions of Lightning Current Parameters at Ground Level from the Data Recorded by Instrumented Towers,*” *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1400-1409, vol. 19, no. 3, July 2.
- [44] F. H. Silveira e S. Visacro, “*Lightning Parameters of a Tropical Region for Engineering Application: Statistics of 51 Flashes Measured at Morro do Cachimbo and Expressions for Peak Current Distributions,*” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, n° 4, pp. 1186-1191, Agosto 2020.
-