

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS
ELETROGEOMÉTRICO E DOS ELEMENTOS FINITOS NO
PROJETO DE SPDA**

Marcos Vinícius Silva

**Uberlândia
2012**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS
ELETROGEOMÉTRICO E DOS ELEMENTOS FINITOS NO
PROJETO DE SPDA**

Dissertação apresentada por Marcos Vinícius Silva
ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia,
como parte dos requisitos para a obtenção do título
de Mestre em Ciências.

Banca Examinadora:

Décio Bispo, Dr. (Orientador) – UFU

Carlos Antônio França Sartori, Dr. – EP-USP

José Roberto Camacho, PhD – UFU

Sebastião Camargo Guimarães Júnior, Dr. - UFU

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS ELETROGEOMÉTRICO E DOS ELEMENTOS FINITOS NO PROJETO DE SPDA

Marcos Vinícius Silva

Dissertação apresentada por Marcos Vinícius Silva ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. Décio Bispo, Dr.
(Orientador) - UFU

Prof. Alexandre Cardoso, Dr.
Coordenador do Curso de Pós-graduação

DEDICATÓRIA

DEDICO ESTRE TRABALHO AOS MEUS PAIS SÉRGIO E ANA MARIA
PELA OPORTUNIDADE DE ESTUDOS, PELO AMOR, APOIO E MOTIVAÇÃO,
À MINHA IRMÃ MARÍLIA DANIELA E À MINHA QUERIDA NAMORADA
RAFAELA PELO INCENTIVO E COMPANHEIRISMO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, acima de tudo, pelo dom da vida e pelas bênçãos que nela ele tem realizado.

Ao **Prof. Décio Bispo** pelo incentivo, disposição, motivação e orientação durante o curso deste trabalho. A ele agradeço também pela amizade e companheirismo oferecidos durante o enriquecedor período de convivência.

Aos amigos e companheiros de trabalho, em especial **Afonso Bernardino, Alin Martins, Ciciane Chiovatto e Victor de Paula e Silva**, pois, sem suas ajudas e companheirismo, a conclusão deste trabalho teria sido bem mais árdua.

Aos demais colegas e professores de pós-graduação, pelas contribuições fundamentais na conclusão deste trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar avanços e descobertas realizadas na área de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) no que se refere às dúvidas quanto ao Modelo Eletrogeométrico a respeito da verificação do volume de proteção oferecido por um captor. Como método auxiliar de verificação do bom posicionamento de captores, defende-se a utilização do Método dos Elementos Finitos para o cálculo da distribuição de campos elétricos sobre estruturas e a consequente locação de elementos captores.

Sabe-se que as cargas elétricas presentes nas nuvens de tempestade fazem com que um condutor vertical, tal como um mastro metálico, uma haste para-raios ou um condutor horizontal, curto-circuite parte das linhas equipotenciais criadas pelas cargas de tal maneira que uma concentração de campo elétrico relativamente intensa seja produzida sobre os mesmos, caracterizando a proteção oferecida pelas estruturas de captação de descargas atmosféricas.

Com auxílio de um *software* 2D utilizado para realizar a modelagem de uma estrutura qualquer e a simulação através do Método dos Elementos Finitos, é possível visualizar a distribuição de campo elétrico citada, de forma a observar os locais onde sua intensidade é maior ou menor em comparação com o valor de campo elétrico que surge em estruturas vizinhas. Deste modo, é possível determinar as áreas de maior risco de incidência de uma descarga, já que são essas as regiões a partir das quais os líderes ascendentes se formam.

A análise do subsistema de descida de um SPDA complementa o estudo apresentando o comportamento transitório do mesmo quando da passagem de uma corrente elétrica proveniente de uma descarga atmosférica. Tal análise, realizada com o auxílio do software ATP, possibilita a verificação da influência das tensões geradas pela passagem de uma corrente de descarga na distribuição de campos elétricos sobre uma estrutura.

Enfim, a proposta deste trabalho é apresentar uma metodologia de projeto de captores SPDA que venha complementar os métodos normatizados de forma a considerar informações relevantes sobre a natureza característica do fenômeno das descargas atmosféricas.

Palavras-chave: Modelo Eletrogeométrico; SPDA; Elementos Finitos; Descargas atmosféricas

ABSTRACT

This thesis aims to present some progress and discoveries made in the Lightning Protection Systems area (LPS) regarding some doubts about the Electrogeometric Model for obtaining protection zones against lightning. As an auxiliary method to verify the proper placement of captors on structures, it is suggested the use of the Finite Element Method for the computation of electric fields distribution in order to guide the correct placement of captors.

It is known that the electrical charges in thunderstorm clouds create a situation in which a vertical conductor, as a lightning rod, or a horizontal conductor short-circuits some of the equipotential lines created by those charges so that a relatively intense concentration of electric field is produced on them, featuring the protection offered by lightning protection systems.

With the aid of specific software used to perform the structure modeling and the simulation using the Finite Element Method, it is possible to view the distribution of electric field on the structure in order to observe points where its intensity is higher or lower compared with the value of the electric field in adjacent structures. Thus, it is possible to determine the areas of greatest risk of lightning incidence, since these are the regions from which upward leaders are formed.

The analysis of a Lightning Protection System's down-conductor subsystem complements the study presenting its transient behavior due to the lightning current flow through it. That analysis, performed using the software ATP, allows the verification of the voltage influence, due to the lightning current flow, on the electric field distribution above the structure.

Finally, the purpose of this thesis is to present a methodology to complement the Electrogeometric Model in order to take in consideration relevant information about the characteristics nature of lightning.

Keywords: Electrogeometric Model; LPS; Finite Elements; Lightning

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mapa de curvas isocerânicas no Brasil (<i>Fonte: NBR 5419:2005</i>).....	29
Figura 2.2 - Delimitação da área de exposição equivalente (<i>Fonte: NBR 5419:2005</i>).....	30
Figura 2.3 - Interface inicial do guia (<i>Fonte: Autor, Software Excel</i>).....	36
Figura 2.4 - Opções apresentadas para Fator E (<i>Fonte: Autor, Software Excel</i>).....	37
Figura 2.5 - Mapa de curvas isoceráunicas – Região Sudeste (<i>Fonte: NBR 5419:2005</i>).....	38
Figura 2.6 - Exemplo final de avaliação de risco de exposição (<i>Fonte: Autor, Software Excel</i>)	39
Figura 3.1 - Distância de atração (<i>Fonte: NBR 5419:2005</i>).....	43
Figura 3.2 - Aplicação do Método da Esfera Rolante sobre estruturas (<i>Fonte: Vernon Cooray, 2010</i>)	45
Figura 3.3 – Lugar geométrico dos centros das esferas fictícias (<i>Fonte: Moacir Lacerda, 1989</i>)	46
Figura 3.4 - Método da Esfera Rolante ($R > h$) (<i>Fonte: NBR 5419:2005</i>).....	48
Figura 3.5 - Método da Esfera Rolante ($R < h$) (<i>Fonte: NBR 5419:2005</i>).....	49
Figura 3.6 – Aproximação da descarga pela esquerda da parábola segundo o Modelo Eletrogeométrico (<i>Fonte: Moacir Lacerda, 1989</i>)	50
Figura 3.7 – Aproximação da descarga pela direita da parábola segundo o Modelo Eletrogeométrico (<i>Fonte: Moacir Lacerda, 1989</i>)	50
Figura 3.8 – Aproximação da descarga pela esquerda da parábola (<i>Fonte: Moacir Lacerda, 1989</i>)	51
Figura 3.9 – Aproximação da descarga pela direita da parábola (<i>Fonte: Moacir Lacerda, 1989</i>)	51
Figura 3.10 – Linhas de campo elétrico (<i>Fonte: Moacir Lacerda, 1989</i>)	52
Figura 3.11 – Parábolas em função de α e β (<i>Fonte: Moacir Lacerda, 1989</i>)	54
Figura 3.12 - Distorção de campo elétrico pela presença de uma haste no volume de proteção (<i>Fonte: Moacir Lacerda, 1989</i>)	55
Figura 3.13 – Líderes ascendente e descendente (<i>Fonte: Sonia Ait-Amar e Gérard Berger, 2009</i>)	57
Figura 3.14 - A esfera rolante considerando a formação do líder ascendente (<i>Fonte: Sonia Ait-Amar e Gérard Berger, 2009</i>)	57

Figura 3.15 - Casos de falha na interceptação de um raio (<i>Fonte: Pantelis N. Mikropoulos e Thomas E. Tsovilis, 2010</i>)	59
Figura 3.16 - Descarga interceptada pela haste de proteção (<i>Fonte: Pantelis N. Mikropoulos e Thomas E. Tsovilis, 2010</i>)	59
Figura 4.1 - Nuvem de tempestade com representação simplificada de como as cargas elétricas se distribuem em seu interior (<i>Fonte: Vladimir A. Rakov e Martin A. Uman, 2003</i>)	63
Figura 4.2 - Estrutura tripolar simplificada (<i>Fonte: Vladimir A. Rakov e Martin A. Uman, 2003</i>)	64
Figura 4.3 - Transferência de cargas através de colisões (<i>Fonte: Vladimir A. Rakov e Martin A. Uman, 2003</i>).....	65
Figura 4.4 - Classificação das descargas atmosféricas quanto à sua origem (<i>Fonte: Martin A. Uman, 1994</i>)	68
Figura 4.5 - Linhas equipotenciais curto-circuitadas (<i>Fonte: Galeno L. Gomes</i>)	70
Figura 4.6 - Malha de triângulos executada no FEMM (<i>Fonte: Software FEMM</i>).....	75
Figura 4.7 - Linhas equipotenciais sobre uma estrutura com captor central devido à influência de um campo elétrico gerado pela aproximação de um líder descendente (<i>Fonte: Software FEMM</i>)	77
Figura 4.8 - Valores de campo elétrico retirados da simulação no FEMM e medidos ao longo do comprimento da estrutura. (<i>Fonte: Software FEMM</i>)	78
Figura 5.1 - Janela de parâmetros da fonte de surto (<i>Fonte: Software ATP</i>)	88
Figura 5.2 - Forma de onda de uma descarga atmosférica 1,2/50 μ s (<i>Fonte: Software ATP</i>) .	89
Figura 5.3 - Janela de propriedades da linha (<i>Fonte: Software ATP</i>).....	90
Figura 5.4 - A linha representada no ATPDraw (<i>Fonte: Software ATP</i>)	90
Figura 5.5 - Divisão dos condutores de descida (<i>Fonte: Autor</i>).	92
Figura 5.6 - Valores de Tensão e carga para o módulo superior (<i>Fonte: Software FEMM</i>)....	93
Figura 5.7 - Modelo de circuito PI para os condutores e hastes de aterramento (<i>Fonte: Autor, Software ATP</i>).....	95
Figura 5.8 - Valores do circuito PI para os condutores e hastes de aterramento (<i>Fonte: Autor, Software ATP</i>).....	96
Figura 5.9 - Circuito representante dos três subsistemas de um SPDA (<i>Fonte: Autor, Software ATP</i>).....	97

Figura 5.10 - Tensões resultantes da passagem de uma descarga pelo SPDA (<i>Fonte: Software ATP</i>).....	99
Figura 5.11 - Distribuição de campo elétrico (em cores) e linhas equipotenciais sobre a estrutura (<i>Fonte: Software FEMM</i>)	100
Figura 5.12 - Valores de campo elétrico sobre a estrutura com tensão de 38,17 MV aplicada ao captor (<i>Fonte: Software FEMM</i>)	100
Figura 6.1 - Localização do bloco 5O no campus Santa Mônica (<i>Fonte:</i> <i>http://www.portal.prefeitura.ufu.br, nov. 2011</i>).....	104
Figura 6.2 - Largura e comprimento do bloco 5O	105
Figura 6.3 - Corte do bloco 5O e sua altura.....	106
Figura 6.4 - Avaliação do risco de exposição do bloco 5O	106
Figura 6.5 - SPDA instalado sobre o bloco 5O	108
Figura 6.6 - Aplicação do Método da Esfera Rolante sobre o bloco5O	108
Figura 6.7 - Verificação das áreas desprotegidas – corte longitudinal.....	109
Figura 6.8 - Verificação das áreas desprotegidas – corte transversal lado direito.....	109
Figura 6.9 - Verificação das áreas desprotegidas – corte transversal lado esquerdo	109
Figura 6.10 - Possibilidade de se importar arquivos de desenho no FEMM (<i>Fonte: Software FEMM</i>)	111
Figura 6.11 - Bloco 5O no FEMM e definição de materiais (<i>Fonte: Software FEMM</i>).....	112
Figura 6.12 - Aproximação do líder descendente e pontos analisados (<i>Fonte: Software FEMM</i>)	113
Figura 6.13 - Distribuição de campo elétrico: Situação C (<i>Fonte: Software FEMM</i>).....	113
Figura 6.14 - Gráfico de campo elétrico x comprimento: Situação C (<i>Fonte: Software FEMM</i>)	114
Figura 6.15 - Campos elétricos sem SPDA (<i>Fonte: Software FEMM</i>)	116
Figura 6.16 - Simulação sem a presença da haste e dos condutores 5 e 9 (<i>Fonte: Software FEMM</i>)	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores típicos de riscos toleráveis	31
Tabela 2.2 – Fator A: Tipo de ocupação da estrutura.....	32
Tabela 2.3 – Fator B: Tipo de construção da estrutura.....	32
Tabela 2.4 - Fator C: Conteúdo da estrutura ou efeitos indiretos das descargas atmosféricas.	32
Tabela 2.5 - Fator D: Localização da estrutura	33
Tabela 2.6 - Fator E: Topografia da região	33
Tabela 2.7 - Eficiência Global teórica esperada para cada nível de proteção	35
Tabela 3.1 - Níveis de proteção	44
Tabela 4.1 - Altitude e magnitude dos centros de cargas elétricas em nuvens de tempestade.	66
Tabela 4.2 – Permissividade relativa dos materiais utilizados na simulação	77
Tabela 4.3 - Intensidade do campo elétrico em 3 pontos distintos da estrutura.....	78
Tabela 5.1 - Espaçamento médio entre captadores de descida não naturais conforme nível de proteção.....	82
Tabela 5.2 - Seções mínimas dos materiais do SPDA.....	83
Tabela 5.3 - Constantes para diferentes formas de onda	87
Tabela 5.4 - Valores de capacitors para os circuitos que compõem as descidas	94
Tabela 5.5 - Valores de indutância para os circuitos que compõem as descidas	94
Tabela 6.1 - Fatores de ponderação para o bloco 5O	105
Tabela 6.2 - Valores de permissividade utilizados na simulação	112
Tabela 6.3 - Resultado das simulações para situações A, B, e C	115

LISTA DE VARIÁVEIS

R	Raio da esfera fictícia [m]
N	Valor médio anual de eventos de risco relacionados às descargas atmosféricas
P	Probabilidade de uma estrutura ser atingida por um raio em um ano
N_g	Densidade de descargas atmosféricas para a terra [<i>por km²/ano</i>]
A_e	Área de exposição equivalente da estrutura [m^2]
T_d	Número de dias de trovoadas [por ano]
N_d	Frequência média previsível de descargas atmosféricas sobre uma estrutura [por ano]
N_c	Frequência média admissível de danos [por ano]
N_{dc}	Valor de N_d após aplicação dos fatores de ponderação [por ano]
A	Fator de ponderação: Tipo de ocupação da estrutura
B	Fator de ponderação: Tipo de construção da estrutura
C	Fator de ponderação: Conteúdo da estrutura ou efeitos indiretos das descargas atmosféricas
D	Fator de ponderação: Localização da estrutura
E	Fator de ponderação: Topografia da região
d	Distância de atração [m]
I	Corrente de pico [A]
k	Constante [adimensional]
p	Constante [adimensional]
h	Altura de uma haste para-raios com relação ao solo [m]
x_{prot}	Distância máxima, a partir do eixo da haste para-raios, do volume de proteção
α	Densidade linear de cargas [C/m]
β	Densidade superficial de carga [C/ m^2]
ε	Permissividade do meio [F/m]
E_x	Componente de campo elétrico no eixo das abscissas [V/m]
E_y	Componente de campo elétrico no eixo das coordenadas [V/m]
C	Constante
L_{up}	Raio do cone formado pelo lugar geométrico do líder ascendente [m]
H_{up}	Altura do cone formado pelo lugar geométrico do líder ascendente [m]

TR	Temperatura de inversão [°C]
E_A	Campo elétrico ambiente sobre uma superfície [V/m]
E_C	Campo elétrico na ponta de uma haste [V/m]
K_i	Fator de intensificação de campo [adimensional]
r	Raio da extremidade de uma haste
D	Fluxo elétrico
E	Campo elétrico
ρ	Densidade de cargas
V	Potencial elétrico [V]
t_{cr}	Tempo de crista [s]
t_{cd}	Tempo de cauda [s]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	18
1.2 OBJETIVO	20
1.3 ESTADO DA ARTE.....	20
1.4 CONTRIBUIÇÃO DESTA DISSERTAÇÃO	22
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
2 ANÁLISE DE RISCO E NECESSIDADE DE PROTEÇÃO	26
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	27
2.2 AVALIAÇÃO DA NECESSIDADE DE UM SPDA	28
2.2.1 Risco de exposição.....	28
2.2.2 Área de exposição equivalente	29
2.2.3 Frequência admissível de danos.....	31
2.2.4 Fatores de ponderação de.....	31
2.2.5 Níveis de proteção	34
2.3 IMPLEMENTAÇÃO DO GUIA DE CÁLCULO.....	35
2.4 CONCLUSÕES PARCIAIS.....	40
3 O MODELO ELETROGEOMÉTRICO E SUAS LIMITAÇÕES	41
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	42
3.2 O MODELO ELETROGEOMÉTRICO	43
3.3 O MÉTODO DA ESFERA ROLANTE.....	45
3.4 LIMITAÇÕES DO MODELO ELETROGEOMÉTRICO	49
3.4.1 Distorção do campo elétrico	49
3.4.2 O líder ascendente.....	55
3.5 CONCLUSÕES PARCIAIS.....	60
4 A FORMAÇÃO DE CARGAS NAS NUVENS E O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	61
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	62
4.2 TEORIA DA PRECIPITAÇÃO.....	64

4.3	TIPOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	67
4.3.1	Descarga Negativa Nuvem-Terra (Tipo 1) [9]	68
4.3.2	Descarga Positiva Nuvem-Terra (Tipo 3) [9]	69
4.3.3	Descarga Ascendente (Tipos 2 e 4) [9].....	69
4.4	O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	69
4.4.1	Condições para o surgimento do efeito corona e de líderes ascendentes	71
4.4.2	O software FEMM	73
4.4.3	A utilização do FEMM no projeto de SPDA	75
4.5	CONCLUSÕES PARCIAIS.....	79
5	ANÁLISE TRANSITÓRIA DO SUBSISTEMA DE DESCIDA DE UM SPDA	
	80	
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	81
5.2	SUBSISTEMA DE DESCIDA.....	82
5.3	O ESTUDO COMPUTACIONAL DAS DESCIDAS SUBMETIDAS A UMA CORRENTE DE DESCARGA ATMOSFÉRICA	84
5.4	O SPDA	85
5.4.1	A representação da descarga atmosférica	85
5.4.2	A representação dos condutores de descida.....	89
5.4.2.1	Definição das capacitâncias dos condutores.....	91
5.4.2.2	Definição das indutâncias dos condutores.....	94
5.4.2.3	Definição da malha de aterramento	95
5.5	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	97
5.5.1	Considerações	97
5.5.2	ATP	98
5.6	CONCLUSÕES PARCIAIS.....	101
6	ESTUDO DE CASO	102
6.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	103
6.2	VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE INSTALAÇÃO DO SPDA	103
6.3	APLICAÇÃO DO MODELO ELETROGEOMÉTRICO	107
6.4	APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	110
6.5	ANÁLISE DE OUTRAS POSSIBILIDADES	115
6.6	CONCLUSÕES PARCIAIS.....	118

7 CONCLUSÃO.....	119
7.1 CONCLUSÕES GERAIS.....	120
7.2 TRABALHOS FUTUROS	122
BIBLIOGRAFIA	124
ANEXOS.....	128
ANEXO A	129
ANEXO B.....	138



Capítulo 1

Introdução



1.1 Considerações iniciais

As descargas atmosféricas são fenômenos naturais que sempre causaram impacto aos seres humanos, principalmente pelo fato de sua aparência e som que impressionam, assim como pelas ameaças que representam à vida e às estruturas. Como consequência, pesquisadores trabalham continuamente para desenvolver ferramentas e procedimentos que preveem e alertam sobre a ocorrência de descargas atmosféricas. Durante as pesquisas realizadas no passado, muito se conheceu sobre esse fenômeno e técnicas eficientes de detecção foram criadas. Hoje, diversas instituições ao redor do mundo tentam reunir as diversas questões que têm permanecido duvidosas. Entretanto, assim como acontece com a pesquisa de objetos das ciências naturais, a complexidade do fenômeno das descargas atmosféricas é consideravelmente grande [1].

Cientistas acreditam que as descargas atmosféricas estejam presentes na Terra desde muito tempo antes mesmo do surgimento da vida no planeta e que é possível que tais descargas tenham inclusive desempenhado papel fundamental na criação das primeiras moléculas orgânicas necessárias à formação de qualquer forma de vida.

Na antiguidade, o raio era sempre associado à ação de deuses e divindades. Há, inclusive, relatos de que símbolos de descargas atmosféricas foram usados em desenhos produzidos por gregos 700 a.C. e que o fenômeno era atribuído a Zeus, seu deus supremo [2]. Entretanto, apenas após a descoberta da eletricidade, no século XVIII, foi que a natureza elétrica da atmosfera da Terra começou a ser desvendada.

Em 1708, William Wall, ao ver uma faísca sair de um pedaço de âmbar carregado eletricamente, observou que ela era parecida com um relâmpago. Já na metade do século, após a descoberta das primeiras propriedades elétricas da matéria, tornou-se evidente que os relâmpagos deveriam ser uma forma de eletricidade associados de alguma maneira com as tempestades. Benjamin Franklin foi o primeiro a projetar um experimento para tentar provar a natureza elétrica do relâmpago. Em julho de 1750, Franklin propôs que a eletricidade poderia ser drenada de uma nuvem por um mastro metálico. Se o mastro fosse isolado do solo e um observador aproximasse um fio aterrado, uma faísca saltaria do mastro para o fio quando uma nuvem eletrificada estivesse perto. Se isto ocorresse, estaria provado que as nuvens são



eleticamente carregadas e, consequentemente, que os relâmpagos também são um fenômeno elétrico. Em maio de 1752, Thomas-François D'Alibard demonstrou que a sugestão de Franklin estava certa e, em junho de 1752, Franklin realizou outro experimento com o mesmo propósito: seu famoso experimento com uma pipa. Ao invés de utilizar um mastro metálico, ele usou uma pipa, já que ela poderia alcançar maiores altitudes e poderia ser usada em qualquer lugar. Novamente, faíscas saltaram de uma chave colocada na extremidade do fio preso a pipa em direção a sua mão [3] [4] [5], fazendo com que as descargas atmosféricas passassem a ser consideradas, desde então, um fenômeno de natureza elétrica.

Desde a descoberta da proteção oferecida por um mastro metálico, realizada por Franklin, vários experimentos mostraram que a proteção oferecida pelos sistemas tradicionais de proteção é bastante efetiva na proteção contra a incidência direta de descargas atmosféricas. A evolução dos sistemas de proteção foi, ao longo dos anos, realizada através de tentativas e erros, onde falhas dos sistemas de proteção foram observadas com o objetivo de melhorar o posicionamento de captores. Com isso, o conhecimento a respeito do fenômeno das descargas atmosféricas tem aumentado assim como a necessidade de se proteger de seus efeitos diretos e indiretos [6].

Um SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas) é instalado sobre uma estrutura com o objetivo de interceptar uma descarga atmosférica direta, conduzi-la à terra e dispersá-la no solo sendo, portanto, constituído de três subsistemas básicos: o subsistema captor, o subsistema de descida e o subsistema de aterramento.

Assim, sabendo-se que um raio que afeta uma estrutura pode causar grandes danos à estrutura, seus ocupantes e seu conteúdo material, além de causar falha dos sistemas elétricos e eletrônicos, a necessidade de proteção contra as descargas atmosféricas têm se tornado cada vez mais necessária. Portanto, quando existe a necessidade e/ou vontade de se evitar a incidência de raios sobre uma estrutura, a instalação de um sistema de proteção deve ser criteriosamente estudada e implantada.



1.2 Objetivo

O objetivo desta dissertação consiste em apresentar a utilização do Método dos Elementos Finitos como uma ferramenta que auxilia no projeto de um SPDA e o estudo do posicionamento de captores sobre uma estrutura. Para isso, é apresentada a aplicação do método através do *software* FEMM, que o utiliza para o cálculo e a verificação da distribuição de campos elétricos e potenciais sobre a estrutura modelada.

Com a utilização do *software* para realização da análise eletrostática que envolve a situação anterior à ocorrência de uma descarga atmosférica, pode-se verificar a distribuição de campos elétricos sobre a estrutura em determinadas condições. Assim, como mostrado nos próximos capítulos, os locais onde os campos elétricos são relativamente elevados representam pontos de maior probabilidade de serem atingidos por uma descarga atmosférica.

Dessa forma, sugere-se a utilização do Método dos Elementos Finitos em complemento com os métodos atualmente normatizados devido às deficiências apresentadas por tais métodos ao apresentarem soluções puramente geométricas na obtenção de um volume de proteção.

1.3 Estado da arte

Assim como geralmente acontece em trabalhos de pesquisa, o desenvolvimento deste teve início através de um levantamento bibliográfico que possibilitou a fundamentação dos conceitos e teorias aqui apresentadas. Esse levantamento bibliográfico levou à reunião de informações teóricas já bastante difundidas assim como de outras atuais que dizem respeito às recentes pesquisas em curso nas áreas de descargas atmosféricas e de proteção contra seus efeitos diretos. Dentre as referências pesquisadas, aquelas que mais contribuíram com o conteúdo deste trabalho são comentadas a seguir.

A utilização da norma **NBR 5419:2005**, atualmente em vigor no Brasil e intitulada **Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas** apresenta as condições de projeto,

instalação e manutenção de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas para proteger desde estruturas comuns, como estruturas para fins comerciais ou industriais, à estruturas especiais, como chaminés de grande porte e tanques contendo líquidos ou gases inflamáveis. Além dessa, a norma internacional **IEC 62305**, que representa uma reestruturação e atualização da série **IEC 61024**, foi consultada já que seu conteúdo foi referência na criação da norma brasileira.

A referência [9] trata da aplicação do Método dos Elementos Finitos na análise de proteção de estruturas contra descargas atmosféricas através de um estudo sobre o comportamento eletrostático da descarga interagindo com o para-raios e a estrutura a ser protegida.

Em [13], encontra-se um conteúdo prático apresentado de forma lógica, clara e objetiva sobre os métodos de proteção contra descargas atmosféricas em edificações. São apresentados conhecimentos práticos, teóricos e estatísticos com o objetivo de instrução para o projeto e a execução de instalações com a melhor proteção e segurança possíveis.

Em 1989, a revista Eletricidade Moderna apresentou em sua edição do mês de julho um artigo, indicado na referência [14], que representa uma revisão do trabalho apresentado, no ano anterior, no I Seminário Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas. Intitulado “Dúvidas e limitações do Modelo Eletrogeométrico”, o artigo trata das dúvidas e questionamentos que giram em torno do fato de o modelo desconsiderar as distorções do campo elétrico.

A referência [16] apresenta estudos realizados a respeito da influência do líder ascendente no volume de proteção oferecido por captores e propõe um modelo baseado no fenômeno físico da formação do líder ascendente em direção ao líder descendente.

A pesquisa sobre a formação de cargas nas nuvens foi auxiliada pelo conteúdo da referência [2]. Nela, fica clara a ausência de um consenso entre as diversas teorias que tentam explicar o fenômeno. É mostrado que a dificuldade em determinar como nuvens de tempestade se tornam eletricamente carregadas se encontra no fato de elas serem grandes, complexas e durarem um curto período de tempo para serem examinadas e estudadas por inteiro e em detalhes. Apesar disso, a Teoria da Precipitação é apresentada como a teoria atualmente mais aceita.



O tema principal abordado na utilização do Método dos Elementos Finitos é discutido na referência [21]. É mostrada a importância da distribuição espacial de campo elétrico sobre pontos de uma estrutura e sua influência para que uma descarga atmosférica incida sobre eles. Além disso, são apresentadas as condições necessárias para a ocorrência do efeito corona e o surgimento de líderes ascendentes.

As referências [30] e [40] apresentam os princípios básicos relativos à propagação de ondas em condutores introduzindo noções do comportamento transitório de circuitos elétricos.

Em [33] é mostrada a maneira de como se representar formas de onda de correntes de descargas atmosféricas de uma forma analítica através do modelo da exponencial dupla. É apresentada a relação entre os principais parâmetros que determinam a forma de onda assim como exemplos numéricos derivados da aplicação do método proposto.

1.4 Contribuição desta Dissertação

A principal contribuição deste trabalho é apresentar um método que pode auxiliar na melhoria de projetos de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas através da utilização da técnica de Elementos Finitos aplicada via *software*. Assim, o projeto de posicionamento de captores sobre estruturas se torna mais confiável uma vez que se consideram fenômenos físicos que envolvem uma descarga atmosférica como, por exemplo, a diferença de potencial elétrico entre a nuvem e a terra e a distribuição de campo elétrico sobre a estrutura.

A aplicação do Método dos Elementos Finitos leva à verificação de que o Modelo Eletrogeométrico apresenta um volume de proteção superior àquele necessário para a proteção da estrutura. Dessa forma, a aplicação do método descrito neste trabalho pode resultar em economia na instalação de um SPDA sobre uma estrutura.

Por fim, o trabalho se destaca por agrupar em um único documento, temas que atualmente se encontram espalhados pela literatura que trata do assunto. Como se pode perceber, este trabalho aborda desde a verificação da necessidade de instalação de um SPDA até a proposta de um método complementar ao Modelo Eletrogeométrico, passando pelas



críticas que existem atualmente com relação ao fato de o modelo mais utilizado desconsiderar fatores importantes que envolvem a ocorrência de uma descarga atmosférica; pela teoria de formação de cargas elétricas em nuvens de tempestade e as condições necessárias para a formação do líder ascendente e pela influência do comportamento transitório decorrente da passagem de uma corrente pelo subsistema de descida na distribuição de campo elétrico sobre captores e estrutura.

1.5 Estrutura da Dissertação

Para alcançar os objetivos propostos, este trabalho apresenta, além do presente capítulo, os demais capítulos estruturados da seguinte maneira:

Capítulo 2 – Análise de risco e necessidade de proteção

Neste capítulo é apresentado primeiramente um guia para a verificação da necessidade de utilização de um SPDA que se baseia no procedimento apresentado no Anexo B da norma brasileira atualmente em vigor: a NBR 5419:2005 – Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Esse guia, realizado com o auxílio do *software Excel*, possibilita a verificação simples e prática da necessidade de se instalar um SPDA sobre uma estrutura em função de sua localização, a forma de utilização e ocupação, além de sua geometria.

Capítulo 3 – O Modelo Eletrogeométrico e suas limitações

Nesta etapa, são apresentadas limitações do Modelo Eletrogeométrico que justificam o estudo e a proposta de um novo método para a verificação do correto posicionamento de captores sobre uma estrutura. A princípio, o método é apresentado e, por ser considerado um método puramente geométrico ao desconsiderar fatores físicos pertinentes ao processo de ocorrência de uma descarga atmosférica, tais limitações são apresentadas através de estudos já realizados nesse sentido.



Capítulo 4 – A formação de cargas nas nuvens e o Método dos Elementos Finitos

Aqui, a teoria mais aceita a respeito de como se formam as cargas nas nuvens é apresentada apesar da ausência de consenso sobre este tema. A estrutura elétrica da nuvem é importante na aplicação do Método dos Elementos Finitos pelo fato de a análise levar em consideração os prováveis potenciais de uma nuvem de tempestade e os campos elétricos verificados no nível do solo.

Por fim, é apresentado o FEMM com suas ferramentas básicas que possibilitam a simulação de uma situação através dos Elementos Finitos e um exemplo simplificado no qual o *software* é utilizado na verificação da distribuição de campo elétrico sobre uma estrutura fictícia.

Capítulo 5 – Análise transitória do subsistema de descida de um SPDA

O Capítulo 5 tem como objeto de estudo o subsistema de descida de um SPDA em função do comportamento transitório poder interferir na distribuição de campo elétrico sobre a estrutura e o subsistema captor. Para isso, utiliza-se o *software* ATP para realizar a análise transitória da passagem da corrente de uma descarga atmosférica e dos potenciais elétricos que surgem ao longo dos condutores com o objetivo de verificar a influência desses potenciais na distribuição de campo elétrico.

Capítulo 6 – Estudo de caso

Neste capítulo, é apresentada uma aplicação prática do Modelo Eletrogeométrico através do Método da Esfera Rolante e a comparação de seu resultado com o resultado da aplicação do Método dos Elementos Finitos. Para isso, é utilizado como objeto de estudo a estrutura do bloco 5O da Universidade Federal de Uberlândia e o SPDA instalado sobre o mesmo. Além disso, apresenta-se como o posicionamento dos elementos captores pode influenciar a distribuição de campos elétricos.



Capítulo 7 - Conclusão

Por fim, este capítulo tem como objetivo apresentar as discussões e as conclusões finais de cada um dos capítulos anteriores que formam essa dissertação. Além disso, serão ressaltadas as principais contribuições deste trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.



Capítulo 2

Análise de risco e necessidade de proteção



2.1 Considerações iniciais

Para uma estrutura, uma proteção ideal contra descargas atmosféricas seria cobrir por completo o objeto a ser protegido utilizando-se de um material de espessura adequada, contínuo, que fosse perfeito condutor elétrico e que estivesse aterrado. No ponto de entrada desta proteção, todos os sistemas que passam para o interior deveriam estar isolados eletricamente de forma adequada. Uma proteção como essa evitaria a penetração de correntes de descargas atmosféricas que pudessem atingir o objeto protegido, prevenindo contra efeitos térmicos e eletrodinâmicos de risco, assim como sobretensões nos sistemas internos à proteção [7].

Na prática, não seria nem possível que se protegesse todas as estruturas dessa maneira e nem economicamente viável que se adotasse essa solução para tal proteção ideal. Na verdade, o que ocorre na prática são configurações específicas de captores que resultarão em diferentes níveis de eficiência da proteção, estabelecidos conforme o tipo de estrutura a ser protegida.

Algumas estruturas especiais com riscos inerentes de explosão, tais como postos de combustível, fábricas de fogos de artifício ou de munição, necessitam geralmente o mais alto nível de proteção contra descargas atmosféricas. Para esse tipo de estrutura, o volume de proteção dos captadores, quando determinado pelo Modelo Eletrogeométrico, adota como raio da esfera fictícia um comprimento R de 20 metros, o que corresponde à utilização do nível mais elevado de proteção. Para os demais casos, a necessidade de implantação de um sistema SPDA deve ser analisada, sendo que tal necessidade é evidente em casos específicos como locais com grande afluência de público, hospitais e estruturas de valor histórico ou cultural[8].

Neste capítulo, será apresentada a análise de risco e a avaliação da necessidade de implantação de um sistema SPDA como recomenda a norma brasileira NBR 5419:2005. Além disso, será apresentada a implementação de um guia de fácil utilização que auxilia no processo de avaliação da necessidade do uso de um SPDA sobre uma estrutura.

2.2 Avaliação da necessidade de um SPDA

2.2.1 Risco de exposição

O valor médio anual N de eventos considerados perigosos relacionados a descargas atmosféricas e que, de certa forma influenciam uma estrutura a ser protegida, depende do nível da atividade de relâmpagos da região onde o objeto está localizado, das características físicas da estrutura e dos objetos ao seu redor. Para calcular este a probabilidade P de uma estrutura ser atingida por um raio em um ano é o produto da densidade de descargas atmosféricas para a terra N_g pela área de exposição equivalente do objeto [7], conforme mostra a Equação (2.1).

$$P = N_g \times A_e \quad (2.1)$$

A densidade de descargas atmosféricas para a terra, N_g , é o número de raios para a terra por quilômetro quadrado por ano. O valor de N_g para uma dada região é definido pela Equação (2.2).

$$N_g = 0,04 \times T_d^{1,25} \quad (2.2)$$

O índice ceráunico é considerado um bom indicador da atividade elétrica atmosférica. Os valores de T_d são obtidos através de mapas isocerânicos, aeroportos da região, empresas concessionárias de energia, entre outros. Os mapas isocerânicos possuem grande importância para a aplicação do método de avaliação de necessidade do uso de um SPDA. A Figura apresenta o mapa isoceráunico do Brasil.



Figura 2.1 - Mapa de curvas isocerânicas no Brasil (Fonte: NBR 5419:2005)

2.2.2 Área de exposição equivalente

Outro parâmetro utilizado na avaliação da necessidade de um SPDA é a área equivalente A_e de exposição da estrutura. A área de exposição equivalente é calculada em metros quadrados e representa a área do plano da estrutura prolongada em todas as direções, de modo a levar em conta sua altura. Este parâmetro pode ser considerado como sendo a área de possível ocorrência de uma descarga. Para uma estrutura retangular simples de

comprimento L, largura W e altura H, a área de exposição equivalente tem um comprimento L+2H e uma largura W+2H de forma que os cantos são arredondados com segmentos de círculo de raio H. A Figura 2.2 apresenta uma estrutura com dimensões L, W e H e a representação de sua área equivalente:

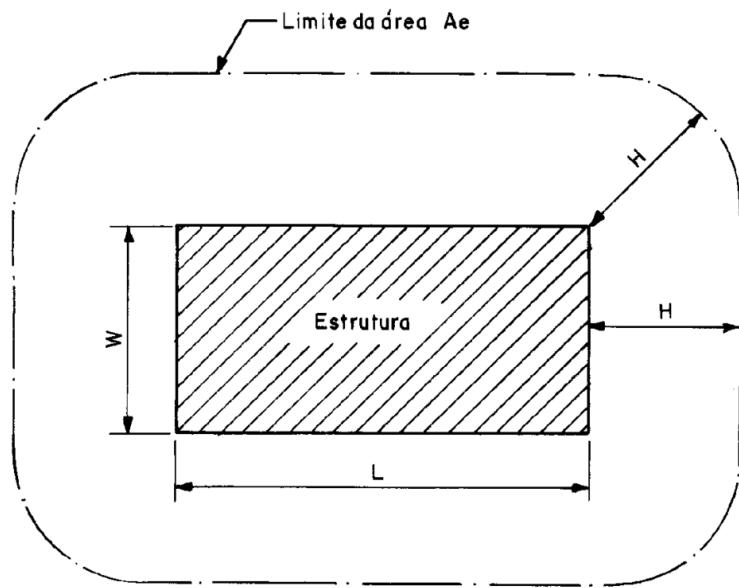


Figura 2.2 - Delimitação da área de exposição equivalente (Fonte: NBR 5419:2005)

No exemplo mostrado na Figura 2.2, a A_e pode ser calculada de acordo com a Equação (2.3).

$$A_e = LW + 2LH + 2WH + \pi H^2 \quad (2.3)$$

Assim, a frequência média anual previsível N_d de descargas atmosféricas sobre uma estrutura é dada por:

$$N_d = N_g \times A_e \times 10^{-6} \quad (2.4)$$

2.2.3 Frequência admissível de danos

Riscos de morte e ferimentos permanentes devido a acidentes é uma condição natural da vida. Tomando a variável N_c como a frequência média anual admissível de danos, são utilizados os seguintes limites reconhecidos internacionalmente:

- Riscos maiores que 10^{-3} (isto é, 1 em 1.000) por ano são considerados inaceitáveis;
- Riscos menores que 10^{-5} (isto é, 1 em 100.000) por ano são, em geral, considerados aceitáveis.

O valor 10^{-5} foi adotado como valor de referência para o risco desprezível, ou seja, a probabilidade sendo menor que esse número, é equivalente ao risco que as pessoas tem de morrer pelo simples fato de estarem vivas [9].

A norma internacional IEC 62305-2 apresenta valores representativos de riscos anuais toleráveis em situações nas quais descargas atmosféricas envolvem morte de pessoas ou perda de objetos de valor cultural e social. Estes valores estão mostrados na Tabela .

Tabela 2.1 - Valores típicos de riscos toleráveis

Tipo de perda	Risco anual admissível
Vida humana ou ferimentos permanentes	10^{-5}
Serviços públicos	10^{-3}
Bens culturais	10^{-3}

2.2.4 Fatores de ponderação

Os fatores de ponderação A, B, C, D e E apresentados a seguir e que são multiplicados por N_d representam, em um total de cinco, fatores que correspondem s situações que podem influir no risco de uma estrutura ser atingida por uma descarga atmosférica. Os valores dos



fatores de ponderação, assim como as situações nas quais eles devem ser aplicados estão mostrados nas Tabela 2.2 a Tabela 2.62.6 [8].

Tabela 2.2 – Fator A: Tipo de ocupação da estrutura

Tipo de ocupação da estrutura	Fator A
Casas e outras estruturas de porte equivalente	0,3
Casas e outras estruturas de porte equivalente com antena externa	0,7
Fábricas, oficinas e laboratórios	1
Edifícios de escritórios, hotéis e apartamentos, e outros edifícios residenciais não incluídos abaixo	1,2
Locais de afluência de público (por exemplo: igrejas, pavilhões, teatros, museus, estações e aeroportos, estádios de esportes)	1,3
Escolas, hospitais, creches e outras instituições, estruturas de múltiplas atividades	1,7

Tabela 2.3 – Fator B: Tipo de construção da estrutura

Tipo de construção da estrutura	Fator B
Estrutura de aço revestida, com cobertura metálica	0,2
Estrutura de concreto armado, com cobertura não-metálica	0,4
Estrutura de aço revestida, ou de concreto armado, com cobertura metálica	0,8
Estrutura de alvenaria ou concreto simples, com qualquer cobertura, exceto metálica ou de palha	1
Estrutura de madeira, ou revestida de madeira, com qualquer cobertura, exceto metálica ou de palha	1,4
Estrutura de madeira, alvenaria ou concreto simples, com cobertura metálica	1,7
Qualquer estrutura com teto de palha	2

Tabela 2.4 - Fator C: Conteúdo da estrutura ou efeitos indiretos das descargas atmosféricas

Conteúdo da estrutura ou efeitos indiretos das descargas atmosféricas	Fator C
Residências comuns, edifícios de escritórios, fábricas e oficinas que não contenham objetos de valor ou particularmente suscetíveis a danos	0,3
Estruturas industriais e agrícolas contendo objetos particularmente suscetíveis a danos	0,8
Subestações de energia elétrica, usinas de gás, centrais telefônicas, estações de rádio	1
Indústrias estratégicas, monumentos antigos e prédios históricos, museus, galerias de arte e outras estruturas com objetos de valor especial	1,3
Escolas, hospitais, creches e outras instituições, locais de afluência de público	1,7

Tabela 2.5 - Fator D: Localização da estrutura

Localização da estrutura	Fator D
Estrutura localizada em uma grande área contendo estruturas ou árvores da mesma altura ou mais altas (por exemplo: em grandes cidades ou em florestas)	0,4
Estrutura localizada em uma área contendo poucas estruturas ou árvores de altura similar	1
Estrutura completamente isolada, ou que ultrapassa, no mínimo, duas vezes a altura de estruturas ou árvores próximas	2

Tabela 2.6 - Fator E: Topografia da região

Topografia da região	Fator E
Planície	0,3
Elevações moderadas, colinas	1
Montanhas entre 300 m e 900 m	1,3
Montanhas acima de 900 m	1,7

Com o valor de N_{dc} calculado, a necessidade de um SPDA na estrutura em estudo é avaliada de acordo com o seguinte critério:

- Se $N_{dc} \geq 10^{-3}$: a estrutura requer SPDA.
- Se $10^{-3} > N_{dc} > 10^{-5}$: a utilização de SPDA deve ser tecnicamente justificada e decidida por acordo entre projetista e usuário.
- Se $N_{dc} \leq 10^{-5}$: não há necessidade de SPDA.

Portanto, é em função destes limites que a necessidade de instalação de para-raios é avaliada.

Deve ser lembrado que a implantação de um SPDA não impede a ocorrência de descargas atmosféricas assim como não assegura a proteção absoluta de uma estrutura, pessoas e bens. Entretanto, se instalado corretamente, o SPDA reduz de forma significativa os riscos de danos devidos às descargas atmosféricas [8].

2.2.5 Níveis de proteção

O nível de proteção oferecido como classificação a um SPDA denota sua eficiência e expressa a probabilidade com a qual ele protege um volume contra os efeitos das descargas atmosféricas. Uma vez seguidos os critérios de dimensionamentos recomendados para as distâncias e para os materiais, são definidos quatro diferentes níveis de proteção conforme o tipo de estrutura e o risco envolvido [8]:

- **Nível I:** Estruturas com risco confinado (estações de telecomunicação, usinas elétricas, etc.), estruturas com riscos para os arredores (refinarias, postos de combustível, fábricas de munição, etc.), estruturas com risco para o meio ambiente (indústrias químicas, usinas nucleares, etc.);
- **Nível II:** Estruturas de valor histórico e cultural insubstituível (museus, locais arqueológicos, etc), estruturas com grande aglomeração de público podendo haver risco de pânico (escolas, teatros, ginásios esportivos, etc.);
- **Nível III:** Estruturas de uso comum como edifícios residenciais, indústrias, casas residenciais, estabelecimentos agropecuários e fazendas com estrutura em madeira;
- **Nível IV:** Estruturas construídas de material não inflamável (alvenaria), com pouco acesso de pessoas e com conteúdo não inflamável (depósitos em fazendas, estabelecimentos agropecuários, etc.).

A NBR 5419:2005 ainda apresenta definições para 3 diferentes tipos de eficiência de um SPDA, sendo eles:

- **Eficiência de intercepção (E_i):** Relação entre a frequência média anual de descargas atmosféricas interceptadas pelos captores e a frequência (N_{dc}) sobre a estrutura.
- **Eficiência de dimensionamento (E_s):** Relação entre a frequência média anual de descargas atmosféricas interceptadas sem causar danos à estrutura e a frequência (N_{dc}) sobre a estrutura.

- **Eficiência de um SPDA (E):** Relação entre a frequência média anual de descargas atmosféricas que não causam danos, interceptadas ou não pelo SPDA, e a frequência (N_{dc}) sobre a estrutura.

Tabela 2.7 - Eficiência Global teórica esperada para cada nível de proteção

Nível de Proteção	Eficiência
I	98%
II	95%
III	90%
IV	80%

As descargas atmosféricas podem possuir correntes de diferentes intensidades. Por esse motivo, um sistema de proteção não pode ser dito seguro para todos os níveis de proteção. Pela Tabela 2.7, pode-se perceber que o nível de eficiência se encontra entre 80% e 98%. Estes valores são calculados com base nas estatísticas de valores e parâmetros dos raios e do Modelo Eletrogeométrico [9]. Por exemplo, aproximadamente 91% de todas as descargas resultam em um pico de corrente maior que 10 kA [10]. Em média, pelo menos essa porcentagem de descargas será interceptada por um SPDA com eficiência maior ou igual a 91%. Os 9% restantes de menor intensidade, não necessariamente todos eles, provavelmente poderão não ser interceptados pelo SPDA. Este conceito forma o princípio fundamental da análise de risco da proteção contra descargas atmosféricas.

2.3 Implementação do guia de cálculo

A implementação do guia foi realizada com o auxílio do *software Excel*, integrante do pacote *Microsoft Office*, ferramenta utilizada na criação e formatação de planilhas para análise de dados. O *Excel* pode ser utilizado para acompanhar dados, criar modelos de análise de dados, criar fórmulas para fazer cálculos dos mesmos, organizar dinamicamente seu conteúdo de várias maneiras e apresentá-los através de diversos tipos de gráficos [11].

O guia foi criado com o objetivo de auxiliar engenheiros e técnicos na verificação da necessidade de se instalar um SPDA sobre uma estrutura levando em consideração o método sugerido na NBR 5419:2005. Utilizando-o, a verificação é feita facilmente de forma simples e rápida dispensando a necessidade da realização analítica manual dos cálculos apresentados na norma. Conforme foi apresentado no Item 1.2 deste capítulo, durante o processo de verificação da necessidade do uso de um SPDA, são necessários as seguintes informações:

- Índice ceráunico da região;
- Fatores de ponderação;
- Área de exposição equivalente.

Sendo assim, o guia realiza os cálculos a partir dessas informações, que são fornecidas através da entrada de dados pela escolha de itens em janelas estilo *pop-up menu* ou através da digitação de valores em células. A Figura 2.3 apresenta a tela de interface apresentada ao usuário quando o programa é executado, na qual são solicitadas as informações citadas acima como dados de entrada para posterior análise da necessidade do SPDA.

Avaliação do risco de exposição	
Fatores de ponderação	
Fator A:	<input type="text"/>
Fator B:	<input type="text"/>
Fator C:	<input type="text"/>
Fator D:	<input type="text"/>
Fator E:	<input type="text"/>
Índice ceráunico da região	
Área de exposição equivalente	
Comprimento [m]:	<input type="text"/>
Largura [m]:	<input type="text"/>
Altura [m]:	<input type="text"/>
Resultado	
Visualizar mapas	

Figura 2.3 - Interface inicial do guia (*Fonte: Autor, Software Excel*)

Todos os cálculos realizados pelo guia são efetuados com base nos cálculos apresentados na norma brasileira.

Pela Figura 2.3, pode-se perceber que a janela de interface apresentada é subdividida em 4 partes. A primeira delas é referente aos FATORES DE PONDERAÇÃO *A, B, C, D e E* que podem ser escolhidos através das janelas *pop-ups menus*. Estas janelas apresentam as opções disponíveis para cada um dos fatores de ponderação de forma que o usuário possa escolher aquela que melhor se encaixa à situação em que a estrutura em análise se encontra. A Figura 2.4 apresenta a lista de opções disponíveis para o Fator E, sendo que a escolha deve ser realizada com um clique sobre a opção desejada. Os itens disponíveis para cada um dos fatores são os mesmos apresentados nas Tabela 2.2 à Tabela 2.6.

Avaliação do risco de exposição																									
<table border="1"><thead><tr><th colspan="2">Fatores de ponderação</th></tr></thead><tbody><tr><td>Fator A:</td><td><input type="text"/></td></tr><tr><td>Fator B:</td><td><input type="text"/></td></tr><tr><td>Fator C:</td><td><input type="text"/></td></tr><tr><td>Fator D:</td><td><input type="text"/></td></tr><tr><td>Fator E:</td><td><input type="text"/> Planície Elevações moderadas, colinas Montanhas entre 300 m e 900 m Montanhas acima de 900 m</td></tr></tbody></table>	Fatores de ponderação		Fator A:	<input type="text"/>	Fator B:	<input type="text"/>	Fator C:	<input type="text"/>	Fator D:	<input type="text"/>	Fator E:	<input type="text"/> Planície Elevações moderadas, colinas Montanhas entre 300 m e 900 m Montanhas acima de 900 m	<table border="1"><thead><tr><th colspan="2">Índice ceráunico da região</th></tr></thead><tbody><tr><td colspan="2"><input type="text"/></td></tr></tbody></table> <table border="1"><thead><tr><th colspan="2">Área de exposição equivalente</th></tr></thead><tbody><tr><td>Comprimento [m]:</td><td><input type="text"/></td></tr><tr><td>Largura [m]:</td><td><input type="text"/></td></tr><tr><td>Altura [m]:</td><td><input type="text"/></td></tr></tbody></table> <input type="button" value="Visualizar mapas"/>	Índice ceráunico da região		<input type="text"/>		Área de exposição equivalente		Comprimento [m]:	<input type="text"/>	Largura [m]:	<input type="text"/>	Altura [m]:	<input type="text"/>
Fatores de ponderação																									
Fator A:	<input type="text"/>																								
Fator B:	<input type="text"/>																								
Fator C:	<input type="text"/>																								
Fator D:	<input type="text"/>																								
Fator E:	<input type="text"/> Planície Elevações moderadas, colinas Montanhas entre 300 m e 900 m Montanhas acima de 900 m																								
Índice ceráunico da região																									
<input type="text"/>																									
Área de exposição equivalente																									
Comprimento [m]:	<input type="text"/>																								
Largura [m]:	<input type="text"/>																								
Altura [m]:	<input type="text"/>																								

Figura 2.4 - Opções apresentadas para Fator E (*Fonte: Autor, Software Excel*)

Após a escolha de cada um dos fatores de ponderação referentes às características específicas da estrutura a ser protegida e de sua localização, em uma segunda parte da divisão da janela, deve ser informado ao programa o valor do ÍNDICE CERÁUNICO da região, que representa a quantidade de dias de trovoadas por ano na região da estrutura em análise. Para auxiliar a escolha deste valor, o guia possui 2 mapas retirados da norma que podem ser acessados através do próprio arquivo. Esses mapas contêm curvas isoceráunicas, ou seja, curvas que interligam pontos no mapa com mesmo índice ceráunico, como o mostrado na Figura . A partir dos mapas, o valor do índice ceráunico para cada região pode ser então verificado e informado ao programa.

A Figura 2.5 apresenta o mapa de curvas isoceráunicas para a região Sudeste

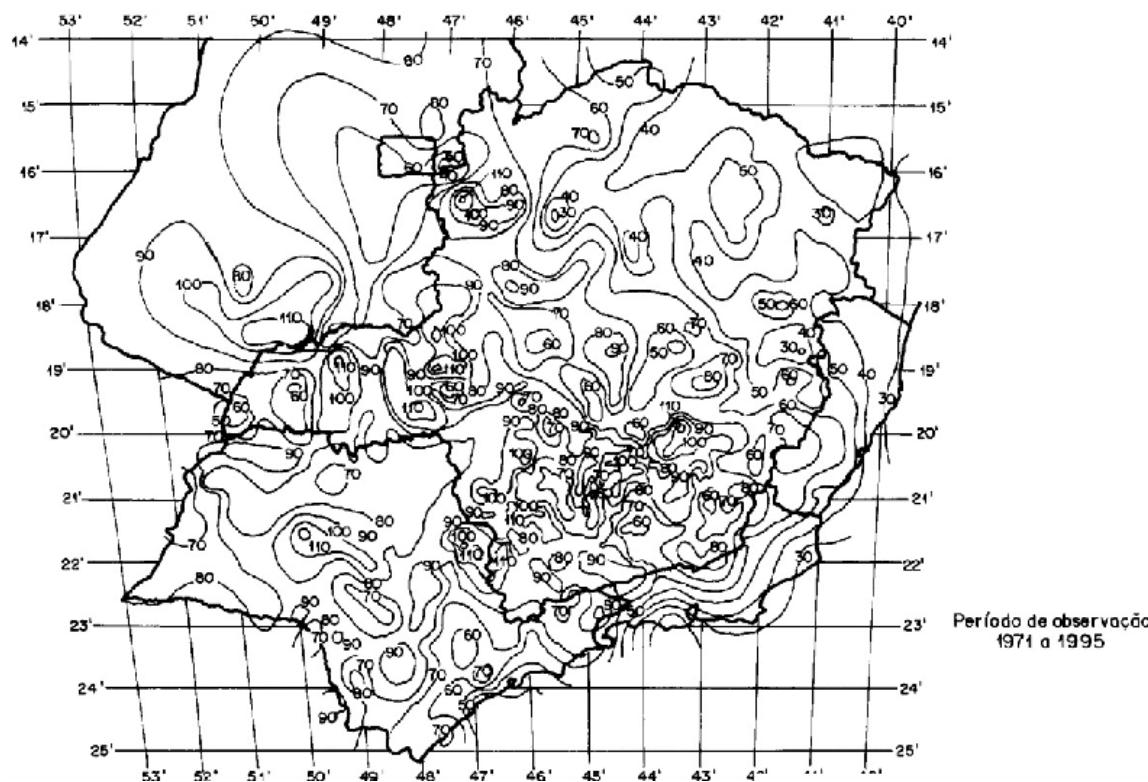


Figura 2.5 - Mapa de curvas isoceráunicas – Região Sudeste (Fonte: NBR 5419:2005)

Após a entrada do índice ceráunico da região, em uma terceira parte das subdivisões da janela principal, são solicitados os valores de COMPRIMENTO, LARGURA e ALTURA da estrutura para o cálculo da área de exposição equivalente da estrutura, como mostrado no Item 2.2.2 deste capítulo.

Enfim, com todos os campos preenchidos, a quarta e última parte do guia é o resultado. O guia então realiza internamente os cálculos e retorna como resultado uma mensagem informando sobre a necessidade ou não da implantação do SPDA. A Figura 2.6 apresenta uma situação na qual o uso do SPDA é recomendado. Na análise, foram considerados os seguintes fatores de ponderação:

- **Fator A:** Edifícios de escritórios, hotéis e apartamentos, e outros edifícios residenciais não incluídos abaixo – 1,2;

- **Fator B:** Estrutura de alvenaria ou concreto simples, com qualquer cobertura, exceto metálica ou de palha – 1;
- **Fator C:** Residências comuns, edifícios de escritórios, fábricas e oficinas que não contenham objetos de valor ou particularmente suscetíveis a danos – 0,3;
- **Fator D:** Estrutura localizada em uma área contendo poucas estruturas ou árvores de altura similar – 1;
- **Fator E:** Planície – 0,3

Avaliação do risco de exposição	
Fatores de ponderação	
Fator A:	Edifícios de escritórios, hotéis e apartamentos, e outros edifícios residenciais não incluídos abaixo.
Fator B:	Estrutura de alvenaria ou concreto simples, com qualquer cobertura, exceto metálica ou de palha.
Fator C:	Residências comuns, edifícios de escritórios, fábricas e oficinas que não contenham objetos de valor ou particularmente suscetíveis a danos.
Fator D:	Estrutura localizada em uma área contendo poucas estruturas ou árvores de altura similar.
Fator E:	Planície.
Índice ceráunico da região	110
Área de exposição equivalente	
Comprimento [m]:	40
Largura [m]:	20
Altura [m]:	40
Resultado	
A estrutura requer SPDA	
Visualizar mapas	

Figura 2.6 - Exemplo final de avaliação de risco de exposição (*Fonte: Autor, Software Excel*)

Pode-se perceber que o procedimento para análise do risco de exposição e consequente verificação da necessidade de implantação de um SPDA foi realizada de forma bastante simples, já que os dados necessários para a verificação são bastante objetivos e fáceis de serem obtidos.



2.4 Conclusões parciais

Neste capítulo, foi apresentado o método de seleção do nível de proteção de um SPDA apresentado pela Norma Brasileira NBR 5419:2005, da ABNT, em seu Anexo B.

A avaliação da necessidade de implantação de um SPDA é o primeiro passo em um projeto de SPDA já que esse procedimento verifica se ele realmente se faz necessária. Entretanto, conforme o próprio conteúdo do Anexo B, alguns fatores não podem ser avaliados e podem sobrepujar todas as demais considerações. Por exemplo, o fato de que não deve haver qualquer tipo de risco de vida evitável, ou de que os ocupantes de uma estrutura devem se sentir sempre seguros, pode determinar a necessidade de um SPDA, mesmo nos casos em que a proteção seria normalmente dispensável.

Para simplificar o processo, foi apresentada também a análise da necessidade de um SPDA sendo realizada através do *Excel* presente no pacote *Microsoft Office*. Foi mostrado que, com o auxílio do guia desenvolvido, tal análise pode ser realizada de forma rápida e fácil.

Sobre os resultados das análises, o método apresentado pela norma em questão destina-se a orientar uma avaliação que, em certos casos, pode ser difícil e não deve ser, portanto, o único fator de decisão sobre a implantação do SPDA. Se o resultado obtido for consideravelmente menor que 10^{-5} (1 em 100.000) e não houver outros fatores preponderantes, a estrutura dispensa proteção. Se o resultado obtido for maior que 10^{-5} , por exemplo, 10^{-4} (1 em 10.000), devem existir razões bem fundamentadas para não instalar um SPDA.

Enfim, o resultado do método apresentado deve ser analisado juntamente com todas as informações relevantes que podem influenciar na decisão de implantação do SPDA.

Capítulo 3

O Modelo Eletrogeométrico e suas limitações

3.1 Considerações iniciais

Os estudos sobre sistemas de proteção contra descargas atmosféricas e seus efeitos tem se desenvolvido com maior velocidade principalmente em função do aumento recente do uso de equipamentos eletrônicos extremamente sensíveis a surtos transitórios e aos campos eletromagnéticos que surgem na ocorrência de uma descarga. O Modelo Eletrogeométrico é atualmente o modelo mais aceito por normas de vários países, embora discutível em alguns aspectos teóricos.

De acordo com a norma brasileira que trata da proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, o Modelo Eletrogeométrico serve para delimitar o volume de proteção oferecido pelos captores de um SPDA independente de sua configuração ser em hastes, cabos ou combinação de ambos. A norma brasileira também afirma que os pontos nos quais ocorre maior intensidade de campo elétrico, seja no solo ou em estruturas, são geralmente os pontos mais próximos da extremidade do líder descendente. Portanto, a superfície de uma esfera com centro na extremidade do líder e raio igual ao comprimento dos saltos antes do seu último salto é o lugar geométrico dos pontos a serem atingidos pela descarga. Estes pontos podem então ser simulados por uma esfera fictícia, cujo raio seja igual ao comprimento do último trecho a ser vencido pelo líder descendente [8].

Dentro desse contexto, este capítulo tem como objetivo apresentar a forma como o Modelo Eletrogeométrico é aplicado. Entretanto, apesar de ser o principal método utilizado atualmente em projetos de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, o modelo, que normalmente é aplicado através do Método da Esfera Rolante ou Fictícia, é um modelo puramente geométrico que desconsidera fenômenos físicos importantes com relação às descargas atmosféricas. Portanto, serão também apresentados neste capítulo alguns estudos feitos ao longo dos anos por pesquisadores, referentes à como o modelo se aplica quando considerados tais fenômenos por ele desconsiderados.

3.2 O Modelo Eletrogeométrico

Uma versão rudimentar do Modelo Eletrogeométrico foi desenvolvida por Golde em 1945, entretanto o método não foi adaptado para sistemas de proteção. Na década de 1950, as primeiras linhas norte-americanas de 345 kV foram colocadas em serviço. A quantidade de interrupções no fornecimento de energia elétrica devido às descargas atmosféricas se mostrou bem maior que o esperado, o que motivou estudos detalhados sobre o problema. O Modelo Eletrogeométrico conhecido hoje é, então, fruto dessas pesquisas [12].

O modelo é um método mais apurado para a obtenção da zona de proteção do sistema de proteção adotado, pelo fato de ser baseado no mecanismo de desenvolvimento das descargas atmosféricas. É uma técnica adotada em muitos países, inclusive, fazendo parte de muitas normas. É a mesma técnica usada na coordenação da isolação de linhas de transmissão, que agora está sendo implementada e aplicada em edificações [13].

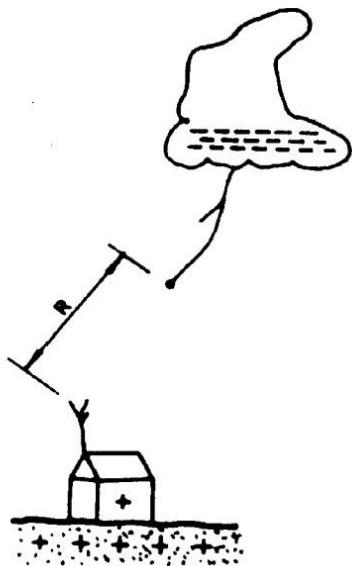


Figura 3.1 - Distância de atração (Fonte: NBR 5419:2005)

O comprimento R mostrado na Figura 3., que representa a distância entre o ponto de partida do líder ascendente e a extremidade do líder descendente é o parâmetro utilizado para o projeto do posicionamento de captores utilizando o Modelo Eletrogeométrico, sendo que

seu valor é calculado em função do valor de crista máximo do primeiro raio negativo, em quilo ampères (kA). O valor de crista da corrente de uma descarga é utilizado para definir a distância de atração em fórmulas do tipo [14]:

$$d = k \times I^p \quad (3.1)$$

Na norma brasileira, os valores de ‘k’ e ‘p’ foram definidos em $k=10$ e $p=0,65$. A Equação 3.1, com os valores de ‘k’ e ‘p’, foi formulada pelo GT-33 da CIGRÉ – Conferência Internacional de Grandes Redes Elétricas de Alta-Tensão [8]. Essa equação já possuiu outras versões, como por exemplo, na edição de 2001 da NBR 5419, onde o valor de R era calculado conforme mostra a equação 3.3 [14].

$$R = 10 \times I_{máx}^{0,65} \quad (3.2)$$

$$R = 2 \times I_{máx} + 30 \times (1 - e^{-I_{máx}}) \quad (3.3)$$

A Equação 3.1, 3.2 e 3.3 mostram que a distância de atração é função da intensidade da corrente $I_{máx}$, de forma que durante a aproximação do líder descendente, o objeto que se encontrar a uma distância menor que a distância de atração R, será o objeto que sofrerá a descarga.

A Tabela 3.1 apresenta os valores de raio da esfera a serem adotados em um projeto escolhidos em função do nível de proteção desejado.

Tabela 3.1 - Níveis de proteção

Nível de proteção	Distância R [m]	Valor de crista [kA]
I	20	3
II	30	5
III	45	10
IV	60	15

3.3 O Método da Esfera Rolante

A forma mais comum de aplicação do Modelo Eletrogeométrico é o Método da Esfera Rolante. De acordo com a Tabela 3.1, pode-se perceber que, quanto menor o raio R da esfera rolante, maior será o nível de proteção oferecido pelo SPDA. Isso ocorre pois ao considerar uma esfera de raio menor, por exemplo 20 metros, todas as descargas que possuírem o último salto do líder descendente maior que o raio R escolhido, incidirão sobre o sistema de captação do SPDA. Por outro lado, caso se opte por uma esfera de raio maior, todas as descargas que possuírem o último salto do líder descendente menor que o raio R escolhido poderão penetrar a área protegida criando a possibilidade de atingirem estruturas que se encontram dentro do volume de proteção. Isso explica o fato de, nesse caso, o nível de proteção oferecido ser menor.

A Figura 3. apresenta de forma simplificada como o Modelo Eletrogeométrico é aplicado através do Método da Esfera Rolante. Neste caso, tem-se uma esfera de raio R rolada sobre duas estruturas com o objetivo de analisar o volume de proteção oferecido por elas assim como as regiões que se encontram desprotegidas contra uma descarga.

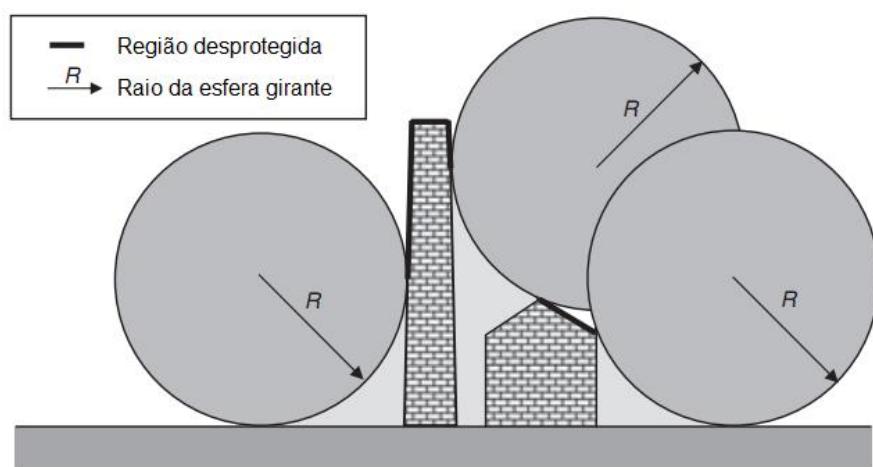


Figura 3.2 - Aplicação do Método da Esfera Rolante sobre estruturas (Fonte: Vernon Cooray, 2010)

Como o valor do raio das esferas fictícias não é precisamente definido, pode-se obter uma expressão para a região de proteção com base em uma parábola que é o lugar geométrico dos centros dessas esferas, ou seja, uma parábola que contém o centro de todas as esferas de raio R variável desde que a esfera seja, ao mesmo tempo, tangente ao solo e passe pelo ponto H , que representa o topo da haste [14].

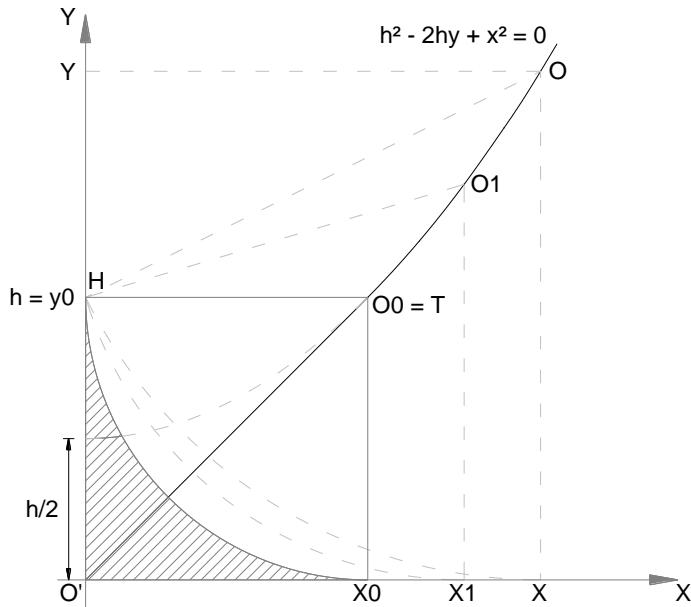


Figura 3.3 – Lugar geométrico dos centros das esferas fictícias (Fonte: Moacir Lacerda, 1989)

A parábola $h^2 - 2hy + x^2 = 0$ de [14], apresentada na Figura 3., é o lugar geométrico dos centros das esferas que tangenciam o solo (representado pelo eixo $O'X$) e passam pelo ponto H sem necessariamente tangenciá-lo, de forma com que os pontos nos quais as esferas tocam o solo e a estrutura estão igualmente distanciados do centro da esfera, representado por um ponto $O(x,y)$ qualquer sobre a parábola.

De acordo com o Método da Esfera Rolante de verificação do volume de proteção, os pontos nos quais a esfera toca ao ser rolada sobre a estrutura são os pontos desprotegidos e que, por este fato devem ser protegidos. Dessa forma, a região hachurada na Figura 3. é definida como a região de proteção oferecida pelo captor de altura h considerando uma esfera com centro em O_0 e raio H .

Pela norma brasileira, a probabilidade de penetração de uma descarga atmosférica no volume a proteger é consideravelmente reduzida pela presença de um subsistema de captação corretamente planejado, sendo que um subsistema captor pode ser constituído por uma combinação qualquer de hastes, cabos esticados, condutores em malha e elementos naturais desde que a combinação satisfaça os requisitos da norma.

Considerando uma haste de comprimento h coincidindo com o eixo O'Y, a região de proteção pode ser obtida diretamente da equação da parábola.

Colocando $x = f(y, h)$, tem-se que, pela Equação 3.4:

$$x = h \sqrt{\left(\frac{2y}{h}\right) - 1} \quad (3.4)$$

No caso da esfera tangenciando a haste e o solo, tem-se que $x = x_{prot}$ e $y = h$. Assim, substituindo, tem-se:

$$x = h \sqrt{\left(\frac{2y}{h}\right) - 1} = h \sqrt{\left(\frac{2h}{h}\right) - 1} = h\sqrt{(2) - 1} = h \quad (3.5)$$

$$\therefore x_{prot} = h \quad (3.6)$$

Neste caso a região de proteção é aquela em que $x < h$, sendo h o próprio raio da esfera fictícia.

No caso da esfera tangenciando o solo e tocando a ponta da haste sem tangenciá-la, o raio da esfera é maior que a altura h da haste.

Fazendo $x = x_{prot}$, chega-se a:

$$x_{prot} = \sqrt{h(2R - h)} \quad (3.7)$$

A região de proteção é definida para $x < x_{prot}$.

Assim, no projeto de captores para uma determinada estrutura, calcula-se a abcissa $x = \sqrt{h(2R - h)}$ e marca-se este valor em um eixo horizontal que passa pela base da haste. Em seguida, passa-se pelo valor x encontrado, um segmento perpendicular ao eixo horizontal e de comprimento d correspondente ao raio da esfera encontrando o centro $O(x,d)$ da esfera fictícia. Por fim, traçando uma circunferência de raio d e centro $O(x,d)$, encontra-se o círculo que delimita a desejada região de proteção.

A Figura 3. mostra outra aplicação do Modelo Eletrogeométrico sobre uma haste para-raios de altura h sobre uma superfície plana. Neste caso, o raio da esfera rolante é $R > h$. A esfera é então rolada sobre a superfície e sobre a haste. A área protegida é a região que a esfera rolante não consegue tocar e está representada pela área A .

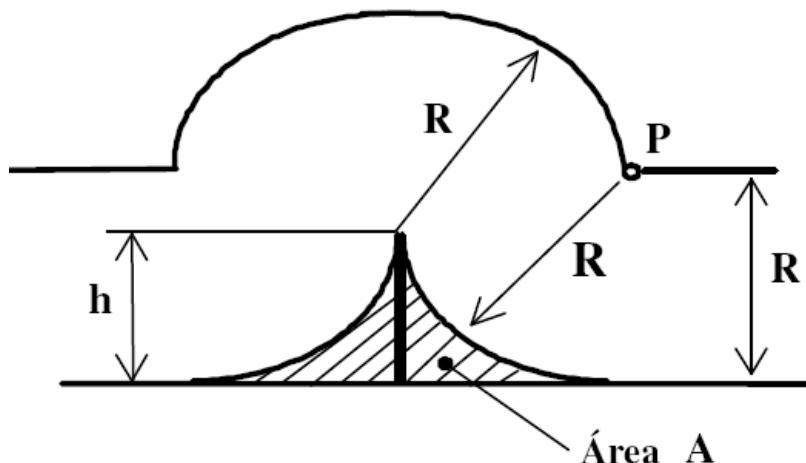
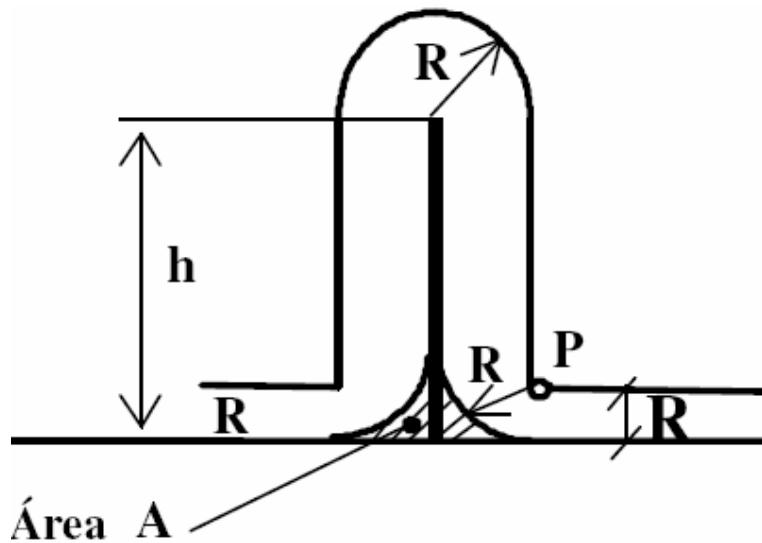


Figura 3.4 - Método da Esfera Rolante ($R > h$) (Fonte: NBR 5419:2005)

Em casos onde o comprimento da haste é maior que o raio da esfera rolante ($R < h$), verifica-se que o volume de proteção oferecido pela haste é pequeno em relação à haste elevada, o que pode levar à ocorrência de descargas laterais. Isso evidencia o fato de a haste de Franklin não ser útil para proteger estruturas elevadas [7], pois cada parte da lateral da estrutura que é tocada pela esfera rolante é um possível ponto de impacto. A Figura 3. ilustra uma situação onde o raio da esfera rolante é menor que a altura da estrutura.

Figura 3.5 - Método da Esfera Rolante ($R < h$) (Fonte: NBR 5419:2005)

3.4 Limitações do Modelo Eletrogeométrico

3.4.1 Distorção do campo elétrico

O método descrito no Item 3.3 apresenta um procedimento meramente geométrico sem considerar as distorções do campo elétrico que ocorrem na estrutura, o que, de certa forma, equivale a dizer que, à esquerda da parábola da Figura 3, as linhas de campo incidem apenas sobre a haste (Figura 3.3.6) e que, à direita da parábola, elas incidem apenas sobre o solo, em um ponto $x \geq x_{prot}$ (Figura 3.3.7) [14], como se a parábola delimitasse o espaço em duas regiões diferentes. Nas Figura 3. e Figura 3., os círculos simbolizam a ponta do líder descendente e as pontas de setas indicam o sentido de movimento da descarga.

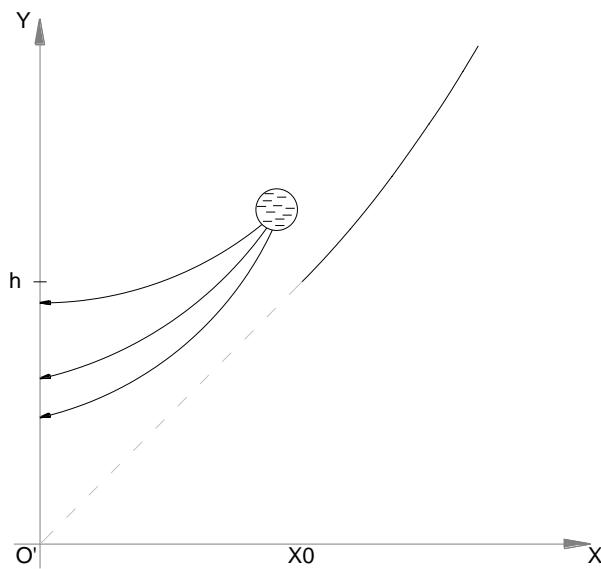


Figura 3.6 – Aproximação da descarga pela esquerda da parábola segundo o Modelo Eletrogeométrico (*Fonte: Moacir Lacerda, 1989*)

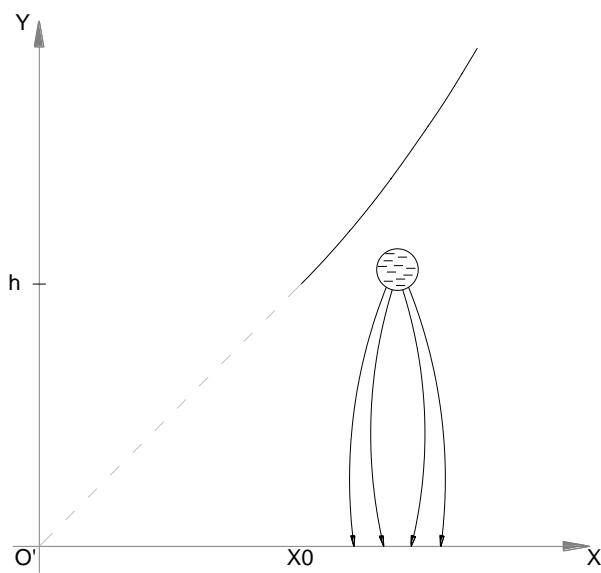


Figura 3.7 – Aproximação da descarga pela direita da parábola segundo o Modelo Eletrogeométrico (*Fonte: Moacir Lacerda, 1989*)

Se fosse verdadeira a afirmação de que as linhas de campo se comportam de acordo com o apresentado nas Figura 3.3.6 e Figura 3., seria o mesmo que afirmar que não existem as linhas de campo distribuídas da maneira como mostram as Figura 3. e Figura 3.9.

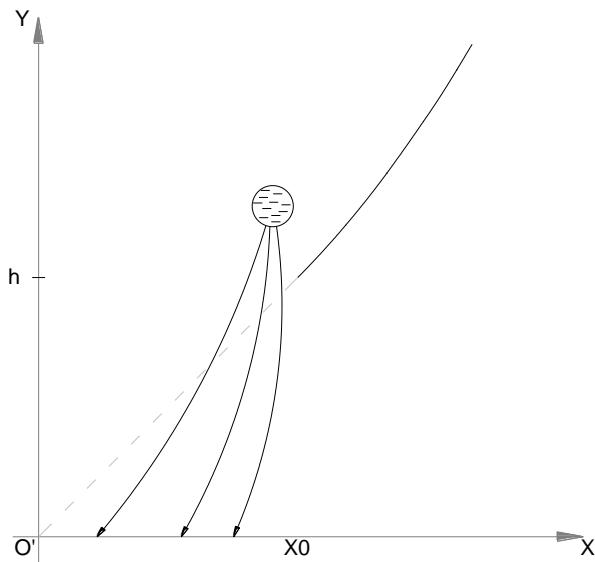


Figura 3.8 – Aproximação da descarga pela esquerda da parábola (*Fonte: Moacir Lacerda, 1989*)

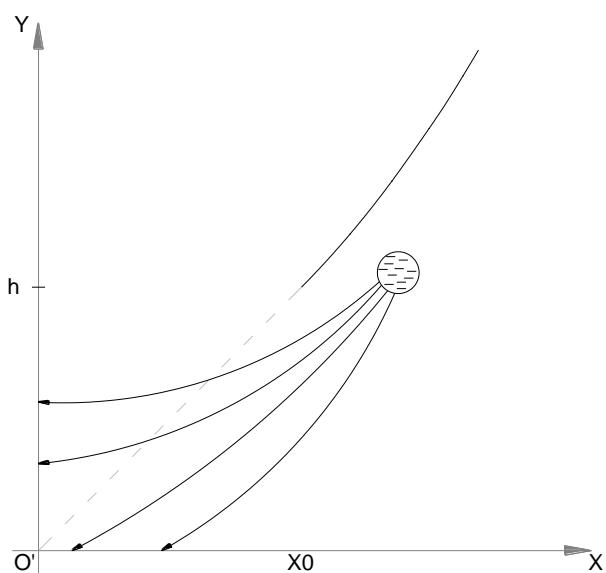


Figura 3.9 – Aproximação da descarga pela direita da parábola (*Fonte: Moacir Lacerda, 1989*)

A forma das linhas de campo mostradas nas Figura 3. e Figura 3.9 pode ser entendida observando-se o diagrama simplificado apresentado na Figura 3.10 e que permite visualizar as contribuições da haste e do solo na determinação das trajetórias das cargas por ocasião do último passo. Por simplicidade, supõe-se toda essa carga concentrada num ponto e que as cargas na haste e no solo são estacionárias e distribuídas como na Figura 3.10 [14].

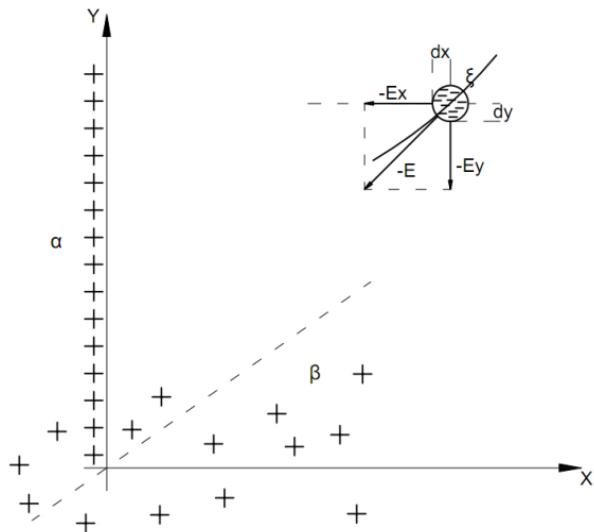


Figura 3.10 – Linhas de campo elétrico (Fonte: Moacir Lacerda, 1989)

Sabe-se que o campo elétrico devido às cargas presentes na haste é radial tendo como centro das superfícies equipotenciais, neste caso, cilíndricas, o eixo Y. Deste modo, ao considerar apenas o efeito da densidade linear de cargas α presente na haste, a intensidade do campo elétrico E_x , em V/m, devido ao condutor retilíneo carregado é dada por:

$$E_x = \frac{\alpha}{2\pi\epsilon x} \quad (3.8)$$

sendo x a menor distância (direção normal) da linha ao ponto de interesse e ϵ permissividade do meio.

Da mesma forma, o campo elétrico E_y devido à densidade superficial β de cargas no solo e sem considerar o efeito da haste, é independente da distância ao solo e representado por linhas perpendiculares (normal) ao solo. A intensidade do campo E_y , em V/m é dada por:

$$E_y = \frac{\beta}{2\varepsilon} \quad (3.9)$$

Como pode ser percebido na Figura 3.10, a ação da haste não é isolada da ação do solo, e vice-versa. Portanto, considerando os dois campos simultaneamente, a seguinte relação pode ser retirada da geometria dos vetores de campo:

$$\frac{E_x}{d_x} = \frac{E_y}{d_y} \quad (3.10)$$

Substituindo na Equação 3.10 as expressões de E_x e E_y , obtém-se a equação diferencial necessária para a obtenção da equação da linha de força no plano xy .

$$\frac{\alpha}{2\pi\varepsilon x} = \frac{\beta}{2\varepsilon d_y}$$

$$\frac{\alpha}{2\pi\varepsilon x d_x} = \frac{\beta}{2\varepsilon d_y}$$

$$\frac{d_y}{d_x} = \frac{\beta 2\pi\varepsilon x}{\alpha 2\varepsilon}$$

$$d_y = \frac{\beta \pi x}{\alpha} d_x$$

Integrando a equação acima, tem-se:

$$y = \int \frac{\beta \pi x}{\alpha} d_x$$

$$y = \frac{\pi \beta}{2 \alpha} x^2 + C \quad (3.11)$$

onde C é uma constante que depende das condições iniciais do problema.

A Equação 3.11 é uma equação de segundo grau que representa, fisicamente, uma família de parábolas cuja concavidade está expressa em função das densidades das cargas na haste e no solo e representam, por sua vez, as linhas de campo. O ponto C é o que determina onde a parábola corta o eixo.

Analizando ainda a equação para diferentes valores de α e β , pode-se perceber que, no caso em que a concavidade é muito pequena ($\alpha \ll \beta$), a curva tende a ser vertical indicando que a densidade linear de cargas na haste tem uma forte influência na inclinação das linhas de campo. Quando a concavidade é muito grande ($\alpha \gg \beta$), a curva tende a ser mais horizontal, o que significa dizer que os raios serão pouco afetados pela presença da haste quando a densidade superficial de cargas no solo for um número muito maior que a densidade linear de cargas ao longo da haste.

A Figura 3.11 ilustra as duas situações.

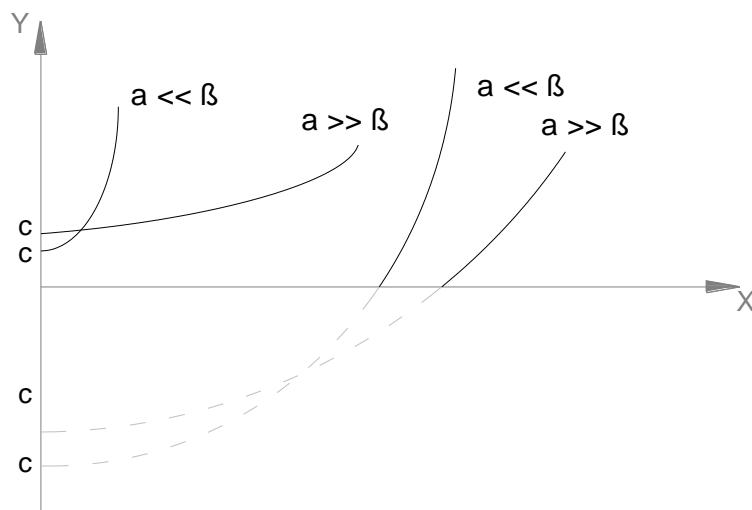


Figura 3.11 – Parábolas em função de α e β (Fonte: Moacir Lacerda, 1989)

Portanto, pode-se perceber que a afirmação de que as linhas de campo se comportam como mostrado nas Figura 3. e Figura 3. não é verdadeira, como demonstrado através da equação das linhas de campo e seu comportamento de acordo com as densidades de carga na haste e no solo. Essa falha pode ser também mostrada através da introdução de uma haste dentro do volume de proteção, situação mostrada na Figura 3.12.

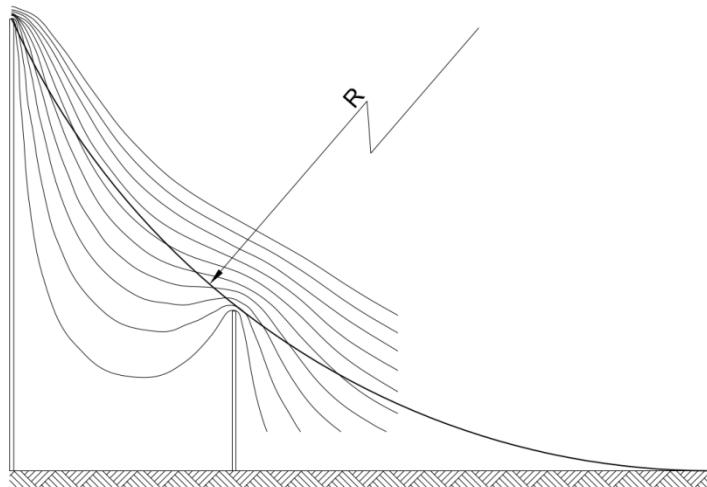


Figura 3.12 - Distorção de campo elétrico pela presença de uma haste no volume de proteção (Fonte: Moacir Lacerda, 1989)

Através da Figura 3.12, pode-se perceber de forma bastante clara que a introdução de uma haste entre uma estrutura e o ponto de tangência no solo provoca uma distorção das linhas equipotenciais de forma que surgem campos elétricos dentro do volume teoricamente protegido e que em certas situações podem ser de valor mais elevado do que os valores de campo elétrico nos pontos tangenciais. A presença de uma haste no interior de um campo elétrico praticamente uniforme, paralela à haste, aumenta o campo em torno da haste para um valor até centenas de vezes maior que aquele sem a presença da haste, dependendo da altura da haste e da forma da ponta da mesma. Esta é considerada a maior anomalia no Método da Esfera Rolante [15].

3.4.2 O líder ascendente

Além de não considerar as distorções do campo elétrico sobre a estrutura e seu subsistema captor, conforme foi mostrado, outro fato questionável a respeito da confiabilidade do Modelo Eletrogeométrico é que o mesmo não considera a formação e o desenvolvimento do líder ascendente gerado em função do aumento do campo elétrico que surge sobre a estrutura [16]. Como o Modelo Eletrogeométrico não leva em conta todos os fenômenos

físicos envolvidos no processo de formação de uma descarga atmosférica, vários estudos propõem adaptá-lo considerando a geometria da estrutura e a propagação do líder ascendente.

Experiências reais com situações já ocorridas mostram que, às vezes, uma descarga atinge estruturas, principalmente estruturas elevadas, no topo ou nas quinas, nas laterais ou em elementos que fazem parte da estrutura e se encontram em níveis mais próximos do solo. Nesta situação, se a estrutura foi atingida mesmo possuindo um SPDA, a explicação teórica para que isso tenha ocorrido é que a estrutura está protegida de acordo com um nível de proteção qualquer e uma descarga com menor intensidade de corrente, o que equivale a uma descarga com menor comprimento do último passo dado pelo líder descendente, incidiu sobre ela. Outra explicação física e mais prática é, primeiramente, em função da trajetória do líder descendente, que não é vertical como considerado nos modelos de proteção. Além disso, mudanças significantes no campo elétrico entre a nuvem e a terra ocorrem devido à presença de uma estrutura levando à intensificação desse campo em tais regiões de maior probabilidade de receberem uma descarga [16].

Se o líder ascendente que se encontra com o líder descendente partir do captor, isso levará à interceptação da descarga com sucesso, pois desta maneira, o captor estará cumprindo sua função de captar a descarga. Por outro lado, se ele partir, por exemplo, de uma quina da estrutura, a ligação com o líder descendente ocorrerá de forma com que o raio atinja a estrutura, o que configura uma falha no sistema de proteção.

Para que líderes ascendentes se formem a partir de estruturas na terra, altas densidades de cargas elétricas, que também são responsáveis pelas descargas entre nuvens e nuvem-terra, devem existir em nuvens sobre tais objetos [17].

Assim, para reduzir a probabilidade de incidência de raios na estrutura, é necessário levar em conta toda a sua geometria e também considerar a possibilidade de ocorrência de descargas com trajetórias oblíquas e não apenas trajetórias verticais para o líder descendente.

Quando consideramos a descarga ascendente na verificação do volume de proteção, a distância de atração (Raio de atração) R é redefinida de forma que agora passa a ser a distância medida não mais a partir da ponta do captor, mas sim, a partir da ponta superior do líder ascendente como mostra a Figura 3.13.

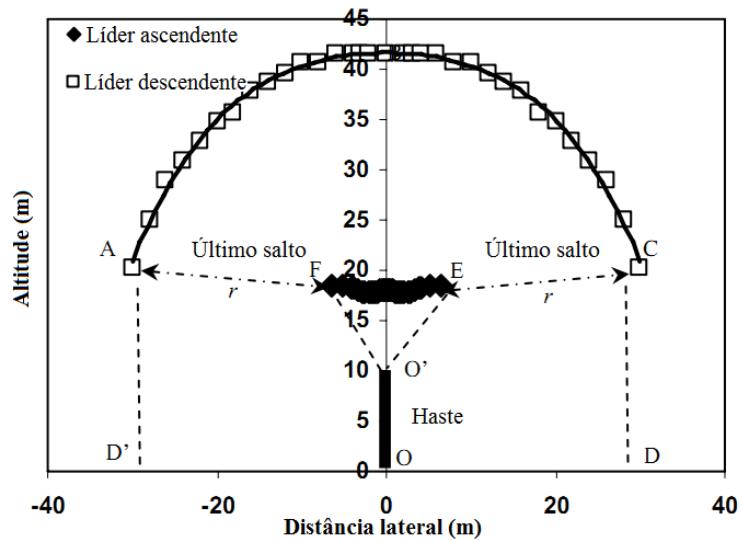


Figura 3.13 – Líderes ascendente e descendente (Fonte: Sonia Ait-Amar e Gérard Berger, 2009)

O espaço entre ABC e EF é o raio de atração quando considerado o líder ascendente durante o processo de descarga para qualquer trajetória do líder descendente, aumentando de fato a altura do objeto [16].

Levando em consideração este efeito e considerando uma haste em uma superfície plana, a esfera é rolada pela superfície e pelas extremidades do líder ascendente que parte da haste, de forma que o volume de proteção passe a ser como mostrado na Figura 3.14.

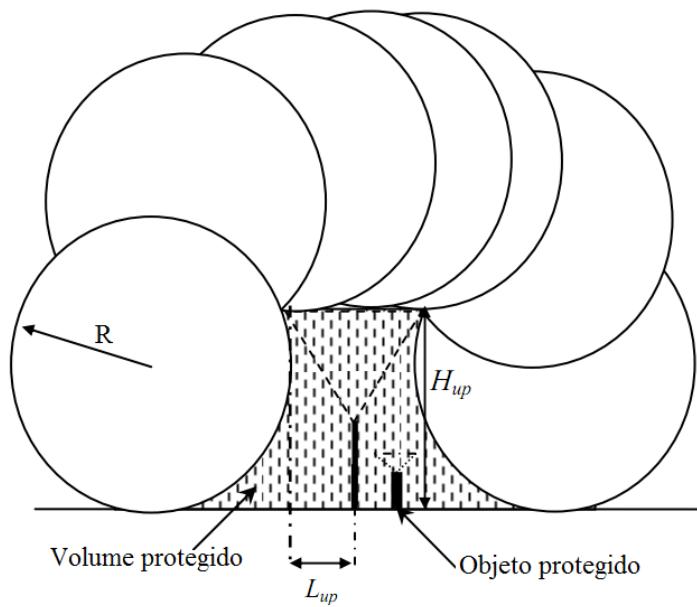


Figura 3.14 - A esfera rolante considerando a formação do líder ascendente (Fonte: Sonia Ait-Amar e Gérard Berger, 2009)

O cone formado pelo lugar geométrico do líder ascendente é definido pelos valores de L_{up} e H_{up} , que representam, respectivamente, os valores de raio e da altura do cone com relação à superfície do solo. As Equações 3.12 e 3.13, apresentadas em [16], definem os valores de L_{up} e H_{up} em função da altura da haste e a corrente da descarga.

$$L_{up} = \frac{(0,054hI - 0,178h + 0,124I + 1,057)}{3,02 - 0,19h} \quad (3.12)$$

$$H_{up} = 0,054hI - 0,78h + 0,124I + 0,37 \quad (3.13)$$

Fica evidente que, ao considerar a formação do líder ascendente no processo de formação da descarga atmosférica, o volume de proteção passa a ser maior do que quando o efeito é desconsiderado, o que pode ser percebido na Figura 3.14.

A formação do líder ascendente na formação de uma descarga é fato. Entretanto, seu processo de formação e sua contribuição no uso das ferramentas de dimensionamento de SPDA devem ser bem estudadas de forma a definir um método consistente do qual esse fenômeno participe.

Ensaios realizados em laboratório e detalhados em [18], mostraram que o surgimento de um líder ascendente não garante que a junção com o líder descendente se efetive caso haja estruturas por perto que também possam emitir um líder ascendente. Como foi mostrado na Figura 3.12, mesmo estando dentro do volume de proteção oferecido por uma haste, um objeto pode, através da presença de campo elétrico elevado, ser o ponto de partida de um líder responsável pela junção e consequente descarga nesse objeto que, teoricamente, de acordo com o Método da Esfera Rolante, estaria protegido.

A Figura 3.15 apresenta resultados de uma experiência realizada em laboratório, na qual se constatou falhas na proteção oferecida pela haste para-raios, representada pela haste de maior comprimento.

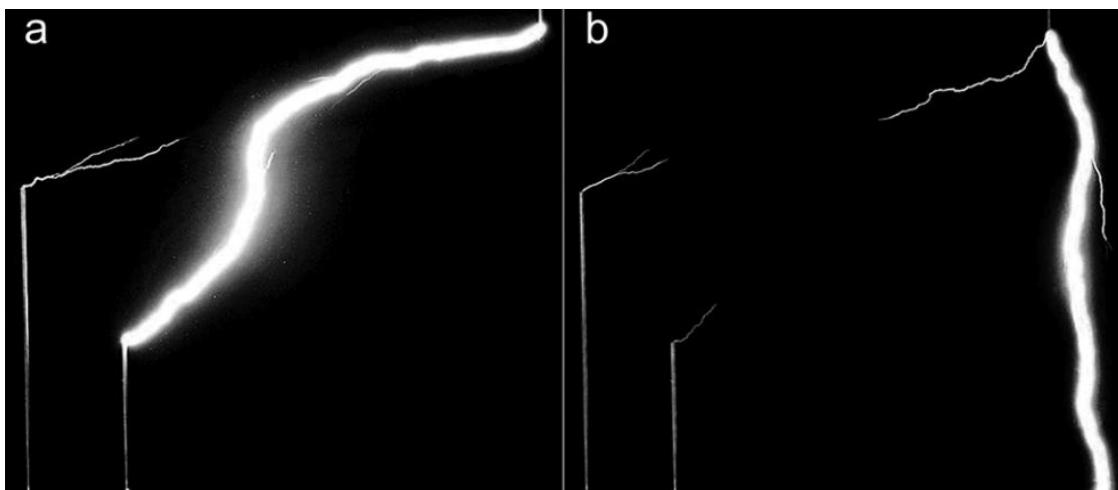


Figura 3.15 - Casos de falha na interceptação de um raio (Fonte: Pantelis N. Mikropoulos e Thomas E. Tsovilis, 2010)

Na Figura 3.15(a), mesmo com a formação do líder ascendente na haste de proteção, a descarga atingiu a haste menor, configurando falha na proteção. De maneira semelhante, na Figura 3.15(b), mesmo com a formação do líder ascendente, a descarga atingiu a região que representa o solo.

A Figura 3.16, retirada do mesmo trabalho apresentado em [18], apresenta uma situação na qual a proteção agiu corretamente interceptando o líder descendente e atraindo para si a descarga.



Figura 3.16 - Descarga interceptada pela haste de proteção (Fonte: Pantelis N. Mikropoulos e Thomas E. Tsovilis, 2010)



Pode-se perceber que a proteção não é completamente garantida, pois a formação do líder ascendente na haste protegida é evidente e possui plenas condições de possibilitar a união ao líder descendente. Deste modo, a probabilidade de que uma haste intercepte um líder descendente é significativamente alterada pela presença de outros objetos próximos a ela [18].

3.5 Conclusões parciais

Este capítulo apresentou a forma como o Método da Esfera Rolante é utilizado tendo como fundamento o Modelo Eletrogeométrico e seus princípios. Entretanto, o modelo desconsidera fenômenos físicos que envolvem uma descarga atmosférica, como a distorção do campo elétrico e a formação do líder ascendente, ao apresentar um modelo puramente geométrico de posicionamento de cabos e hastas para-raios. Ao desconsiderar esses fenômenos, a confiabilidade da eficiência de um SPDA projetado através da aplicação do Método da Esfera Rolante pode ser questionada.

O fato de o Modelo Eletrogeométrico desconsiderar a distorção de campo elétrico sobre estruturas levou o autor da referência [14] a comparar a determinação de um raio para a esfera fictícia à determinação de um ângulo de proteção para o cone, modelo de volume de proteção pioneiro nos estudos de proteção contra descargas atmosféricas [19]. Assim, a natureza geométrica do Modelo Eletrogeométrico arbitra a região de proteção sem considerar as distorções de campo elétrico o que equivale, nesse sentido, a escolher um ângulo para o cone. Não há consideração de fatores físicos em ambos os casos que diferencie uma situação da outra [14].

O Modelo Eletrogeométrico surgiu e foi desenvolvido como um método para determinar a proteção de linhas de transmissão, contra descargas atmosféricas, oferecida pelos cabos que eram utilizados sobre as torres. Desde então, o método foi desenvolvido e diversos estudos com críticas e sugestões sobre o modelo tem sido apresentados.

Capítulo 4

A formação de cargas nas nuvens e o Método dos Elementos Finitos



4.1 Considerações Iniciais

O primeiro estudo científico sobre as descargas atmosféricas foi realizado por Benjamin Franklin na segunda metade do século XVIII. Franklin foi o primeiro a projetar um experimento para tentar provar a natureza elétrica dos relâmpagos. Seu experimento, talvez o mais famoso em se tratando de relâmpagos, consistiu em amarrar uma chave em uma pipa e fazê-la atingir altitudes elevadas em meio a nuvens de tempestade. Deste modo, Franklin provaria a presença de cargas nas nuvens caso a chave se tornasse eletricamente energizada [4].

A formação de cargas elétricas nas nuvens tem sido ao longo dos anos objeto de grande curiosidade e interesse de pesquisadores e cientistas e, apesar de existirem várias teorias que tentam explicar a formação dessas cargas, nenhuma conseguiu explicar, até o momento, a maneira exata de como esse fato ocorre sendo, portanto, um fenômeno ainda não totalmente conhecido. O motivo básico pelo qual existe a dificuldade em determinar como as nuvens de tempestade se tornam eletricamente carregadas está no fato de que elas são largas, complexas e de curta duração para serem examinadas em geral e em detalhes a fim de se entender como funcionam.

As cargas se formam nas nuvens de tempestade, também conhecidas pelo termo cumulonimbus, e são as principais fontes de descargas atmosféricas. Esse tipo de nuvem surge geralmente em altitudes compreendidas entre 7 e 8 km de altitude e se estendem horizontalmente de 10 a 15 km, sendo que, apesar de menos comum, esse tipo de nuvem já pôde ser observado em altitudes mais elevadas [20].

Uma vez provada a natureza elétrica das descargas atmosféricas, a Teoria da Precipitação (1885) de Julius Elster e Hans F. Geitel foi a primeira teoria proposta para tentar explicar a estrutura elétrica das nuvens de tempestades [3]. A Teoria da Precipitação afirma que as cargas elétricas negativas presentes na parte central de uma nuvem de tempestade e as cargas elétricas positivas, presentes na parte superior da mesma, são formadas a partir da colisão entre partículas em precipitação e gotas de água e cristais de gelo em ascensão.

Estudos recentes realizados com base em observações mostram que a estrutura elétrica básica de uma nuvem de tempestade, ao contrário do que se pensava e era apresentado pelas teorias mais antigas, possui característica tripolar e não dipolar. Os primeiros estudos sobre o modelo de distribuição de cargas em uma nuvem de tempestade apresentavam um modelo de dipolo vertical. Entretanto, com o avanço das pesquisas e de possibilidades de medição de campo elétrico e potencial nas nuvens, atualmente o modelo mais aceito é o modelo tripolar. Isso significa que uma nuvem carregada possui três centros principais de cargas elétricas, sendo dois deles positivos nas partes superior e inferior da nuvem e o terceiro negativo na região central da nuvem. A Figura 4.1 apresenta a estrutura típica de uma nuvem de tempestade e a distribuição simplificada das cargas elétricas em três principais regiões.

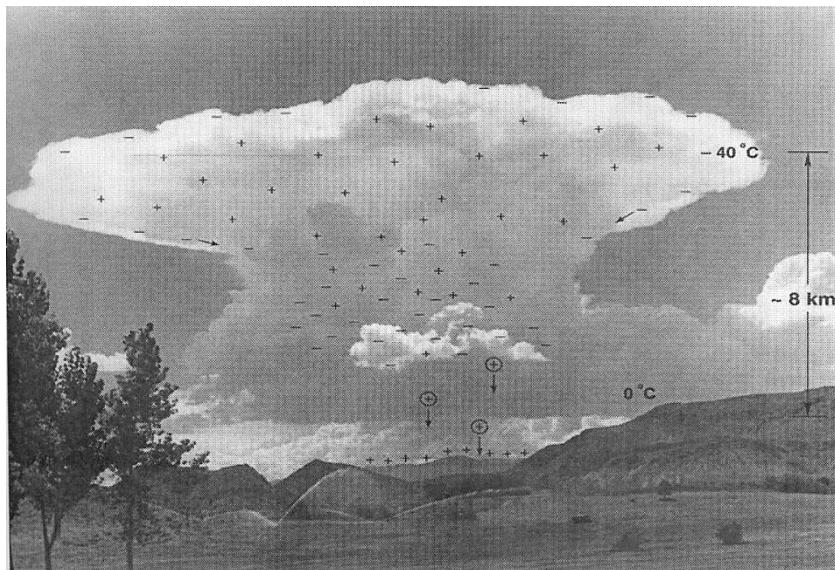


Figura 4.1 - Nuvem de tempestade com representação simplificada de como as cargas elétricas se distribuem em seu interior
(Fonte: Vladimir A. Rakov e Martin A. Uman, 2003)

A distribuição de cargas apresentada na Figura 4.1 é geralmente aproximada para três regiões esféricas e simétricas de cargas a fim de facilitar cálculos de campo elétrico. Como apresentado na Figura 4.2, há uma região positiva no topo da nuvem, uma negativa em seu centro, e outra menor e de carga positiva na região inferior da nuvem. As duas regiões superiores possuem cargas iguais e são consideradas as principais regiões por apresentarem quantidades de carga maiores com relação ao centro de carga inferior.

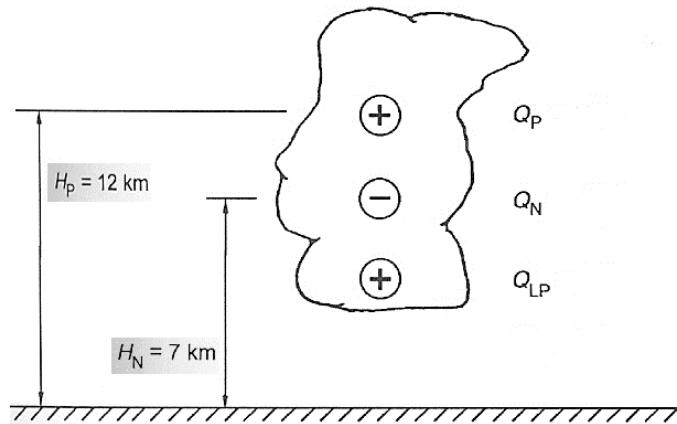


Figura 4.2 - Estrutura tripolar simplificada (Fonte: Vladimir A. Rakov e Martin A. Uman, 2003)

Como foi citado, existem atualmente diversas teorias que tentam explicar a maneira pela qual as cargas elétricas se formam dentro das nuvens. Entretanto, como nenhuma dessas teorias descreve com exatidão como esse processo ocorre, não faz parte desse trabalho discutir o fundamento das diferentes teorias. Será abordada apenas aquela que é consenso entre grande parte dos pesquisadores: a Teoria da Precipitação.

4.2 Teoria da Precipitação

Este item apresenta de forma resumida o conteúdo presente em [2], onde mais informações sobre a teoria e suas origens podem ser encontradas.

O mecanismo apresentado para tentar explicar a formação das cargas elétricas nas nuvens se baseia na colisão que ocorre entre partículas em precipitação com os pequenos cristais de gelo presentes nas nuvens. As partículas que estão em precipitação são geralmente maiores que os cristais de gelo e outras partículas em suspensão na nuvem.

Na Teoria da Precipitação, cujo resultado de formação das cargas se aproxima da estrutura tripolar apresentada na Figura 4.2, a eletrificação individual das partículas ocorre através da colisão entre partículas em precipitação com os cristais de gelo em meio às gotas de água que também estão presentes nas nuvens.

Uma ilustração simplificada desse mecanismo é mostrada na Figura 4.3. As partículas em precipitação, maiores e mais pesadas, caem por entre os cristais de gelo e as gotas de água geladas em suspensão. As gotículas de água, mesmo estando em temperaturas abaixo de 0°C, permanecem líquidas até que se choquem com os cristais de gelo, quando elas então se congelam.

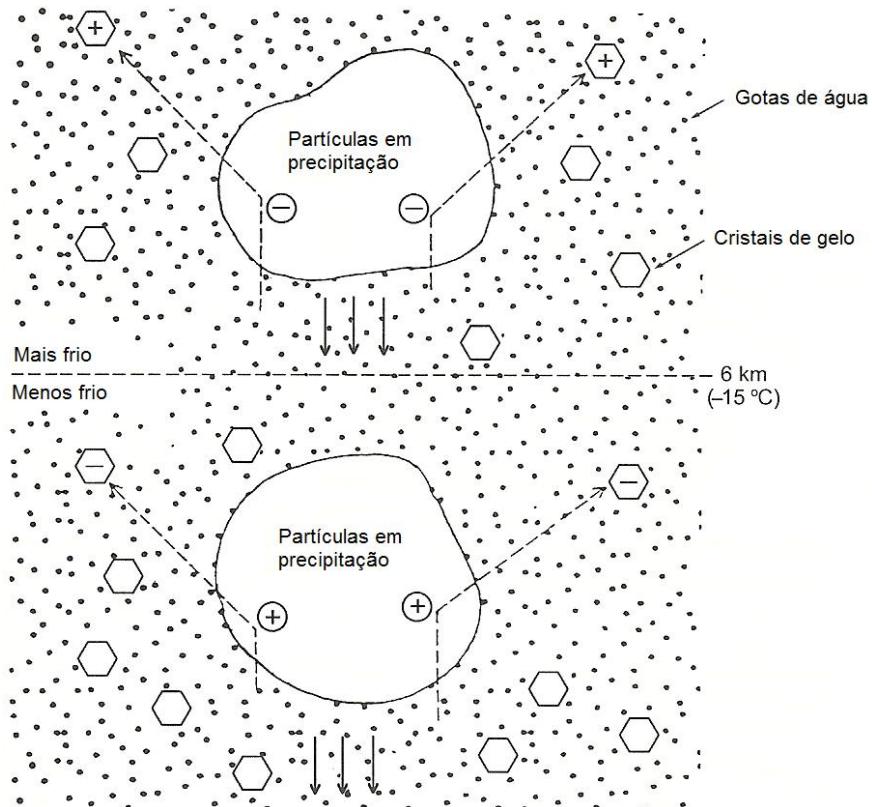


Figura 4.3 - Transferência de cargas através de colisões (Fonte: Vladimir A. Rakov e Martin A. Uman, 2003)

Experimentos realizados em laboratório [21] mostraram que quando a temperatura no momento da colisão se encontra abaixo de um valor crítico denominado Temperatura de Inversão (TR – *Reverse Temperature*), as partículas em precipitação adquirem carga negativa ao se chocarem com os cristais de gelo. Por outro lado, em temperaturas acima da TR, adquirem carga positiva. Essa temperatura na qual ocorre a inversão de sinal das cargas está compreendida entre -10°C e -20°C. As partículas em precipitação que adquirem cargas positivas explicam como se forma a região inferior de cargas positivas. O processo microscópico pelo qual as partículas adquirem cargas elétricas ao se chocarem é ainda desconhecido e divide opiniões de diversos pesquisadores. Isso ocorre porque existem várias

incertezas como, por exemplo, sobre a quantidade de colisões que realmente ocorrem em diferentes regiões da nuvem, sobre qual o real tamanho e velocidade das partículas envolvidas e sobre qual a verdadeira temperatura durante o processo. Todas essas incertezas tornam os resultados experimentais duvidosos e incertos. Diversos estudos tentam atualmente obter tais informações *in loco* através de realização de medições em conjunto com a utilização de radares e observações de vários tipos de nuvens.

Por fim, há um consenso de que a região principal positiva de uma nuvem de tempestade (região superior) se forma através de partículas positivas carregadas pelas correntes ascendentes de ventos que incidem na nuvem. A região central de cargas negativas, por sua vez, é formada por uma mistura de partículas em suspensão e partículas em precipitação com cargas negativas e, por fim, a região inferior de cargas positivas, sendo formada principalmente por partículas mais pesadas e carregadas positivamente que se encontram em precipitação, configurando assim, a estrutura vertical tripolar de cargas presente em uma nuvem de tempestade.

A distribuição e movimentação das cargas elétricas dentro de uma nuvem, como foram apresentadas, ocorrem nas partículas de água e gelo presentes que formam a estrutura tripolar de uma nuvem de tempestade. As propriedades dos três centros de cargas elétricas estão apresentadas na Tabela 4.1 e, assim como o modo como as cargas se formam varia com as diferentes opiniões de pesquisadores, suas propriedades elétricas também variam de acordo com seus autores.

Tabela 4.1 - Altitude e magnitude dos centros de cargas elétricas em nuvens de tempestade

Referência	Centro Positivo Inferior		Centro Negativo		Centro Positivo Superior	
	H [km]	Q [C]	H [km]	Q [C]	H [km]	Q [C]
Wilson (1920)	-	-	1	-33	10	33
Gish and Wait (1950)	-	-	3	-39	6	-39
Huzita and Ogawa (1976)	3	24	6	-120	8,5	120
Malan (1952)	2	10	5	-40	10	40
Wait (1953)	-	-	3	-39	6,1	39
Tzur and Roble (1985)	-	-	5	-50	10	50

O centro de cargas negativas é o responsável pela indução de cargas positivas na terra e estruturas aterradas sob uma nuvem eletricamente carregada. A presença das cargas negativas causam descargas pontuais em árvores e objetos pontiagudos no solo em função da ionização do ar, efeito também conhecido por descargas de corona. Devido à presença de nuvens carregadas, a magnitude do campo elétrico ambiente E_A logo acima do solo plano se limita a valores entre 1 e 10 kV/m .

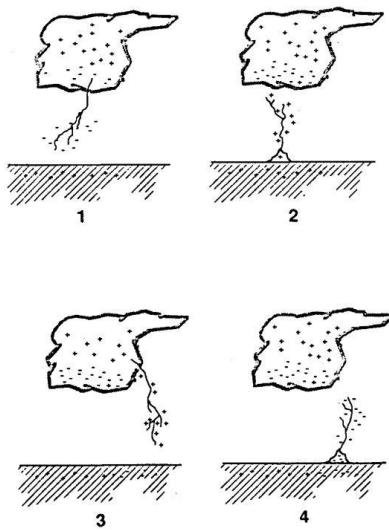
4.3 Tipos de descargas atmosféricas

A maioria dos estudos realizados com o objetivo de buscar a real estrutura elétrica de uma nuvem tem focado a cumulonimbus, ou nuvem de tempestade, conforme comumente conhecida, devido ao fato de este tipo de nuvem ser a que mais produz descargas atmosféricas [22].

As descargas atmosféricas entre a nuvem e a terra são identificadas e classificadas por quatro diferentes tipos em termos da direção de movimento (ascendente ou descendente) e do sinal da carga elétrica (positiva ou negativa), todos com relação ao processo de iniciação do líder [9].

Como apresentado anteriormente, estudos recentes mostraram que a base da nuvem de tempestade possui uma pequena região localizada de cargas positivas, sendo essa carga bastante pequena com relação às demais cargas presentes da nuvem.

A Figura 4.4 mostra a classificação dos quatro tipos de descargas atmosféricas com relação ao seu sentido e do sinal da carga elétrica.



Categoria	Origem	Carga do Líder
1	Nuvem	Negativa
2	Terra	Positiva
3	Nuvem	Positiva
4	Terra	Negativa

Figura 4.4 - Classificação das descargas atmosféricas quanto à sua origem (*Fonte: Martin A. Uman, 1994*)

4.3.1 Descarga Negativa Nuvem-Terra (Tipo 1) [9]

É o tipo de descarga atmosférica mais comum e representa aproximadamente 90% das descargas de origem nas nuvens e aproximadamente 45% de todas as descargas atmosféricas que ocorrem no mundo. Sua origem é na nuvem através de um líder carregado negativamente e de movimento descendente com sentido à terra. Dessa forma, uma descarga negativa nuvem-terra transfere cargas negativas para a terra.

4.3.2 Descarga Positiva Nuvem-Terra (Tipo 3) [9]

Esse tipo de descarga também se inicia com um líder que possui movimento descendente mas, ao contrário do que ocorre na descarga de tipo 1, esse líder é carregado positivamente, transferindo assim cargas positivas para a terra. As descargas positivas nuvem-terra representam menos de 10% das descargas nuvem-terra e 5% das descargas globais. Entretanto, o interesse nesse tipo de descarga se dá pelo fato de a transferência de carga ser muito maior do que a transferência de cargas que ocorre na descarga negativa nuvem-terra.

4.3.3 Descarga Ascendente (Tipos 2 e 4) [9]

As descargas ascendentes, também denominadas descargas terra-nuvem, são iniciadas por líderes ascendentes que se movem da terra em direção à nuvem sendo geralmente raras ocorrendo em topo de montanhas e altas estruturas.

A descarga tipo 2 possui um líder que é carregado positivamente e transfere carga negativa da nuvem para a terra enquanto que a descarga tipo 4 possui um líder carregado negativamente e transfere cargas positivas da nuvem para a terra.

4.4 O método dos Elementos Finitos

As cargas presentes nas nuvens geram, entre a nuvem e a terra, uma distribuição de potenciais elétricos que pode ser representada através de linhas equipotenciais cujo valor do potencial elétrico decresce à medida que se afasta da nuvem em direção à terra. Deste modo, um condutor vertical, tal como um mastro metálico ou uma haste para-raios, curto-circuita parte dessas linhas equipotenciais, de tal maneira que uma intensa concentração de campo elétrico é produzida na ponta dos mesmos, caracterizando a proteção oferecida pelas estruturas de captação de descargas atmosféricas. A Figura 4.5 ilustra essa situação.

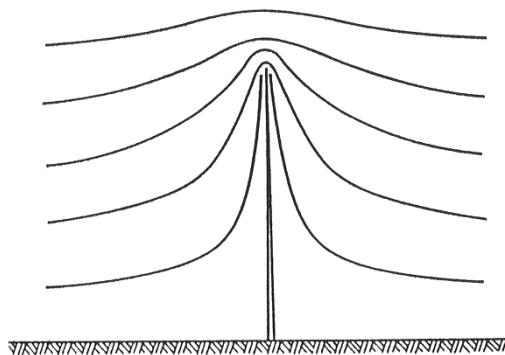


Figura 4.5 - Linhas equipotenciais curto-circuitadas (*Fonte: Galeno L. Gomes*)

O campo elétrico gerado por nuvens de tempestade carregadas é muito importante na análise de proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, pois o campo elétrico é o responsável pelo surgimento do efeito corona, gerando cargas no ar, e pelo desenvolvimento de líderes ascendentes a partir de estruturas. A distribuição espacial de campo elétrico ao redor de um ponto de possível impacto de uma descarga atmosférica em uma estrutura é, portanto, um fator importante na determinação da probabilidade da descarga incidir sobre esse ponto.

O método mais utilizado atualmente para o dimensionamento de SPDA foi mostrado no Capítulo 3, assim como sua característica puramente geométrica em detrimento de questões físicas sobre os fenômenos que envolvem a formação de uma descarga atmosférica.

Nos últimos anos, uma grande variedade de modelos para posicionamento de pararaios tem sido proposta considerando tais fenômenos de forma a complementar os modelos atualmente utilizados. Grande parte desses modelos surgiu de experimentos realizados em laboratório e, também, através de medições de campo durante a ocorrência de descargas reais e, por serem modelos que consideram os fenômenos físicos envolvidos em uma descarga atmosférica, um parâmetro fundamental é o detalhamento das informações sobre a distribuição de campo elétrico sobre as estruturas não apenas para várias posições diferentes de captores, mas também para várias posições de aproximação do líder descendente.

As informações sobre a distribuição e valores de campo elétrico são necessárias, primeiramente, para avaliar a condição necessária para romper a rigidez dielétrica do ar, o que

ocorre quando o campo elétrico atinge valores maiores que o limite mínimo para causar a ionização do ar. Além disso, essas informações também são necessárias para verificar a área de abrangência do campo elétrico e sua magnitude, o que determina se o líder ascendente vai se formar a partir de algum ponto ou se apenas apresentará efeito corona em suas proximidades [21].

No caso de uma descarga nuvem-terra que, por seu interesse prático é a mais importante e mais estudada, seu início ocorre no interior da nuvem sendo seu primeiro componente o líder descendente que surge em direção à terra através de saltos discretos. Estruturas na terra, neste estágio, não influenciam o caminho e a formação do líder descendente. A propagação do líder até a terra não ocorre de forma contínua, mas através de degraus discretos que formam o caminho em zig-zag. Ao aproximar-se da terra e objetos aterrados, líderes ascendentes se formam através das estruturas e tendem a se conectar ao líder descendente [20].

4.4.1 Condições para o surgimento do efeito corona e de líderes ascendentes

O critério mais importante que deve ser satisfeito em qualquer que seja o método utilizado no posicionamento de captores é o de que os captores devem ser o ponto de maior probabilidade de incidência de uma descarga com relação a todos os outros pontos da estrutura. Nos modelos físicos de posicionamento de captores, os quais levam em consideração a distribuição de campo elétrico, esse critério pode ser satisfeito através da análise da ocorrência de dois processos importantes na formação de um líder ascendente, sendo o primeiro deles a ionização do ar e surgimento do efeito corona e, em segundo lugar, o início de um líder ascendente e seu consequente desenvolvimento [21].

Há uma diferença de potencial entre a extremidade mais baixa do líder descendente e a terra de modo que, à medida que a extremidade do líder descendente se aproxima da superfície do solo, o campo elétrico em objetos pontiagudos no solo ou irregularidades na superfície, como mostrado na Figura 4.5, pode aumentar a ponto de romper a rigidez

dielétrica do ar. A Equação 4.1 apresenta o valor necessário de campo elétrico E_C que surge na ponta de uma haste de modo a manter de forma estável o efeito corona em função do raio r da extremidade da haste [23]:

$$E_C \cong 2,6 \times 10^6 \left[1 + \frac{0,127}{r^{0,435}} \right] \quad (4.1)$$

O campo elétrico E_C na ponta da haste é atingido quando campo elétrico ambiente E_A atinge um valor dado pela Equação 4.2 [21]:

$$E_A = \frac{E_C}{K_i} \quad (4.2)$$

Na Equação 4.2, K_i é uma constante adimensional definida como o grau de intensificação do campo elétrico ambiente quando da presença de outra estrutura e é dada pela relação entre o valor de campo elétrico que surge com a presença da estrutura pelo valor de campo elétrico ambiente sem a estrutura.

Com respeito à formação do líder ascendente, após o início das descargas de corona, a aproximação do líder descendente faz com que uma dessas descargas se desenvolva em um líder ascendente estável que interceptará o líder descendente. Os principais critérios para a formação do líder ascendente são o conceito de raio crítico (CR – *Critical radius*) e o limite crítico de intensificação do campo (CRFI – *Critical range of field intensification*) [21].

No conceito CR, a formação de um líder requer que o campo elétrico sobre uma descarga de corona seja de aproximadamente 3 MV/m . Além disso, o raio de ionização ao redor da ponta da haste na presença de efeito corona deve crescer a um valor mínimo de aproximadamente 38 cm para que o líder se desenvolva [24].

No conceito CRFI, descargas de corona que se iniciam a partir de uma haste ou outra estrutura qualquer aterrada, devem atingir um comprimento mínimo antes que um líder ascendente possa se desenvolver.

Quando essas condições se reúnem, uma ou mais descargas ascendentes são iniciadas a partir desses pontos e o processo de união entre o líder descendente e a descarga ascendente

ocorre. Quando uma das descargas ascendentes se conecta ao líder descendente, a algumas dezenas de metros acima do solo, o líder se torna efetivamente conectado ao potencial do solo criando um caminho através do ar ionizado.

4.4.2 O *software* FEMM

O FEMM (*Finite Element Method Magnetics*) [25] é um programa computacional utilizado para resolver problemas eletromagnéticos em 2D (duas dimensões) e, dentre as possibilidades de utilização do *software*, será utilizada a ferramenta de simulação de problemas eletrostáticos lineares.

Ao realizar a simulação de problemas eletrostáticos, o FEMM considera o comportamento da intensidade do campo elétrico E e a densidade de fluxo elétrico D . Existem duas condições que essas quantidades devem obedecer. A primeira condição diz respeito à forma diferencial da Lei de Gauss, que estabelece que o fluxo elétrico em qualquer volume fechado seja igual à carga contida nesse volume:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4.3)$$

onde ρ representa a densidade de cargas. A segunda condição é a forma diferencial da Lei Circuital de Ampére:

$$\nabla \times E = 0 \quad (4.4)$$

A relação entre a intensidade de campo elétrico e a densidade de fluxo elétrico é mostrada na Equação 4.5.

$$D = \epsilon E \quad (4.5)$$

onde ϵ representa a permissividade do meio.



Para simplificar o cálculo computacional dos campos elétricos que satisfaçam essas condições, o FEMM emprega o potencial elétrico V , definido, pela sua relação com E , através da Equação 4.6:

$$E = -\nabla V \quad (4.6)$$

Devido à identidade $\nabla \times \nabla f = 0$ para qualquer escalar f , a lei Circuital de Ampére é automaticamente satisfeita. Substituindo na Lei de Gauss, tem-se a equação diferencial parcial de segunda ordem:

$$-\varepsilon \nabla^2 V = \rho \quad (4.7)$$

que é aplicada em regiões de permissividade homogênea. O programa resolve a Equação 4.7 para uma tensão V , materiais e contornos definidos pelo usuário.

Todos os materiais e meios utilizados no FEMM em uma determinada modelagem, como, por exemplo, o ar ou um metal qualquer, devem possuir sua permissividade bem definida no momento da simulação. Caso o material desejado não esteja disponível no banco de dados do *software*, novos materiais podem ser adicionados desde que suas permissividades relativas sejam fornecidas. Além desse parâmetro, a análise de problemas eletrostáticos requer a especificação de tensões fixas e densidades de cargas para os condutores, contornos e pontos.

Para possibilitar a solução dos problemas eletrostáticos, o FEMM utiliza o método de triangulação de Delaunay [25]. No *software*, o valor mínimo para os ângulos dos triângulos gerados na malha pode ser definido. A Figura apresenta o resultado de uma malha resultante do processo de triangulação executado com o FEMM.

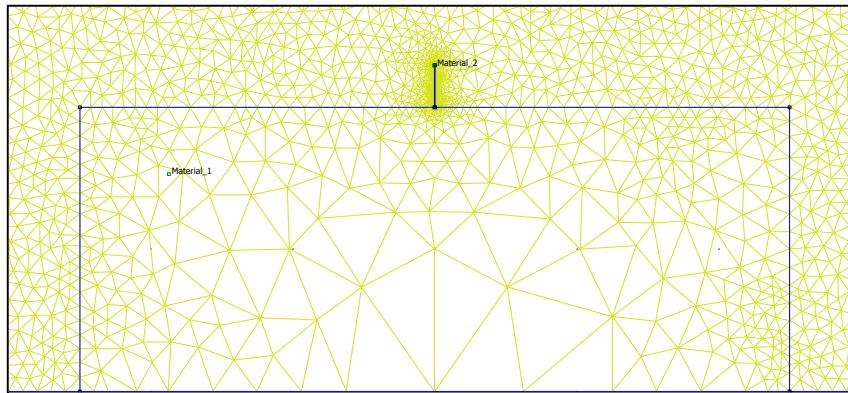


Figura 4.6 - Malha de triângulos executada no FEMM (*Fonte: Software FEMM*)

Com auxílio do *software* é possível visualizar a distribuição de campo elétrico sobre uma estrutura, de forma a observar os locais onde sua intensidade é maior ou menor em comparação com o valor de campo elétrico necessário para que ocorra um líder ascendente assim como em relação aos campos que surgem em estruturas vizinhas. Deste modo, é possível determinar as áreas de maior probabilidade de incidência de uma descarga, já que são essas as regiões a partir das quais os líderes ascendentes se formam. No caso da instalação de um SPDA, a aplicação do Método dos Elementos Finitos e a visualização dos resultados das simulações realizadas através do *software*, deve ser observado se existem valores de campo elétrico elevados nas estruturas a serem protegidas. Caso isso ocorra, pode-se concluir que os captores para-raios não estão cumprindo sua função de proteção da estrutura contra uma descarga. Neste caso o projeto deve ser refeito de modo a ajustar o SPDA para que esteja instalado de forma correta.

4.4.3 A utilização do FEMM no projeto de SPDA

Neste tópico, será apresentado um exemplo simplificado de como o Método dos Elementos Finitos pode ser utilizado na avaliação do bom posicionamento de captores em um SPDA. Para isso, será utilizada no FEMM, a modelagem de uma estrutura retangular de largura 50 m e altura 20 m com um captor de 3 m no centro da estrutura. Na lateral direita da mesma estrutura, a fim de verificar o comportamento da distribuição de campo elétrico devido

a variações na geometria da estrutura, é considerada uma platibanda de altura igual a 1,5 m acima da cobertura.

A definição dos potenciais, quantidade de carga, propriedades dos materiais e dos limites da simulação são fundamentais nos casos onde a simulação eletrostática é utilizada. No caso em que a distribuição de campo elétrico sobre uma estrutura em uma situação de possível descarga atmosférica é o foco da simulação, é importante, portanto, ter definido os seguintes parâmetros:

- Diferença de potencial entre a nuvem de tempestade e a superfície do solo;
- Altura da nuvem de tempestade com relação ao solo;
- Quantidade de carga elétrica distribuída ao longo do líder descendente;
- Distância entre o líder descendente e a ponta da haste;
- Diferença de potencial entre a haste e o solo.
- Permissividade dos materiais sendo, neste caso, do ar e dos materiais que compõem a estrutura e a haste;

Na definição da diferença de potencial entre a nuvem de tempestade e o solo, foi definido um potencial para a nuvem de tal forma que o campo elétrico ambiente seja, em média, próximo de 10 kV/m. Deste modo, foi definido um potencial de 20 MV para uma nuvem localizada 3 km sobre a estrutura [2].

Conectado à nuvem e distante 45 m da ponta da haste, foi considerada a presença de um líder descendente cujo total de cargas distribuídas ao longo de seu comprimento foi definido como sendo 5 C. Para a haste, foi considerado um potencial elétrico igual ao do solo já que, em sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, os captores estão aterrados através dos condutores de descida.

Com relação aos valores de permissividade relativa utilizados na simulação, a Tabela 4.2 apresenta os materiais utilizados e suas respectivas permissividades. É necessário ressaltar que os valores de permissividade aqui adotados são aqueles padronizados para as condições de ar úmido e temperatura de 20 °C. O valor de 1,0014 relativo ao ar úmido foi utilizado para definir a permissividade do ar na simulação, pois o ar úmido é a situação mais comum em um contexto de descarga atmosférica. Para uma umidade de 60% e temperatura de 20 °C, a

permisividade relativa do ar é de 1,0014 [26] sendo, portanto, o valor de permisividade utilizado nas simulações.

Tabela 4.2 – Permissividade relativa dos materiais utilizados na simulação

Material	Permissividade [F/m]
Ar úmido	1,0014
Haste (Alumínio)	7,3 [27]
Concreto	4,94 [28]

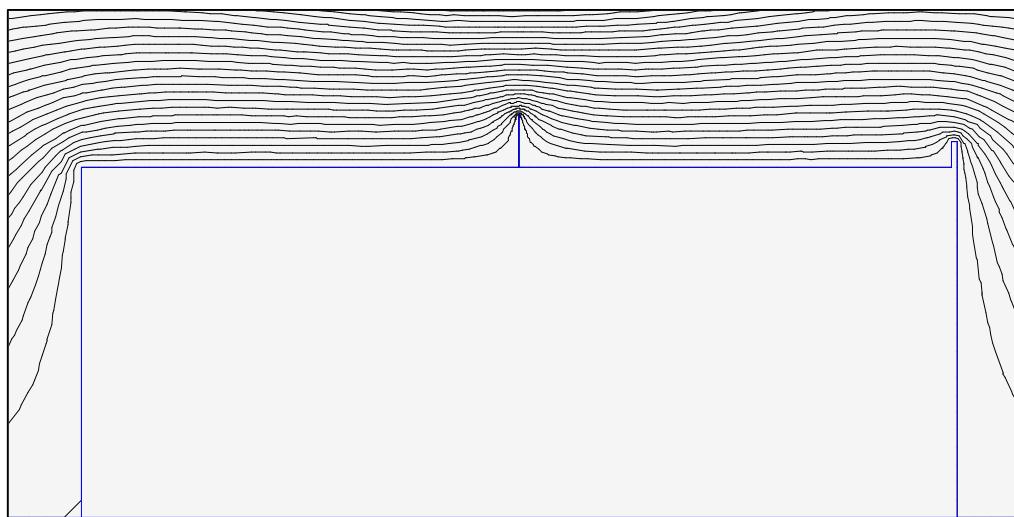


Figura 4.7 - Linhas equipotenciais sobre uma estrutura com captor central devido à influência de um campo elétrico gerado pela aproximação de um líder descendente (*Fonte: Software FEMM*)

Para preparação da simulação, foi criado um líder descendente sobre o captor, e distante 45 m da ponta do mesmo. A carga total atribuída ao líder descendente foi definida com o valor de 5 C [2].

Da simulação apresentada na Figura 4.7, foram medidos os valores de campo elétrico na quina superior esquerda da estrutura, na ponta da haste e no topo da platibanda, que se encontra acima da estrutura em seu canto direito. A curva obtida para os valores de campo elétrico em função do comprimento analisado da estrutura é apresentada na Figura 4.8 assim como os valores medidos nos locais citados são mostrados na Tabela 4.3.

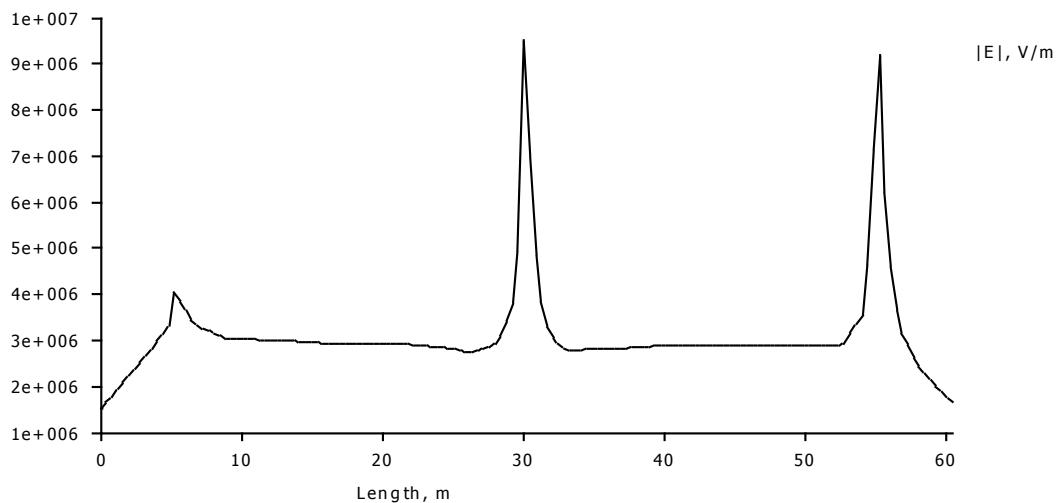


Figura 4.8 - Valores de campo elétrico retirados da simulação no FEMM e medidos ao longo do comprimento da estrutura.

(Fonte: Software FEMM)

Tabela 4.3 - Intensidade do campo elétrico em 3 pontos distintos da estrutura

Ponto medido	Campo elétrico [MV/m]
Canto esquerdo	4,3
Haste	9,8
Platibanda	9,3

Os resultados mostram que, neste caso, o valor de campo elétrico na haste é consideravelmente maior do que os 3 MV/m necessários para o início das descargas de corona devido à aproximação do líder descendente e, portanto, com a aproximação do líder descendente e aumento da intensidade do campo, a haste provavelmente irá emitir um líder ascendente que por sua vez poderá interceptar a descarga descendente. O campo elétrico na platibanda e no canto esquerdo também excede 3 MV/m e por isso, ali também provavelmente ocorrerá a emissão de um líder ascendente que também poderá interceptar o descendente causando falha do SPDA e danos à estrutura. Situação semelhante é mostrada na Figura 3.16, onde há a formação de mais de um líder ascendente com interceptação de somente um deles. Essa análise pode servir, portanto, de suporte para a verificação do bom posicionamento dos captores de um SPDA, já que os valores de campo elétrico sobre as estruturas são considerados fundamentais no processo de formação e encontro do líder ascendente com o líder descendente.



4.5 Conclusões parciais

Neste capítulo, foi apresentada a estrutura mais aceita com relação ao posicionamento e intensidade dos centros de cargas elétricas que se formam em uma nuvem de tempestade. A estrutura elétrica da nuvem tem sido importante para o estudo do comportamento do campo elétrico ambiente sobre a superfície terrestre [2] e a Teoria da Precipitação, aquela mais aceita para explicar a formação da estrutura elétrica tripolar de uma nuvem de tempestade foi apresentada.

Enfim, a verificação da distribuição de campo elétrico sobre uma superfície e objetos aterrados foi apresentada com o auxílio do programa computacional FEMM, que possibilita a verificação da distribuição e intensidade de campo elétrico sobre uma estrutura modelada. Com essa ferramenta, foi possível analisar a possibilidade de ocorrência de uma descarga atmosférica num ponto onde o campo elétrico ultrapassa o valor mínimo para o surgimento de uma descarga ascendente que interceptará o líder descendente.

Assim, sugere-se a utilização do Método dos Elementos Finitos para análises eletrostáticas que possam contribuir para o projeto de SPDA tornando os modelos atuais mais completos ao considerar fenômenos físicos importantes que envolvem uma descarga atmosférica como, por exemplo, a distorção do campo elétrico e a influência de estruturas vizinhas dentro do volume de proteção.

Capítulo 5

Análise transitória do subsistema de descida de um SPDA



5.1 Considerações iniciais

Até o presente capítulo, apenas o subsistema de captação foi abordado com maiores detalhes. Além desse, os subsistemas de descida e de aterrramento são partes fundamentais de um SPDA já que cada um possui funções importantes na condução da corrente de descarga captada pelo subsistema captor até o solo.

O subsistema de descida é a segunda parte de um SPDA e sua função é a de conduzir a corrente da descarga atmosférica até o subsistema de aterrramento desde que garantida a condutividade elétrica entre a captação e o aterramento. Entretanto, a passagem de uma corrente elétrica com as características próprias de uma descarga atmosférica faz com que os condutores sejam submetidos a elevados níveis de tensão durante o comportamento transitório que a corrente elétrica adquire em seu trajeto até o solo. Além disso, vários problemas surgem em decorrência dos campos eletromagnéticos que surgem com a passagem da corrente elétrica.

Por fim, a terceira e última parte de um SPDA é seu subsistema de aterrramento cujo objetivo é conduzir e dispersar a corrente elétrica no solo sem causar danos às pessoas ou instalações internas e à estrutura protegida [5]. Em geral, recomenda-se uma resistência de aterrramento baixa, se possível menor que 10 Ohms medidos em baixa frequência de forma a facilitar ao máximo a passagem da corrente elétrica ao solo [8].

Neste capítulo, serão apresentados com mais detalhes esses dois subsistemas levando em consideração o estudo transitório dos efeitos causados pela passagem da corrente elétrica de uma descarga pelo subsistema de descida.

5.2 Subsistema de Descida

Este tópico não possui objetivo de ser usado como guia para o projeto e instalação de descidas para um SPDA. A consulta à norma em vigor se torna indispensável por conter vários detalhes de projeto. O objetivo aqui é o de apresentar o que são as descidas a fim de poder analisar seu comportamento quando da ocorrência direta de uma descarga atmosférica.

Interligando os captores à malha de terra, as descidas são distribuídas ao longo do perímetro da estrutura. Na norma brasileira, um SPDA pode se enquadrar em duas situações distintas com relação à distância que o afasta do volume a proteger. A primeira delas é quando os captores e as descidas são instalados suficientemente afastados do volume a proteger, de modo a reduzir a probabilidade de centelhamento perigoso. A outra situação é quando se tem os captores e os condutores de descida instalados de modo que o trajeto da corrente de descarga atmosférica pode estar em contato com o volume a proteger [8]. Neste estudo, será considerado um SPDA não isolado do volume a proteger, já que as descidas e os captores se encontram, normalmente, próximos à estrutura.

Para este caso, a norma recomenda que os condutores de descida sejam distribuídos ao longo do perímetro do volume a ser protegido de tal maneira que seu espaçamento médio não seja superior aos indicados na Tabela 5.1. A escolha da quantidade e da posição dos condutores de descida deve levar também em conta o fato de que a corrente de uma descarga se divide pelos condutores de forma que quanto maior a quantidade de condutores de descida, menor a intensidade de corrente elétrica que circulará por cada um deles, diminuindo assim o risco de centelhamento e distúrbios internos à estrutura devido aos campos eletromagnéticos [5].

Tabela 5.1 - Espaçamento médio entre captores de descida não naturais conforme nível de proteção

Nível de proteção	Espaçamento médio [m]
I	10
II	15
III	20
IV	25

Sempre que possível, um condutor de descida deve ser instalado a cada canto da estrutura a ser protegida. Todos os condutores devem ser instalados de forma que estabeleçam um circuito fechado interligando os captores à malha de terra através do caminho mais direto e curto possível [8]. No exemplo a seguir, é considerada uma estrutura residencial de 20x20 metros com altura de 40 m. Sendo assim, a estrutura se enquadra no nível III de proteção, o que requer que o espaçamento médio entre os condutores de descida seja de 20 m. Assim, será considerado um condutor de descida em cada um dos cantos da estrutura totalizando 4 descidas.

Além de obedecer ao espaçamento apresentado na Tabela 5.1, os condutores de descida devem ser instalados de forma mais simétrica possível ao longo do perímetro da estrutura. A distribuição da corrente elétrica pelos condutores de descida é facilitada também com a instalação dos anéis de cintamento. De acordo com a norma brasileira, os condutores de descida devem ser interligados por meio de condutores horizontais, formando tais anéis. Aquele formado pela malha de aterramento deve ser considerado como sendo o primeiro deles quando sua instalação for possível. Caso não seja possível, um anel deve ser instalado a no máximo 4 m de altura com relação ao solo e os demais a cada 20 m [8]. As seções mínimas dos materiais utilizados no SPDA são apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Seções mínimas dos materiais do SPDA

Material	Captor e anéis intermediários [mm ²]	Descidas (para estruturas de altura até 20 m) [mm ²]	Descidas (para estruturas de altura superior a 20 m) [mm ²]	Eletrodo de aterramento [mm ²]
Cobre	35	16	35	50
Alumínio	70	25	70	-
Aço galvanizado a quente embutido	50	50	50	80

5.3 O estudo computacional das descidas submetidas a uma corrente de descarga atmosférica

A finalidade dos Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), sendo projetados em função disto, é interceptar todas as descargas que possam causar danos ao objeto protegido (prédio ou instalação elétrica) e escoá-las para o solo [29].

A passagem de uma descarga de corrente pelos condutores de descida de um SPDA, assim como em qualquer outro condutor, gera tensões de valores muito elevados em função do elevado valor de pico da corrente característica de uma descarga atmosférica, em torno de 30 kA [30].

O objetivo deste tópico é, portanto, estudar o comportamento transitório da tensão em diferentes pontos do condutor de descida de um SPDA, gerado pela passagem de uma corrente de descarga atmosférica ao longo de todo seu comprimento através da modelagem das descidas e da malha de aterramento.

Modelagem e simulação computacionais de sistemas físicos são técnicas utilizadas em diversas situações na engenharia. O entendimento dessas técnicas permite o maior entendimento das características de funcionamento de um sistema ao permitir a representação de um fenômeno real para análise e estudos. A simulação também permite comparar e identificar, entre as soluções, as mais adequadas a serem aplicadas quando necessárias.

Em geral, as simulações realizadas em engenharia elétrica são baseadas nas técnicas do domínio da frequência ou do domínio do tempo. O estudo no domínio da frequência é utilizado principalmente para análises em regime permanente enquanto que a técnica baseada no domínio do tempo é utilizada para a análise de fenômenos transitórios. Dentre as principais plataformas convencionais no domínio do tempo, destacam-se: ATP, SABER, MATLAB, PSPICE EWB [31], etc. Neste trabalho, foi utilizado o programa EMTP (ATPDraw).

O desenvolvimento do EMTP (*Electromagnetic Transient Program*) iniciou-se a partir da década de 60 e, com o passar dos anos, o programa foi sofrendo alterações de diversos colaboradores do mundo todo tornando-se uma ferramenta poderosa em estudos de

transitórios em sistemas elétricos. Em 1984 foi criada uma nova versão do EMTP, denominada ATP – *Alternative Transient Program*, que constitui a continuação das versões anteriores do programa [32].

O ATP sempre se mostrou um programa de difícil manejo, entretanto, durante os últimos anos foram desenvolvidos vários programas de apoio que têm facilitado a sua utilização para qualquer tipo de usuário. Entre as facilidades mais recentes podem ser citadas as novas versões do pré-processador gráfico ATPDraw, o programa de suporte LCC e o programa gráfico PLOTXY, além das diferentes opções de versões para o próprio ATP [31].

5.4 O SPDA

5.4.1 A representação da descarga atmosférica

Para a simulação de uma descarga atmosférica há, no programa ATP, uma ferramenta capaz de representar uma fonte de surto de corrente ou tensão, cujos parâmetros podem ser inseridos de forma a se obter o comportamento desejado para o surto.

Sabe-se que uma forma de onda da corrente de uma descarga atmosférica é definida pelo seu tempo de subida t_{cr} (ou tempo de crista), pelo seu tempo de cauda t_{cd} e pela sua amplitude I (ou valor de pico). Com o objetivo de representar a forma de onda dessa corrente de uma forma analítica, é adotada a representação através da soma de duas exponenciais, como apresentado na Equação 5.1.

$$i(t) = I(e^{-\alpha't} - e^{-\beta't}) \quad (5.1)$$

onde α' e β' são constantes que determinam as características de subida e descida da onda. Apesar de serem as constantes α' e β' responsáveis por tais características, a aproximação analítica não é perfeita devido ao formato da onda em forma de impulso característica de uma

descarga atmosférica. Por isso, um fator adicional A_f deve ser introduzido na Equação 5.1 de forma a se conseguir formas de onda mais precisas [33].

$$i(t) = A_f I(e^{-\alpha' t} - e^{-\beta' t}) \quad (5.2)$$

Derivando, tem-se:

$$\frac{di(t)}{dt} = A_f I(-\alpha' e^{-\alpha' t} + \beta' e^{-\beta' t}) \quad (5.3)$$

No valor de pico da corrente, a Equação 5.3 deve satisfazer a condição:

$$\frac{di(t_{max})}{dt} = A_f I(-\alpha' e^{-\alpha' t_{max}} + \beta' e^{-\beta' t_{max}}) = 0 \quad (5.4)$$

onde t_{max} é o tempo necessário para que a corrente elétrica atinja seu valor de pico. Da Equação 5.4, o tempo t_{max} pode ser expresso por:

$$t_{max} = \frac{\ln(\beta') - \ln(\alpha')}{(\beta' - \alpha')} \quad (5.5)$$

Substituindo a Equação 5.5 na Equação 5.2, tem-se:

$$i(t_{max}) = A_f I(e^{-\alpha' t_{max}} - e^{-\beta' t_{max}}) \quad (5.6)$$

Como resultado, o fator A_f é dado por:

$$A_f(\alpha', \beta') = \left(e^{-\alpha' \frac{\ln(\beta') - \ln(\alpha')}{(\beta' - \alpha')}} - e^{-\beta' \frac{\ln(\beta') - \ln(\alpha')}{(\beta' - \alpha')}} \right)^{-1} \quad (5.7)$$

A partir das equações 5.2 a 5.7 é possível criar, portanto, expressões arbitrárias com exponenciais duplas com a variação de α' , β' e A_f .

Os valores de α' , β' e A_f podem ser determinados numericamente através de procedimentos matemáticos de ajuste de curvas. A Tabela 5.3 apresenta alguns valores de α' , β' e A_f para quatro formas de onda com propriedades diferentes [33].

Tabela 5.3 - Constantes para diferentes formas de onda

Parâmetro	A	$\alpha' [s^{-1}]$	$\beta' [s^{-1}]$
0,25/100 μs	1,002	$7,00 \times 10^3$	$3,40 \times 10^7$
1,2/50 μs	1,037	$1,47 \times 10^4$	$2,47 \times 10^6$
2,5/50 μs	1,058	$1,50 \times 10^4$	$1,86 \times 10^6$
10/350 μs	1.025	$2,05 \times 10^3$	$5,64 \times 10^5$

Neste estudo, será adotada uma corrente de descarga atmosférica de característica 1,2/50 μs , o que significa que o valor de pico da corrente, adotado como sendo de 30 kA [30], ocorre em um tempo $t_{cr} = 1,2 \mu s$ e que esse valor de pico cai pela metade em um tempo $t_{cd} = 50 \mu s$. Para isso, serão utilizados, portanto, $\alpha' = 1,47 \times 10^4$ e $\beta' = 2,47 \times 10^6$. A Figura 5.1 apresenta a janela de propriedades da fonte de surto como é apresentada no ATPDraw para inserção dos seus parâmetros. Pode-se perceber os valores de amplitude, de α' (A) e de β' (B) já inseridos. Os valores de α' (A) e β' (B) devem ser inseridos com um sinal negativo para ondas de impulso [34].

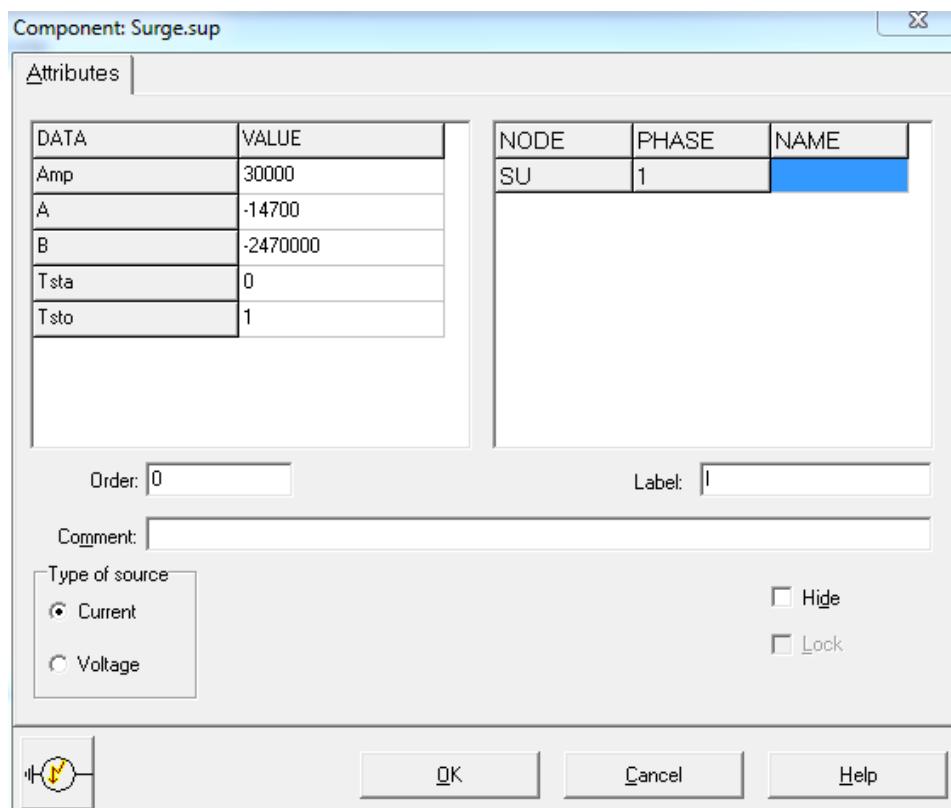


Figura 5.1 - Janela de parâmetros da fonte de surto (Fonte: Software ATP)

A Figura 5.2 mostra a forma de onda da corrente elétrica obtida no próprio *software* ATPDraw a partir dos parâmetros inseridos. Pode-se perceber que, como desejado, o valor de crista de 30 kA foi atingido em um tempo $t_{cr} = 1,2\text{ }\mu\text{s}$ e que após um tempo de cauda $t_{cd} = 50\text{ }\mu\text{s}$ seu valor já se encontra pela metade do valor de pico.

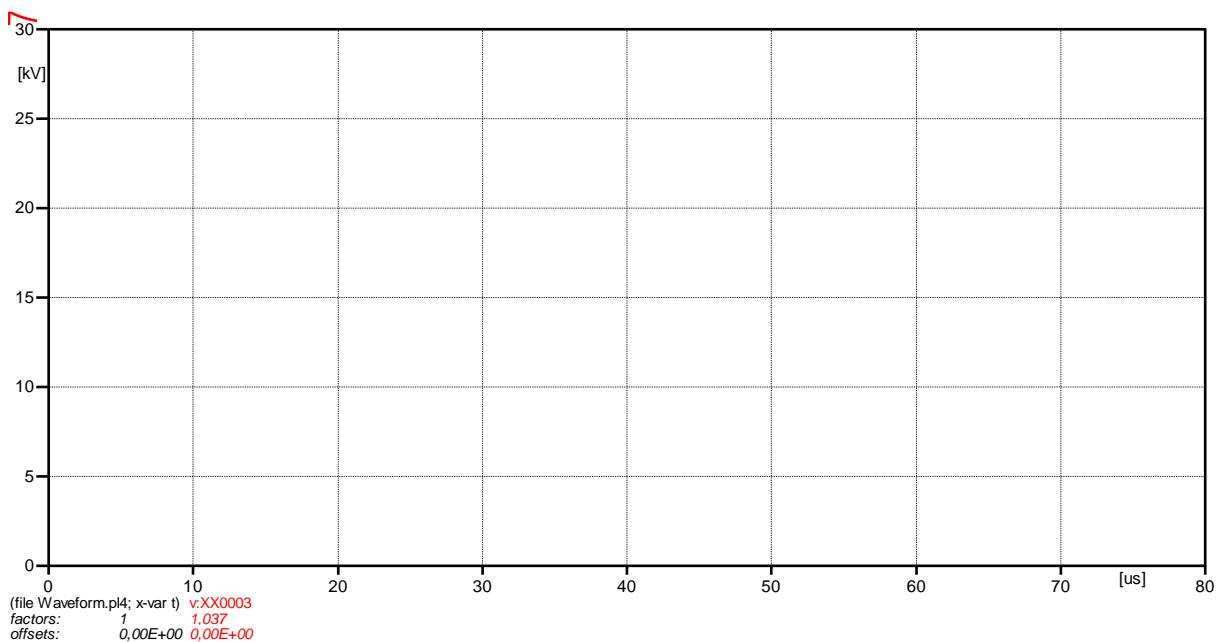


Figura 5.2 - Forma de onda de uma descarga atmosférica 1,2/50 μ s (Fonte: Software ATP)

5.4.2 A representação dos condutores de descida

A representação dos condutores de descida será feita através da modelagem desses condutores via circuitos PI equivalentes. Na modelagem do condutor de descida do SPDA, foi considerado um sistema fictício cujo condutor de descida possui um comprimento total de 40 metros até a malha de terra, cuja modelagem será mostrada adiante. Para representar a descida do SPDA modelada, foi utilizada a modelagem do condutor via parâmetros distribuídos com circuitos PI equivalentes, para os quais foram fornecidos os valores de resistividade e indutância série, assim como os valores de capacitância para o solo em função da disposição vertical do condutor em relação ao solo. Para a melhor representação do modelo, o comprimento de 40 metros do condutor foi dividido em 2 partes de forma que o condutor total foi então representado por 2 circuitos com um comprimento equivalente a 20 metros cada.

A Figura 5.3 apresenta a janela de propriedades da linha como é apresentada no ATPDraw para inserção dos seus parâmetros e é disponibilizada a partir de um duplo clique no ícone identificado na Figura 5.4.

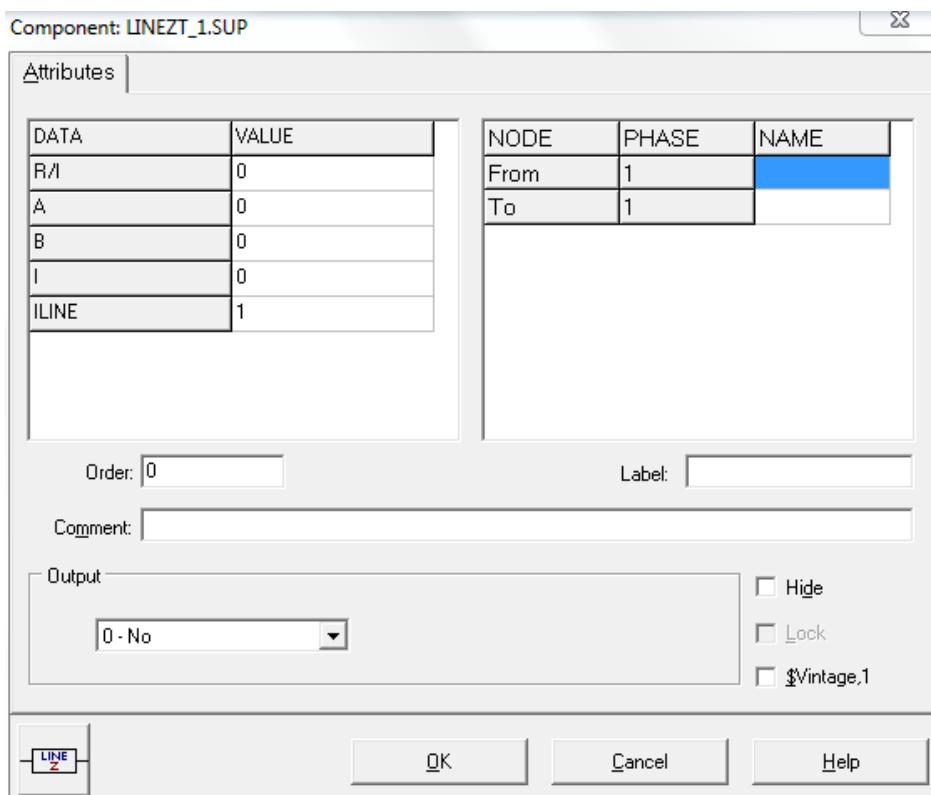


Figura 5.3 - Janela de propriedades da linha (Fonte: Software ATP)



Figura 5.4 - A linha representada no ATPDraw (Fonte: Software ATP)

Através da janela de atributos apresentada na Figura 5.3, tem-se acesso aos seguintes dados da linha:

- R/I - Resistência por comprimento em [Ohm/unidade de medida];
- A - Indutância L em [mH/unidade de medida];
- B - Capacitância C em [μ F/unidade de medida];
- I - Comprimento da linha.
- ILINE - Varia de 0 a 2 e define como os parâmetros A e B devem ser informados ao programa. Neste caso, ILINE foi definido como 0 para que os parâmetros A e B sejam informados em mH e μ F respectivamente.



O cabo adotado para representar as descidas possui seção nominal de 35 mm² e diâmetro externo de 5,1 mm. Para este cabo, a resistência de catálogo é de 0,538 Ohms/km [35].

5.4.2.1 Definição das capacidades dos condutores

Em linhas de transmissão modeladas através de parâmetros distribuídos, a indutância e a capacidade são parâmetros constantes ao longo de todo o comprimento da linha [36]. Entretanto, na análise de um condutor perpendicular à terra, como é no caso deste estudo, a capacidade do condutor para a terra varia à medida que o ponto medido se afasta ou se aproxima do solo.

Sabe-se que a capacidade é definida pela energia armazenada na forma de campo elétrico em um meio dielétrico que separa dois meios com determinada diferença de potencial entre eles, de forma que, quanto menor for a distância que os separam, maior será o valor de capacidade entre eles. Portanto, o que poderá ser observado é que a capacidade do cabo para a terra aumenta à medida que, percorrendo o cabo, se aproxima do solo.

Devido a esse valor de capacidade variável ao longo do condutor, o cabo que representa a descida do SPDA foi representado em 2 partes cujos valores de capacidade foram considerados constantes ao longo de cada uma dessas partes.

Os valores de capacidade para cada um dos 2 circuitos utilizados na modelagem do cabo foram obtidos com auxílio da ferramenta computacional FEMM, que é utilizado para resolver problemas de natureza eletromagnética em duas dimensões utilizando o método de Elementos Finitos e que já foi apresentado no Item 4.4.2.

A partir da realização de uma análise eletrostática utilizando o FEMM, pode-se, portanto, obter os valores de capacidade para o cabo em função da sua posição com relação ao solo, da quantidade de carga e da tensão aplicada aos condutores.

A Figura 5.5 apresenta a forma como os condutores foram subdivididos em 2 partes de 20 metros de altura. Esse comprimento foi escolhido em função da necessidade de se instalar um anel de cintamento nos primeiros 20 metros acima do solo.

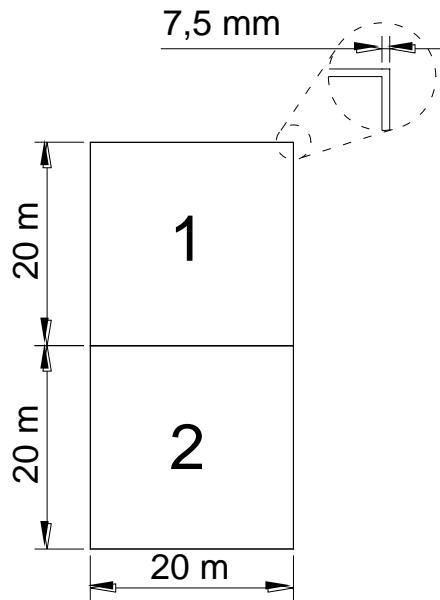


Figura 5.5 - Divisão dos condutores de descida (*Fonte: Autor*)

Como se pode observar, por se tratar de uma análise em duas dimensões, foi considerado um dos lados da estrutura de forma que os valores de capacitância foram medidos para o circuito 1 (superior) e para o circuito 2 (inferior).

A Figura 5.6 apresenta o circuito superior modelado no FEMM e o resultado da simulação.

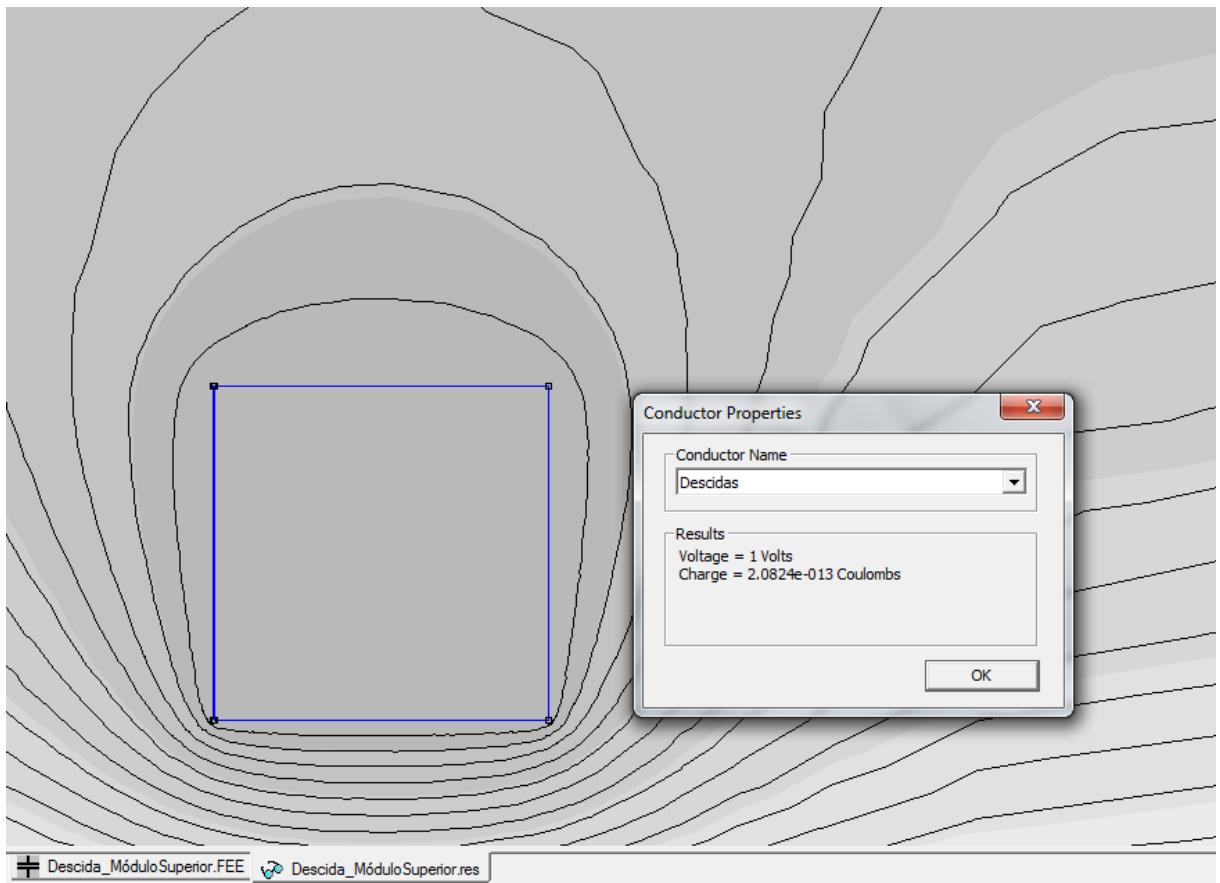


Figura 5.6 - Valores de Tensão e carga para o módulo superior (*Fonte: Software FEMM*)

Como mostrado na Figura 5.6, foi aplicada ao condutor uma tensão de 1 V, o que resultou em uma carga de $2,08 \times 10^{-13} C$ armazenada no mesmo. Com esses valores, e desconsiderando quaisquer quantidades de carga elétrica no ar entre os condutores e a terra, pode-se obter o valor da capacidade para o solo através da Equação 5.8 [37].

$$C = \frac{Q}{U} \quad (5.8)$$

Os valores de capacidade obtidos no FEMM para cada um dos 2 circuitos são, em ordem crescente, mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Valores de capacidade para os circuitos que compõem as descidas

Círcuito	Capacitância
1	0,208 pF
2	261,3 pF

Esses valores de capacidade são utilizados no ATP para simular as capacidades para a terra equivalentes para cada um dos quatro lados da estrutura.

5.4.2.2 Definição das indutâncias dos condutores

Os valores de indutância para os condutores de descida foram escolhidos em função dos valores de capacidade encontrados nas simulações realizadas no FEMM e descritas no Item 5.4.2.1.

Estudos realizados em torres de linhas de transmissão mostram que a velocidade de propagação de um surto atmosférico através da torre se encontra entre 85% e 90% da velocidade da luz, resultados que foram também comprovados através de medidas experimentais [38] [39]. Sendo assim, considerando a velocidade de propagação do surto através das descidas como sendo de $270 \times 10^6 \text{ m/s}$, e que a velocidade de propagação do surto é dada pela Equação 5.9 [40], tem-se os valores de indutância calculados para os circuitos 1 e 2 apresentados na Tabela 5.5.

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (5.9)$$

Tabela 5.5 - Valores de indutância para os circuitos que compõem as descidas

Círcuito	Indutância
1	65,9 μH
2	52,5 $n\text{H}$

5.4.2.3 Definição da malha de aterramento

Existem diferentes formas de se projetar e executar um sistema de aterramento desde formas simples até configurações mais complexas de condutores horizontais e hastes verticais interligadas entre si.

Para assegurar a dispersão da corrente de uma descarga atmosférica na terra sem causar sobretensões perigosas, o arranjo e as dimensões do subsistema de aterramento são mais importantes que o próprio valor da resistência de aterramento. Entretanto, recomenda-se uma resistência de aterramento de aproximadamente 10Ω , como forma de reduzir os gradientes de potencial no solo e a probabilidade de centelhamento perigoso [8].

Uma vez definida a configuração de uma malha de aterramento, o desafio em realizar uma perfeita modelagem matemática para que as simulações dos fenômenos transitórios possam ser as mais reais possíveis é bem grande. Isso acontece pelo fato de uma malha de terra ser composta por uma série de condutores paralelos e perpendiculares que são interligados e conectados a hastes de aterramento em algumas de suas conexões.

Neste trabalho, para realizar a modelagem da malha de aterramento, será utilizado novamente a representação de cada um dos componentes da malha através de modelos PI's constituídos de indutância e resistência para a terra, como mostra a Figura 5.7.

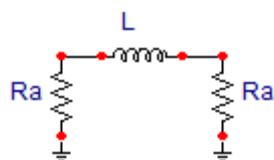


Figura 5.7 - Modelo de circuito PI para os condutores e hastes de aterramento (Fonte: Autor, Software ATP)

Na análise feita neste trabalho, o objetivo não é o de estudar o comportamento da malha de aterramento quanto ao seu comportamento transitório, tensões de passo ou resistência de aterramento. O que realmente interessa é a forma como a corrente enxerga a malha de aterramento através de uma impedância equivalente, pois assim, tem-se a partir de uma impedância o fenômeno da reflexão de ondas no cabo. Dessa forma, a malha de

aterramento será representada através de um anel que circunda a estrutura e que, por sua vez, terá cada um de seus lados representados por um único circuito PI.

As hastes de aterramento possuem comprimento em torno de 3 m, valor este que produz uma indutância praticamente desprezível quando comparada à indutância do cabo. Assim, a haste de aterramento será representada somente pela sua resistência de aterramento.

Para o levantamento dos valores de indutância dos cabos da malha de aterramento, foi utilizada a ferramenta do ATP chamada *Cable Constants*. As rotinas *Cable Constants* calculam matrizes de resistências, indutâncias, condutâncias e capacitâncias para cabos subterrâneos. Essas rotinas podem também ser utilizadas para gerarem modelos para estes cabos tanto para análise transitória no domínio do tempo quanto para análises no domínio da frequência [41].

A partir da simulação com o *Cable Constants*, foi encontrado um valor de indutância igual a $39,6 \mu\text{H}$ considerando um condutor de 20 m, de resistividade igual a $1,72 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ e disposto 30 cm abaixo do nível do solo. Assim, cada um dos lados da malha de aterramento foi modelado por um circuito PI igual ao mostrado na Figura 5.8.

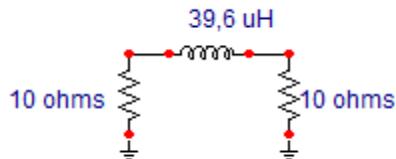


Figura 5.8 - Valores do circuito PI para os condutores e hastes de aterramento (Fonte: Autor, Software ATP)

Enfim, com o valor de resistência do condutor extraído de catálogo, com os valores de capacitância simulados e os de indutância calculados, foi montado o circuito apresentado na Figura 5.9, que representa os quatro condutores de descida interligados por um anel no topo da estrutura (40 m), outro na metade da estrutura (20 m) e outro no início da estrutura (0 m – anel do sistema de aterramento).

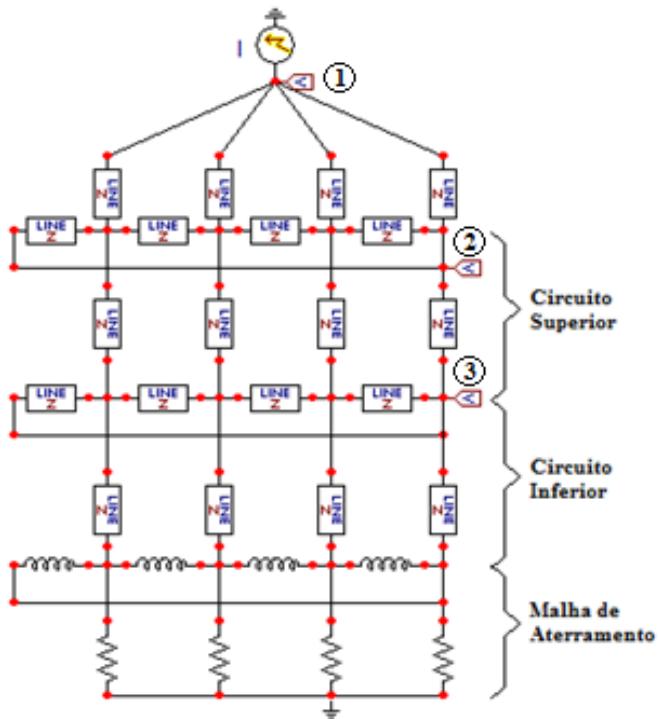


Figura 5.9 - Circuito representante dos três subsistemas de um SPDA (Fonte: Autor, Software ATP)

5.5 Simulação computacional

5.5.1 Considerações

A simulação da descarga atmosférica percorrendo o circuito apresentado na Figura 5.9, que representa os três subsistemas de um SPDA, permite a visualização dos potenciais elétricos que surgem na ponta do captor, assim como nas descidas, em decorrência da corrente de descarga que circula pelas impedâncias características do sistema.

Conforme apresentado no Item 4.4, a distribuição de campo elétrico sobre o captor e sobre a estrutura a ser protegida é de fundamental importância na definição das regiões nas quais a probabilidade de incidência de uma descarga é maior em função da maior possibilidade de surgimento de líderes ascendentes nesses pontos.

Em função disso, o objetivo da simulação do comportamento transitório das descidas de um SPDA em função da ocorrência de uma descarga é verificar o quanto as tensões que surgem ao longo do SPDA interferem na distribuição de campo elétrico ao redor da estrutura, e que consequências isso pode ter com relação às condições para o surgimento de novos líderes ascendentes.

A análise da distribuição de campo elétrico em momento anterior à descarga, com o objetivo de verificar a proteção, já foi apresentada no Item 4.4.3. Por esse motivo, esta análise não será novamente apresentada aqui, dando atenção apenas aos resultados de novas simulações.

5.5.2 ATP

A Figura 5.105.10 apresenta o resultado da simulação, no ATP, do circuito apresentado na Figura 5.9. Como pode ser percebido na legenda da figura, foram dadas as mesmas nomenclaturas apresentadas na Figura 5.9 para os três pontos analisados, sendo:

- **Ponto 1:** Captor;
- **Ponto 2:** Topo da estrutura;
- **Ponto 3:** Anel de cintamento, a 20 m de altura com relação ao solo.

Assim, a curva em vermelho representa a tensão medida no ponto 1 assim como as curvas em cores verde e azul representam, respectivamente, as tensões verificadas nos pontos 2 e 3. Além disso, pode-se perceber que o fenômeno transitório é muito rápido já que a corrente de descarga também ocorre em um período muito curto de tempo. A análise foi realizada para um tempo t igual a $2 \mu s$.

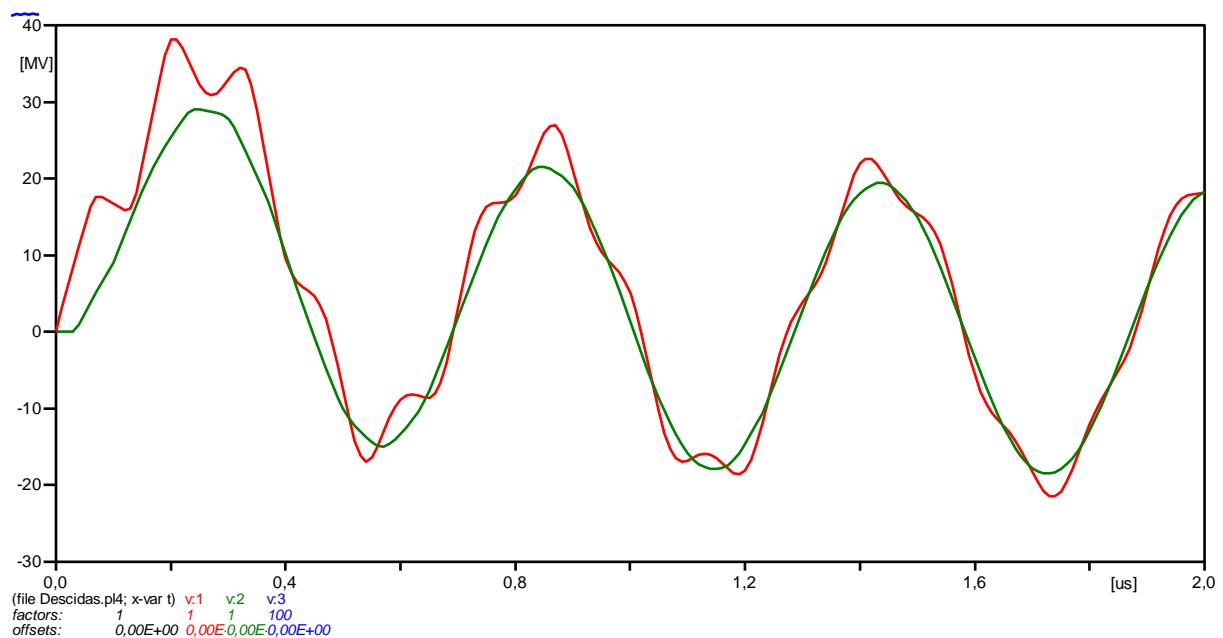


Figura 5.10 - Tensões resultantes da passagem de uma descarga pelo SPDA (Fonte: Software ATP)

Considerando que o objetivo é verificar a tensão que surge na ponta do captor, será dada atenção especial à curva de cor vermelha, que representa os valores de tensão nesse ponto ao longo do tempo.

O valor obtido de aproximadamente $38,17\text{ MV}$, quando aplicado ao captor na análise eletrostática realizada no FEMM, possibilita a verificação de que a distribuição de campo elétrico ao redor da haste se altera devido à presença desse potencial elétrico. Além disso, pode-se perceber que os valores de campo elétrico permanecem elevados a ponto de criar as condições necessárias para o surgimento de novos líderes ascendentes a partir do captor. A Figura 5.11 apresenta o resultado da simulação de uma estrutura com um potencial de $38,17\text{ MV}$ aplicado ao captor. Pode-se perceber a grande concentração de campo elétrico sobre o captor através da distribuição de cores sobre a estrutura.

O valore de $38,17\text{ MV}$ foi utilizado com o objetivo de ilustrar a alteração na distribuição de campo elétrico e intensificação do mesmo sobre a haste. Cada estrutura em particular, dependendo da configuração de suas descidas, bitola de cabos utilizada, resistência de aterramento ou valor da corrente da descarga, por exemplo, apresentará uma valor de potencial na haste.

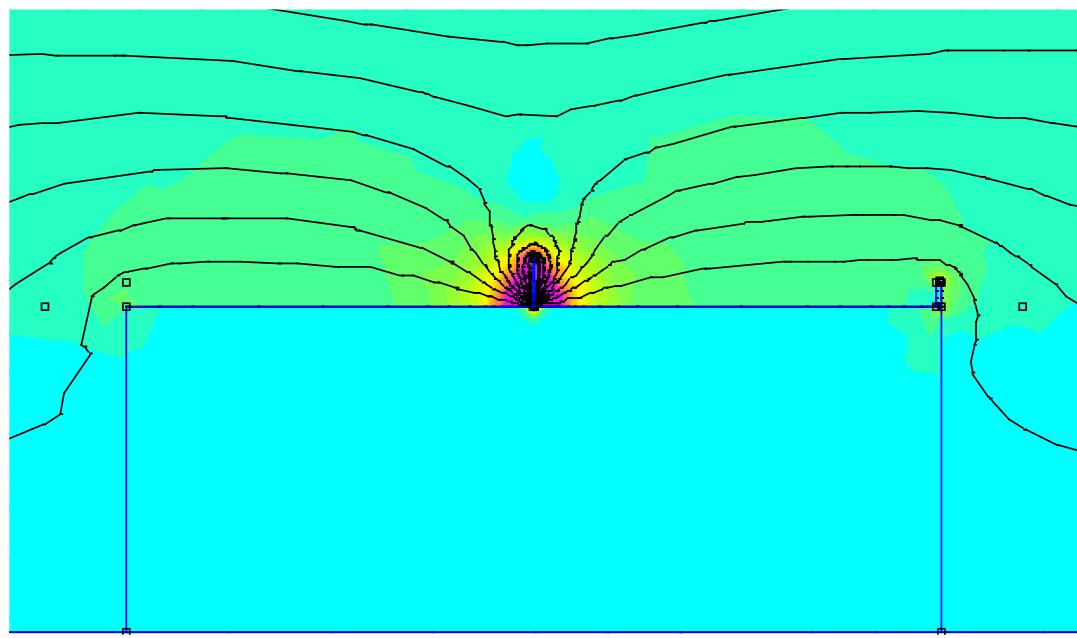


Figura 5.11 - Distribuição de campo elétrico (em cores) e linhas equipotenciais sobre a estrutura (Fonte: Software FEMM)

A Figura 5.12, de forma análoga à Figura 4.8, apresenta os valores de campo elétrico nos mesmos pontos simulados anteriormente através do FEMM.

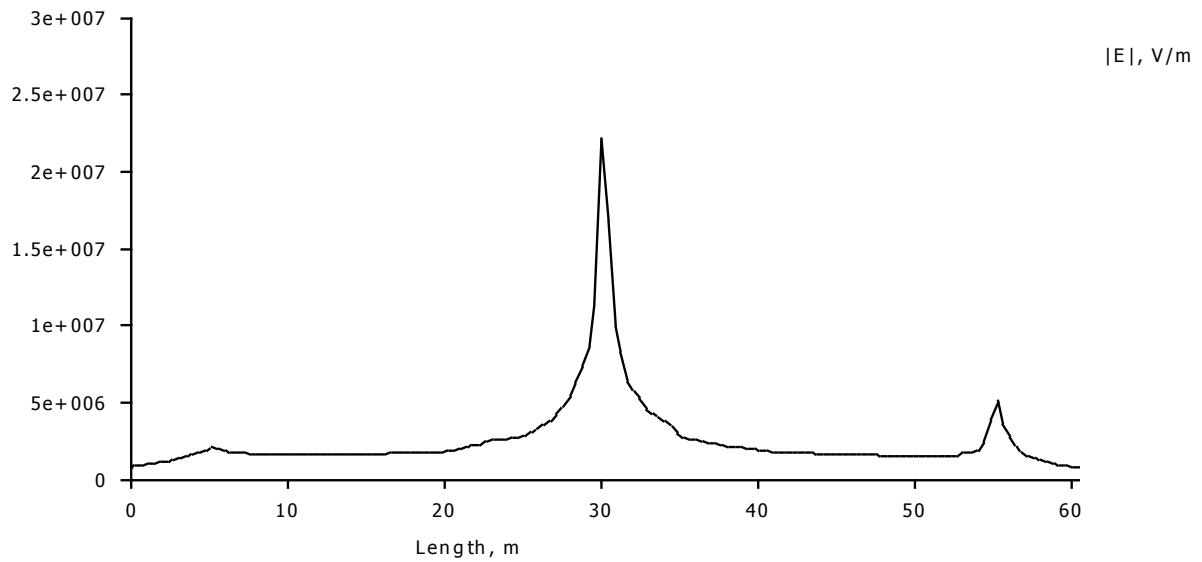


Figura 5.12 - Valores de campo elétrico sobre a estrutura com tensão de 38,17 MV aplicada ao captor (Fonte: Software FEMM)



Conforme se esperava, o valor de campo elétrico que surge no captor durante a passagem da corrente de uma descarga atmosférica pelos condutores de descida do SPDA se torna elevado devido à presença, neste ponto, de um elevado valor de potencial elétrico, o que mantém as condições necessárias para a ocorrência de novas descargas nesse ponto.

5.6 Conclusões parciais

Neste capítulo, foi dada atenção especial ao subsistema de descidas de um SPDA, que possui importante função na condução de uma descarga à terra com segurança. Devido às inúmeras formas e detalhes construtivos que envolvem a instalação desse subsistema, não foi objetivo desse texto discutir tais questões construtivas mas sim, verificar a influência do comportamento transitório das descidas quando submetidas à passagem de uma corrente proveniente de uma descarga atmosférica.

A modelagem computacional utilizando o ATP mostrou-se satisfatória pela possibilidade de se detalhar os condutores com suas propriedades elétricas assim como suas interligações. Da mesma forma, a modelagem da fonte de surto possibilitou uma simulação bastante próxima do comportamento real da corrente de uma descarga atmosférica com relação aos seus tempos de crista e de cauda.

O auxílio do *software* FEMM e o Método dos Elementos Finitos se mostrou útil na obtenção das capacitâncias dos condutores de descida para a terra, que são parâmetros de fundamental importância na modelagem do sistema utilizando-se o ATP. Dessa forma, o Método dos Elementos Finitos se mostrou útil em mais uma aplicação envolvendo a análise de SPDA.

Enfim, verificou-se que o comportamento das linhas equipotenciais, assim como do campo elétrico na ponta de um captor realmente sofre alterações durante o período transitório em que uma descarga atmosférica circula pelas descidas em direção à malha de aterramento. Esse fenômeno gera, no captor, condições necessárias para o surgimento de novos líderes ascendentes, possibilitando que talvez novas descargas aconteçam no mesmo local.



Capítulo 6

Estudo de caso

6.1 Considerações iniciais

A aplicação do Método dos Elementos Finitos para verificar a distribuição de campo elétrico em uma situação real exige, como foi mostrado nos capítulos anteriores, a modelagem da estrutura a ser estudada.

Neste capítulo, será apresentado um estudo de caso no qual serão utilizadas as aplicações descritas nos capítulos anteriores tendo como objeto o Bloco 5O da Universidade Federal de Uberlândia.

6.2 Verificação da necessidade de instalação do SPDA

Este item apresenta a aplicação do método descrito no Item 2.2 deste trabalho com o objetivo de analisar a necessidade de se instalar um SPDA no bloco 5O da Universidade Federal de Uberlândia. A Figura 6.1 apresenta a localização do bloco 5O no campus Santa Mônica da universidade.



Figura 6.1 - Localização do bloco 5O no campus Santa Mônica (Fonte: <http://www.portal.prefeitura.ufu.br>, nov. 2011)

Consultando o mapa de curvas isoceráunicas da região sudeste, pode-se perceber que, próximo à região em que se encontra a cidade de Uberlândia, o número T_d de dias de trovoada por ano é de 100.

Com relação aos fatores de ponderação que devem ser aplicados à frequência média anual previsível N_d de descargas atmosféricas por ano, tem-se que, para a estrutura do bloco 5O, os seguintes fatores devem ser aplicados:

- **Fator A:** Escolas, hospitais, creches e outras instituições, estruturas de múltiplas atividades;
- **Fator B:** Estrutura de aço revestida, ou de concreto armado, com cobertura metálica;
- **Fator C:** Escolas, hospitais, creches e outras instituições, locais de afluência de público;
- **Fator D:** Estrutura localizada em uma grande área contendo estruturas ou árvores de mesma altura ou mais alta (por exemplo, em grandes cidades ou em florestas);
- **Fator E:** Elevações moderadas, colinas.

Sendo assim, têm-se na Tabela 6.1 os fatores de ponderação utilizados:

Tabela 6.1 - Fatores de ponderação para o bloco 5O

FATOR	VALOR
Fator A	1,7
Fator B	0,8
Fator C	1,7
Fator D	0,4
Fator E	1

Enfim, de acordo com os dados solicitados para avaliação da necessidade de um SPDA, faltam os dados relativos à altura, comprimento e largura da estrutura. A Figura 6.2 apresenta a planta do pavimento térreo do bloco 5O e nela são apresentadas as cotas com os valores de largura e comprimento do bloco.

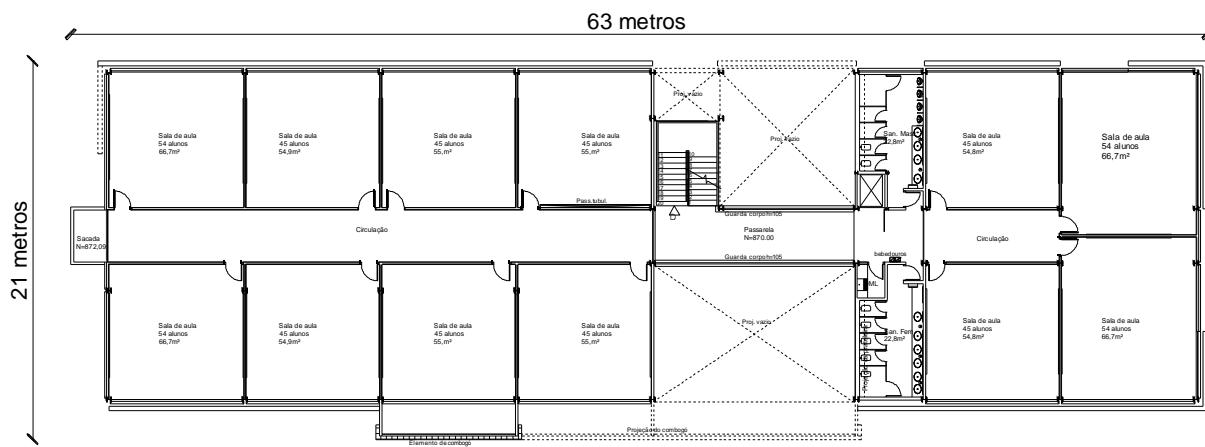


Figura 6.2 - Largura e comprimento do bloco 5O (Fonte: Projeto arquitetônico do bloco 5O)

A Figura 6.3 apresenta um corte do bloco através do qual se pode verificar sua altura. Neste caso, considerando o ponto mais alto do bloco, tem-se uma altura total de 13 metros com relação ao solo.

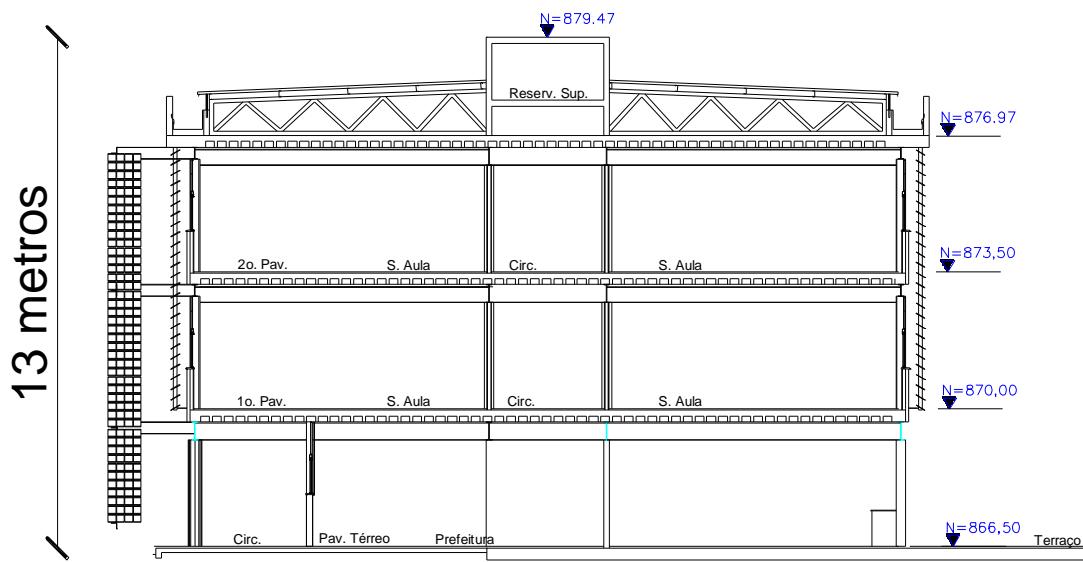


Figura 6.3 - Corte do bloco 5O e sua altura (Fonte: Projeto arquitetônico do bloco 5O)

Portanto, tendo disponíveis os fatores de ponderação assim como o número T_d de dias de trovoadas por ano e as medidas relativas à largura, ao comprimento e à altura do bloco, pode-se utilizar o guia apresentado no Item 2.3 para verificar se há a necessidade de se implantar um SPDA no bloco 5O.

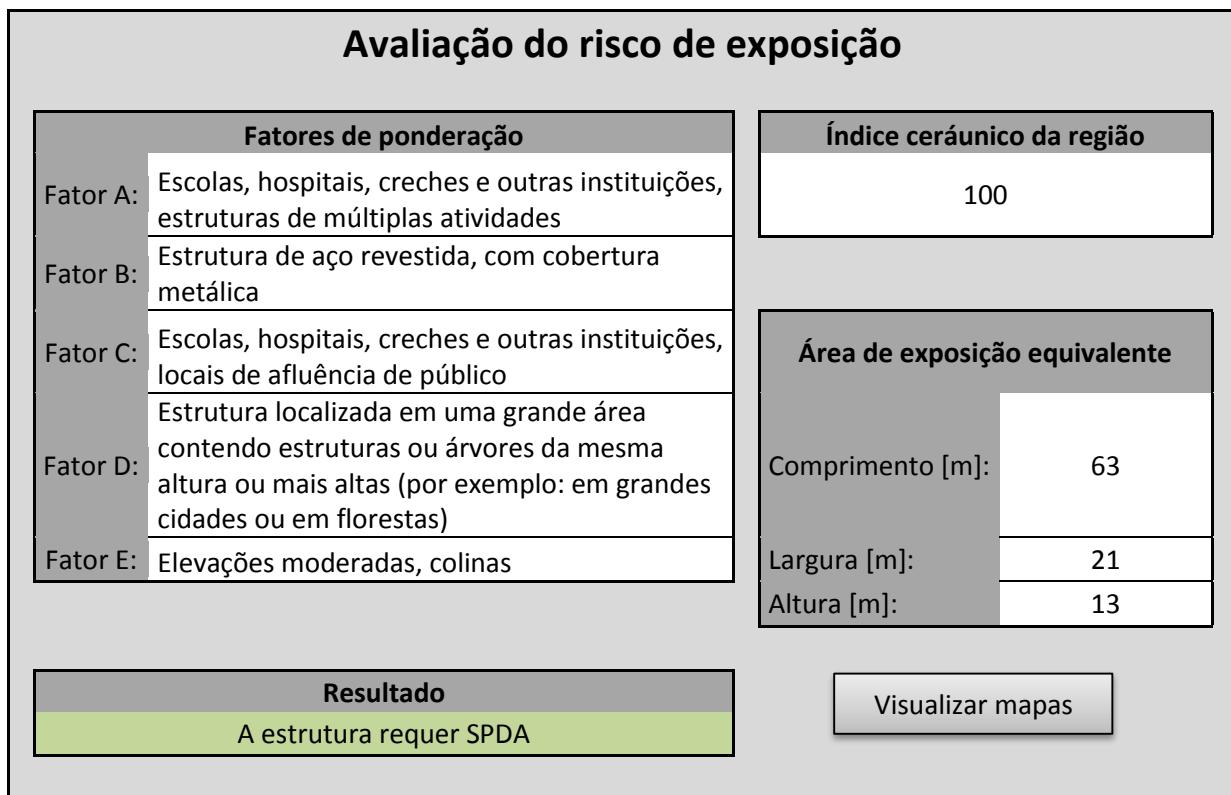


Figura 6.4 - Avaliação do risco de exposição do bloco 5O

Pela aplicação do método definido na NBR 5419:2005 através do guia apresentado no Item 2.3, conclui-se que a estrutura relativa ao bloco 5O necessita que um sistema de proteção contra descargas atmosféricas seja instalado, como mostra o resultado da avaliação na Figura 6.4.

Sendo assim, justifica-se o estudo da implantação de um SPDA sobre o mesmo.

6.3 Aplicação do Modelo Eletrogeométrico

Em função do resultado da análise realizada no Item 6.2, que mostra a necessidade de se proteger o bloco 5O com um SPDA, será apresentado neste item o procedimento para verificação do correto posicionamento do sistema de captores instalado sobre o bloco obedecendo às regras estabelecidas pela norma brasileira.

Pelo exposto no Item 2.2.5 e em conformidade com a Tabela B.6, presente no anexo B da NBR 5419:2005, o nível de proteção exigido para uma estrutura classificada como comum do tipo escola é o nível II. Portanto, como mostrado na Tabela 3.1, o raio da esfera rolante para o nível de proteção II é de 30 metros.

A Figura 6.5 apresenta o projeto de SPDA do bloco 5O. Pode-se perceber que foi utilizada apenas uma haste captora tipo Franklin com altura de 3 m sobre o reservatório de água. Além da haste, foram instalados condutores horizontais formando uma malha sobre o telhado e indicados na figura por linhas azuis. Dessa maneira, o subsistema de captação do bloco é formado por diferentes tipos de captores, sendo eles hastas e condutores horizontais. As setas nas quinas da estrutura e distribuídas pelo perímetro do bloco indicam nos locais onde foram instalados cabos de cobre nu com seção 25 mm², formando assim o subsistema de descida.

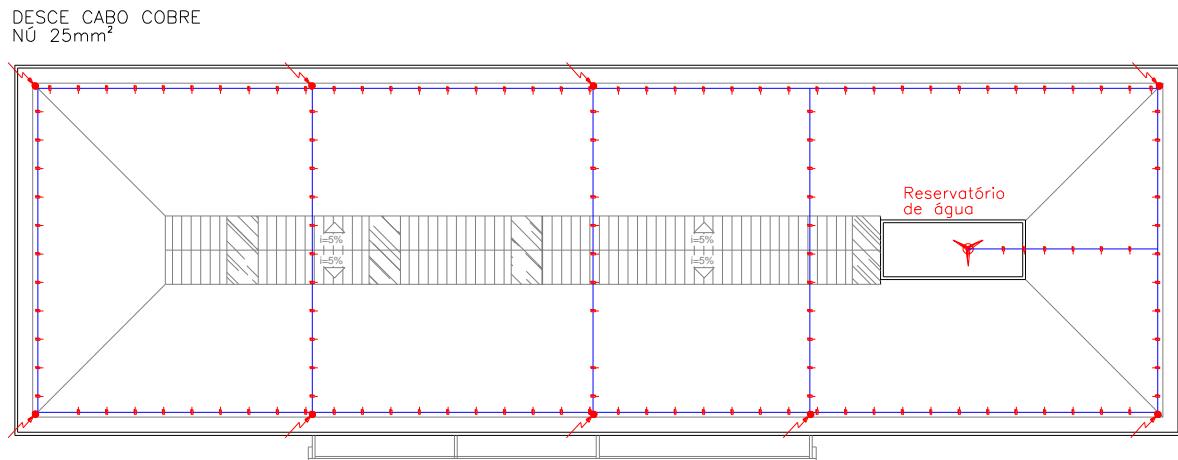


Figura 6.5 - SPDA instalado sobre o bloco 5O (*Fonte: Projeto arquitetônico do bloco 5O*)

A Figura 6.6, apresenta o Método da Esfera Rolante aplicado ao corte longitudinal do bloco. Pelo método, alguns pontos não estão protegidos, como pode ser visto no *zoom* apresentado na Figura 6.7. Esses pontos desprotegidos são indicados através de linhas em cor vermelha.

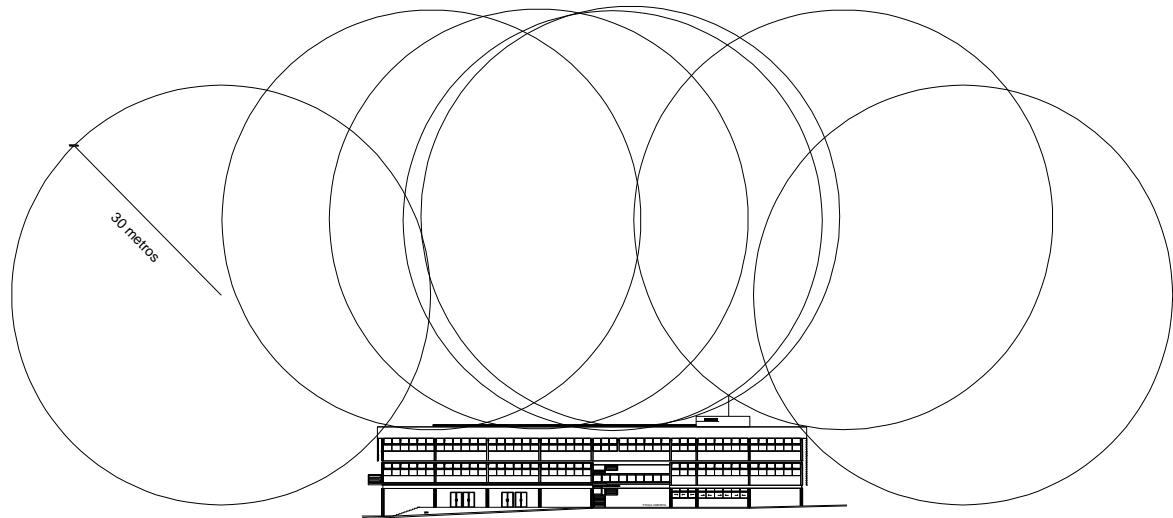


Figura 6.6 - Aplicação do Método da Esfera Rolante sobre o bloco 5O (*Fonte: Projeto arquitetônico do bloco 5O*)

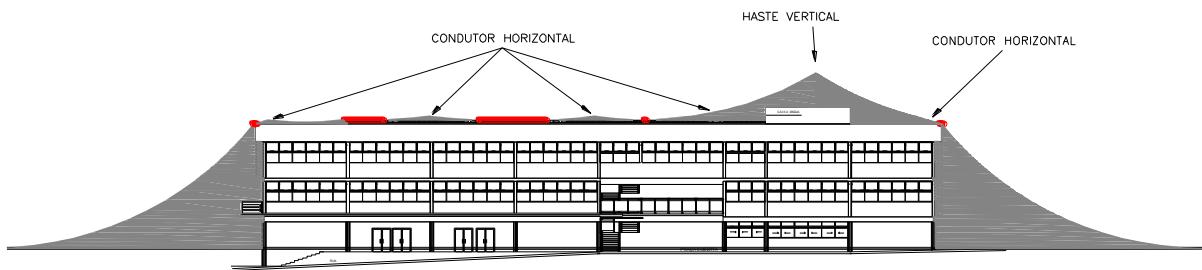


Figura 6.7 - Verificação das áreas desprotegidas – corte longitudinal (*Fonte: Projeto arquitetônico do bloco 5O*)

De forma semelhante, o mesmo estudo apresentado na Figura 6.7 deve ser realizado para o corte transversal do bloco. Entretanto, existem diferenças entre os volumes de proteção nos lados direito e esquerdo do bloco. Isso ocorre devido à presença de uma haste vertical apenas no lado direito do bloco. O resultado da aplicação do Método da Esfera Rolante nessa situação é como se mostra na Figura 6.8 e na Figura 6.9. Pode-se perceber que realmente existem certas regiões da estrutura desprotegidas segundo o critério estabelecido pelo Modelo Eletrogeométrico.



Figura 6.8 - Verificação das áreas desprotegidas – corte transversal lado direito (*Fonte: Projeto arquitetônico do bloco 5O*)

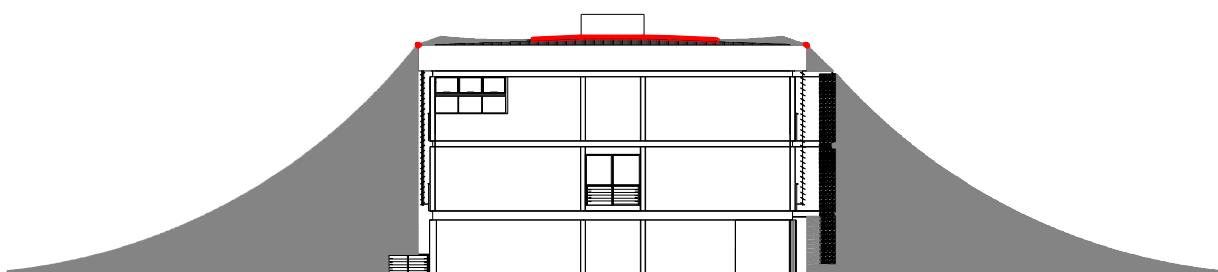


Figura 6.9 - Verificação das áreas desprotegidas – corte transversal lado esquerdo (*Fonte: Projeto arquitetônico do bloco 5O*)



Com o objetivo de comparar o resultado apresentado nas Figura 6.7, Figura 6.8 e Figura 6.9 (quando aplicado o Modelo Eletrogeométrico através do Método da Esfera Rolante) ao resultado obtido através de simulações computacionais utilizando-se o *software* FEMM, será apresentada a simulação computacional da mesma estrutura, porém utilizando-se o Método dos Elementos Finitos.

6.4 Aplicação do Método dos Elementos Finitos

Neste item, será apresentado o resultado da simulação eletrostática considerando o SPDA instalado sobre o bloco 5O. O procedimento utilizado é semelhante àquele apresentado nos Itens 4.4.2 e 4.4.3.

Antes de iniciar a simulação, deve-se fazer a modelagem da estrutura a ser estudada. De forma a facilitar esse processo, já que o objetivo do *software* FEMM não é o de ser uma poderosa ferramenta de desenho, o programa conta, como mostra a Figura 6.106.10, com a possibilidade de importar arquivos de desenho em formato *dxf*, arquivo de intercâmbio para modelos de desenho CAD, o que facilita o estudo de estruturas mais complexas. Deste modo, como os cortes do bloco 5O já se encontram disponíveis em desenho CAD, estes arquivos serão importados para o FEMM e utilizados na simulação computacional.

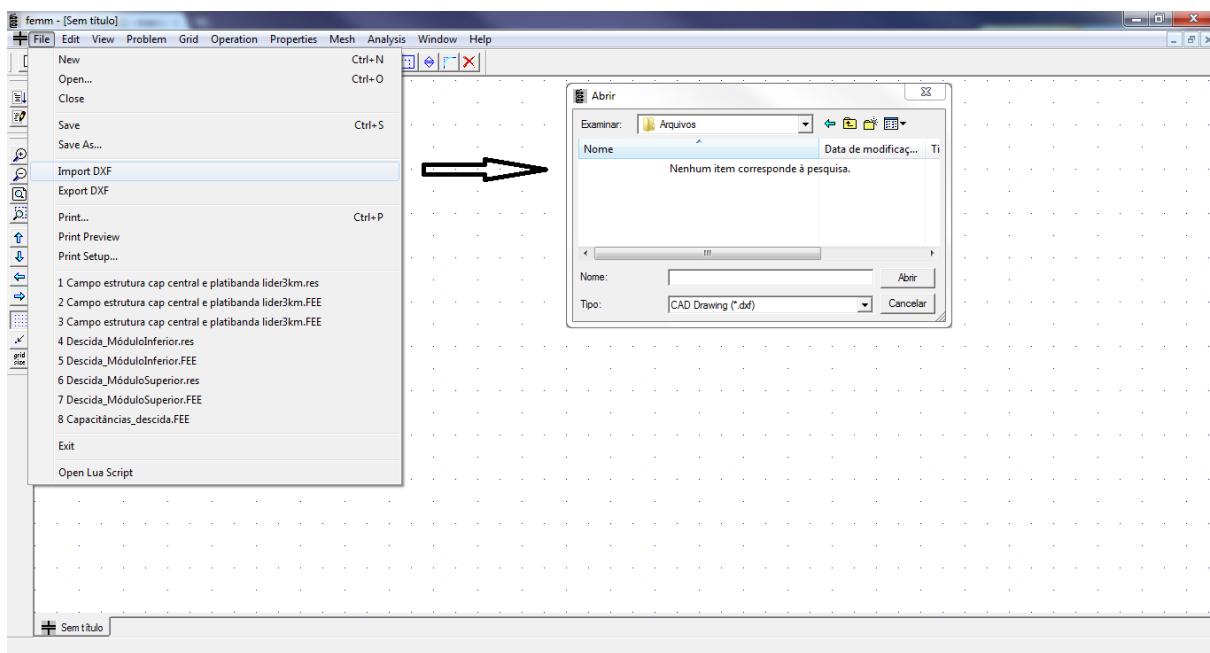


Figura 6.10 - Possibilidade de se importar arquivos de desenho no FEMM (Fonte: Software FEMM)

O próximo passo após importar o desenho para o FEMM é a definição dos seguintes itens:

- **Materiais (Materials):** Define-se para cada material seu nome e os valores de permissividade relativa.
- **Condições de contorno (Boundary Properties):** Neste parâmetro, é inserido, além do nome que identifica a condição, um valor fixo de potencial elétrico ou um valor de densidade superficial de cargas.

A Figura 6.11 apresenta os contornos da estrutura do bloco 5O já no *software* FEMM. Pode-se perceber a definição de materiais para cada uma das partes da estrutura, cujas propriedades são mostradas na Tabela 6.2.

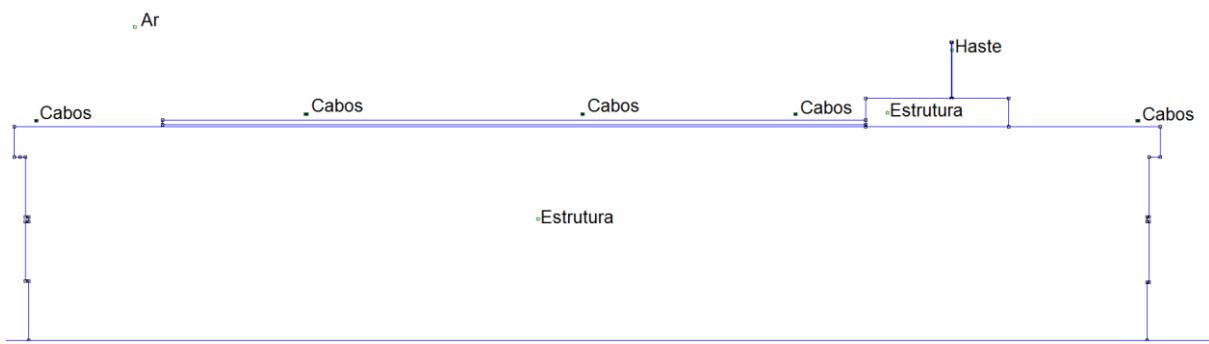


Figura 6.11 - Bloco 5O no FEMM e definição de materiais (*Fonte: Software FEMM*)

Tabela 6.2 - Valores de permissividade utilizados na simulação

Estrutura	Material	Permissividade Relativa
Ar	Ar úmido	1,0014
Estrutura	Concreto	4,94
Haste	Alumínio	7,3 [27]
Cabos	Cobre	18,1 [42]

Para apresentação dos resultados das simulações, serão apresentadas três situações distintas *A*, *B* e *C* nas quais a diferença se encontra na aproximação do líder descendente. Desse modo, tem-se:

- **Situação A:** Aproximação do líder descendente em uma das extremidades da estrutura;
- **Situação B:** Aproximação do líder descendente na outra extremidade da estrutura;
- **Situação C:** Aproximação do líder descendente no centro da estrutura.

Além disso, será analisado o valor de campo em 10 pontos distintos, compreendendo estrutura, condutores horizontais e a haste. A Figura 6.12 apresenta os pontos *A*, *B* e *C* assim como os pontos a serem analisados, por sua vez numerados de 1 a 10.

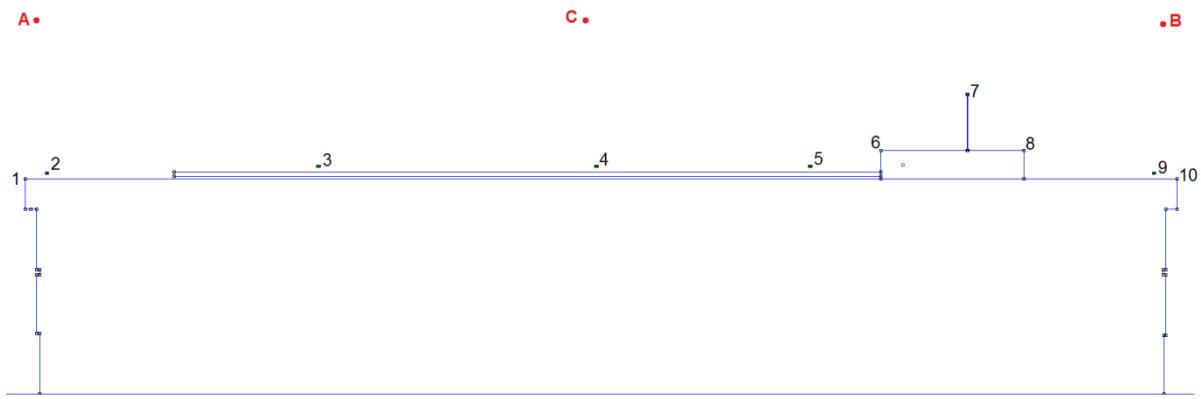


Figura 6.12 - Aproximação do líder descendente e pontos analisados (*Fonte: Software FEMM*)

Na Figura 6.13, tem-se o resultado da simulação realizada com o líder descendente configurado na situação C.

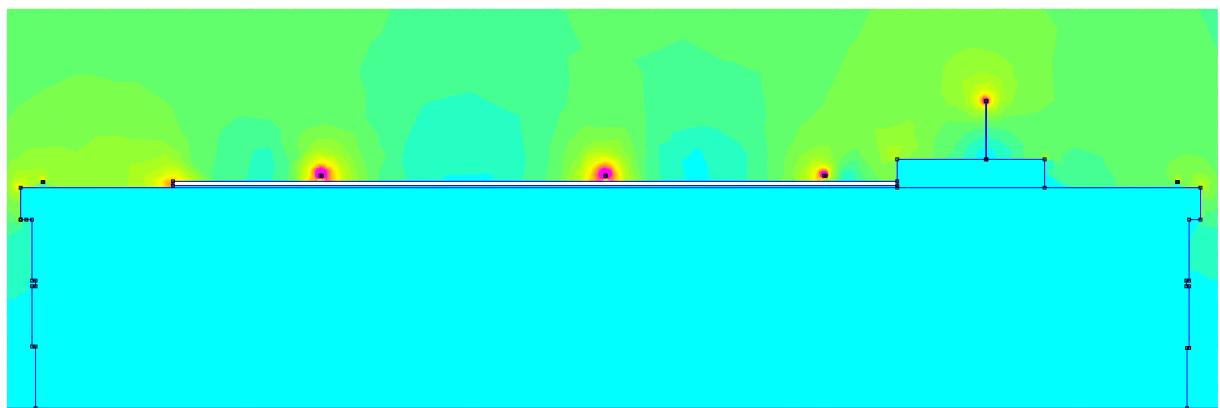


Figura 6.13 - Distribuição de campo elétrico: Situação C (*Fonte: Software FEMM*)

Pode-se perceber que, como esperado, os campos elétricos mais intensos se encontram nos condutores e na haste. Esses valores de campo elétrico ao longo do comprimento da estrutura são apresentados na Figura 6.14.

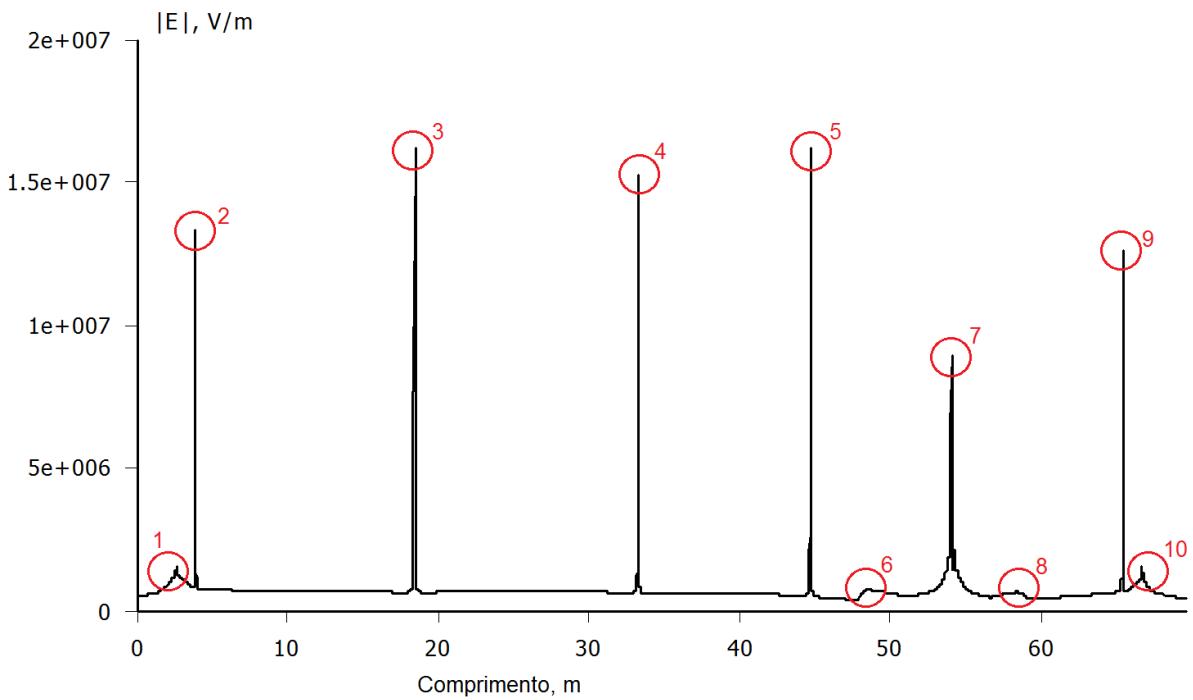


Figura 6.14 - Gráfico de campo elétrico x comprimento: Situação C (*Fonte: Software FEMM*)

Pode-se observar que o campo elétrico nos pontos 1, 6, 8 e 10, que equivalem a pontos da estrutura não é suficiente para a formação de um líder ascendente, conforme mostrado no Item 4.4.1. Já os demais pontos apresentam intensidade de campo elétrico superior àquela necessária para o surgimento de um líder ascendente. Dessa forma, percebe-se que, da maneira como estão instalados, e de acordo com o Método dos Elementos Finitos para a verificação da distribuição de campo elétrico sobre a estrutura, nenhum ponto da estrutura está desprotegido.

Partindo do princípio de que o líder ascendente não necessariamente se aproximarará pelo centro da estrutura, foram feitas outras duas análises, indicadas anteriormente por **Situação A** e **Situação B**. A Tabela 6.3 apresenta os resultados obtidos da simulação dos 3 casos.

Tabela 6.3 - Resultado das simulações para situações A, B, e C

Ponto	Campo Elétrico [MV/m]		
	Situação A	Situação B	Situação C
1	2,02	1,09	1,57
2	18,8	10,8	15,5
3	21,4	15,6	21,8
4	17,8	17,2	20,9
5	13,2	16,2	17,1
6	0,55	0,64	0,67
7	6,94	10,2	9,16
8	0,44	0,83	0,72
9	9,92	17,2	13
10	0,99	1,78	1,29

A Tabela 6.3 mostra que os valores de campo elétrico em cada ponto se alteram dependendo da distância entre o ponto e a aproximação do líder descendente, sendo que quando a aproximação se encontra a uma menor distância, o campo elétrico neste ponto é mais intenso. Entretanto, em nenhuma das situações estudadas o campo elétrico nos pontos referentes à estrutura atingiu valor próximo ao valor mínimo necessário para a formação de um líder ascendente. Essa afirmação nos leva à conclusão de que o prédio, de acordo com o Método dos Elementos Finitos para a verificação da distribuição de campos elétricos, se encontra protegido pelo sistema de captação instalado sobre o prédio mesmo tendo apresentado pontos desprotegidos utilizando-se o Modelo Eletrogeométrico.

6.5 Análise de outras possibilidades

Partindo da conclusão de que a estrutura do bloco 5O, pelo Método dos Elementos Finitos, se encontra protegida, vale realizar o estudo da distribuição de campo elétrico alterando-se o esquema de captores presentes no prédio. Serão feitas, portanto, algumas simulações variando-se a quantidade de condutores e até mesmo retirando a haste vertical de

modo a verificar quais alterações ocorrem. Antes, porém, a Figura 6.15 mostra que, na ausência de qualquer captor, os campos elétricos na estrutura são, na Situação B, suficientes para a formação de líderes ascendentes, ou seja, superiores a $3 \text{ MV}/\text{m}$.

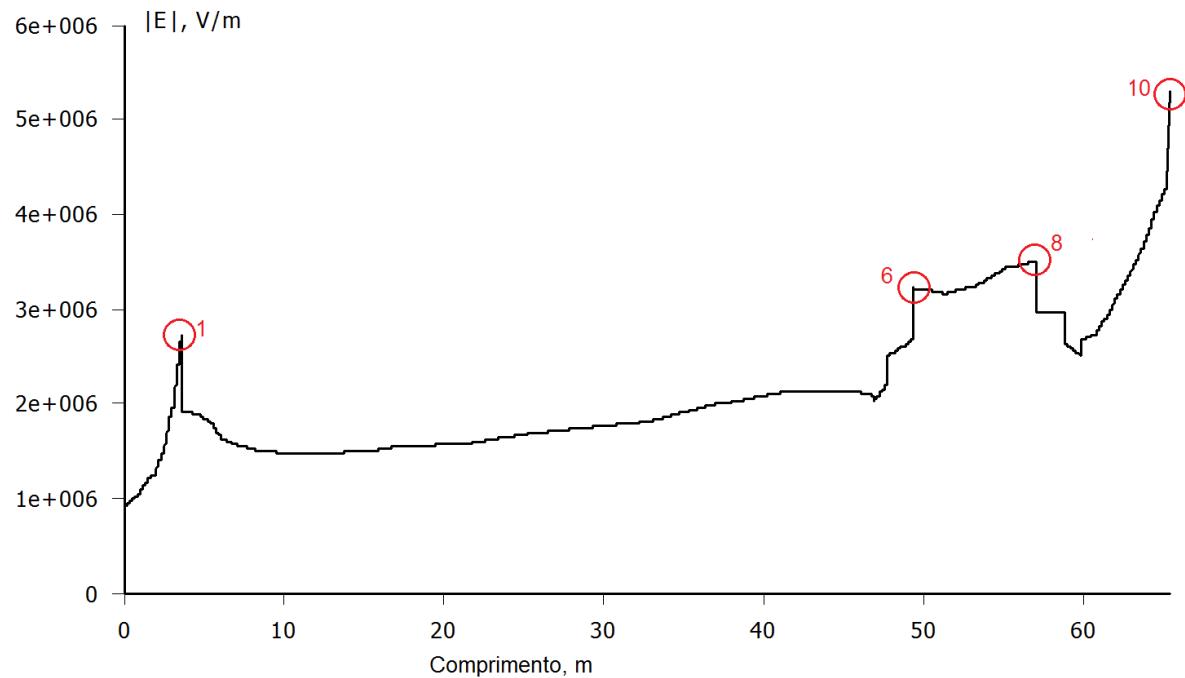


Figura 6.15 - Campos elétricos sem SPDA (Fonte: Software FEMM)

Em uma primeira análise, a haste vertical que se encontra sobre a reservatório de água é desconsiderada. Além disso, são retirados também os condutores representados pelos números 5 e 9 na Figura 6.12. Considera-se o líder descendente presente na **Situação B**.

O resultado dessa simulação pode ser observado na Figura 6.16. Como pode ser observado, foram mostrados apenas os pontos 6, 8 e 10 referentes à estrutura. O campo elétrico no ponto 10 superou o limite mínimo para o surgimento de um líder ascendente enquanto os pontos 6 e 8 chegaram próximo a esse valor sendo que, em um próximo passo do líder descendente, esse valores talvez ultrapassassem os $3 \text{ MV}/\text{m}$.

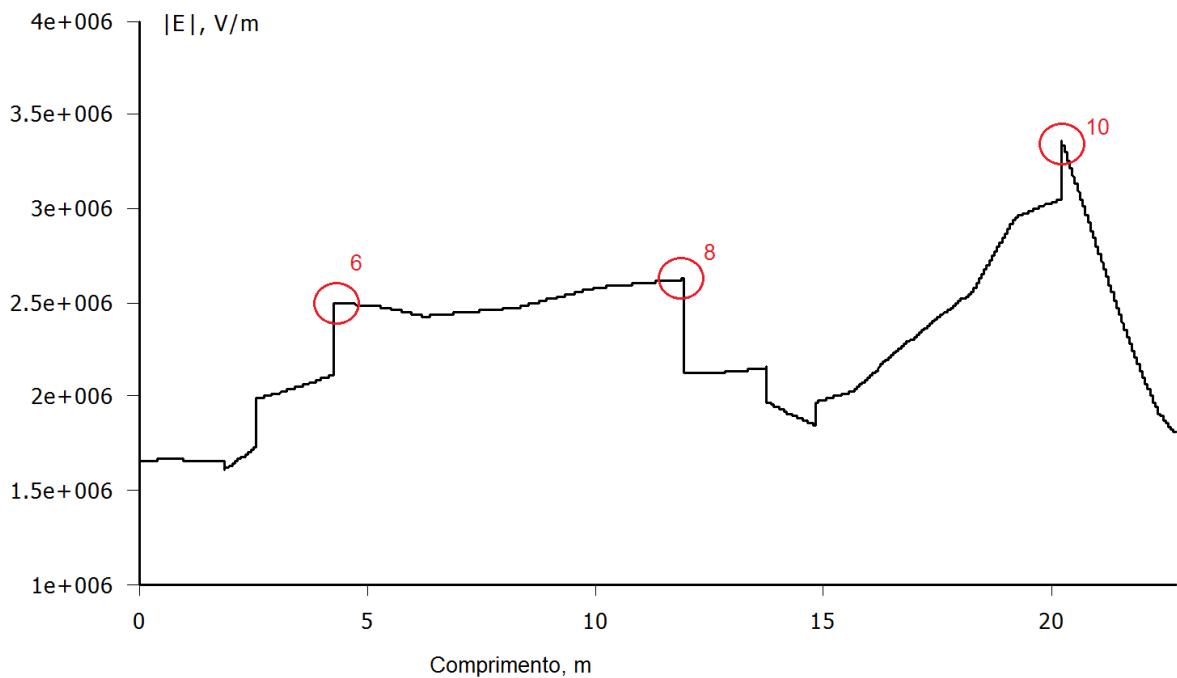


Figura 6.16 - Simulação sem a presença da haste e dos condutores 5 e 9 (Fonte: Software FEMM)

Portanto, pode-se perceber que a presença dos elementos captores nessa região da estrutura realmente se faz necessária para a proteção da estrutura contra descargas atmosféricas.

Além disso, as possibilidades de configurações e posicionamentos dos elementos captores são inúmeras podendo, inclusive, a própria estrutura ter elementos naturais utilizados como captores, como, por exemplo, telhas metálicas ou chaminés com partes metálicas. Por esse motivo, cada situação analisada é completamente diferente da outra em função das características da estrutura e dos elementos que a compõem sendo, portanto, a modelagem computacional a parte mais crítica na correta obtenção dos resultados.



6.6 Conclusões parciais

Este capítulo apresentou um estudo de caso sobre como o Método dos Elementos Finitos pode ser aplicado na execução de um projeto de SPDA utilizando o *software* FEMM.

Sabe-se que, por ser fundamental na formação de um líder ascendente, a distribuição de campo elétrico sobre uma estrutura é de grande importância para o estudo de possíveis locais de formação desses líderes ascendentes e a consequente incidência de descargas atmosféricas em tais pontos. Por esse motivo, foi mostrado que a presença de elementos captores próximos a esses pontos reduzem o valor de campo elétrico cumprindo assim o seu papel de interceptar uma possível descarga atmosférica.

Nesse sentido, foi mostrada como se comporta a distribuição de campos elétricos com, e na ausência dos elementos captores.

Com relação à comparação feita entre o Modelo Eletrogeométrico e o Método dos Elementos Finitos, conclui-se que o primeiro apresenta um superdimensionamento do subsistema captor com relação ao segundo método.

Como pôde ser observada, a aplicação do Método da Esfera Rolante acusou regiões desprotegidas sobre a estrutura enquanto a análise da distribuição de campos elétricos mostrou que nenhuma parte da estrutura possui, nas condições estudadas, valores de campos elétricos superiores ao mínimo necessário para a formação do líder ascendente. Em outras palavras, pode-se concluir que o Método dos Elementos finitos pode, além de apresentar uma solução mais física que geométrica para o fenômeno das descargas atmosféricas, levar a reduções de custos em projetos de SPDA em função da melhor utilização e posicionamento dos elementos captores.

Enfim, considera-se o método apresentado como sendo um passo significativo na formulação de um método mais completo e que considere os fenômenos físicos que envolvem uma descarga atmosférica.



Capítulo 7

Conclusão



7.1 Conclusões gerais

É amplamente sabido, no meio científico, que o processo de ocorrência de uma descarga atmosférica é um fenômeno complexo que envolve diversas variáveis.

Iniciando o conteúdo deste trabalho, foi apresentado o método de avaliação da necessidade de instalação de um SPDA sobre uma estrutura, pois a conclusão de que um sistema de proteção se faz necessário é o primeiro passo para o início da análise da estrutura e das melhores opções de configuração de seu subsistema captor. Em outras palavras, a constatação de que uma estrutura não necessita de proteção, seja por utilização do método ou pelo próprio interesse do proprietário, faz com que não haja a necessidade de realizar um estudo detalhado sobre a proteção da mesma contra descargas atmosféricas.

A realização e apresentação de um guia prático para o cálculo da necessidade de instalação de um sistema de proteção contra descargas atmosférica finaliza o conteúdo do Capítulo 2 deste trabalho ao mostrar de forma simples e rápida o resultado da aplicação do método que, na falta do guia, ficaria dependente da consulta aos procedimentos e tabelas da norma sempre que uma verificação fosse necessária. Além disso, o guia foi estruturado com o auxílio do *Excel*, em um *software* de fácil acesso e que não demanda conhecimentos avançados para sua utilização.

Um aspecto prático importante dentro do contexto das descargas atmosféricas é a proteção de estruturas e pessoas contra sua ocorrência. Subsistemas captores são instalados sobre estruturas com o objetivo de atraírem para si uma descarga atmosférica de forma a proteger seu conteúdo. Para isso, o posicionamento do subsistema captor obedece à recomendações de métodos particulares de posicionamento de captores como, por exemplo, os métodos já existentes do Cone de Proteção [19], o Método de Faraday, que representa a aplicação de malhas de condutores espalhadas sobre a estrutura a ser protegida [43] e o Modelo Eletrogeométrico, já apresentado no Capítulo 3 deste trabalho.

Nesta parte do trabalho, a apresentação do Modelo Eletrogeométrico se faz fundamental para a continuação do estudo sobre a possibilidade de se desenvolver um método auxiliar que considere a distorção do campo elétrico e sua distribuição sobre uma estrutura.



Nesta etapa, foram apresentadas algumas limitações do modelo que, ao propor um método puramente geométrico de verificação do volume de proteção, desconsidera fatores físicos importantes que envolvem uma descarga atmosférica.

Nos últimos anos, diversos modelos físicos para o posicionamento de captores têm sido propostos no sentido de melhorar os métodos já existentes [44]. Para a fundamentação destes estudos, informações sobre a estrutura elétrica de nuvens de tempestade se tornaram muito importantes para que o fenômeno pudesse ser entendido desde sua formação. A determinação de um potencial elétrico para uma nuvem de tempestade é, por exemplo, um importante fator a ser conhecido quando se propõe métodos físicos de proteção. Além desse, o campo elétrico que as cargas geram na superfície do solo e sobre estruturas aterradas também é de fundamental importância.

A distribuição de campo elétrico sobre e ao redor das estruturas a serem protegidas constitui uma informação de muita importância na aplicação dos novos modelos físicos [45]. Isso ocorre não somente pela possibilidade de se verificar diferentes opções de posicionamento de captores sobre a estrutura a ser protegida, mas também, pela possibilidade de o líder descendente se aproximar da estrutura por diferentes direções. Nesse sentido a importância de se considerar a distribuição do campo elétrico foi apresentada no Capítulo 4. Juntamente, foram apresentados o *software* FEMM e sua utilização para a aplicação do Método dos Elementos Finitos.

A importância de se analisar a distorção do campo elétrico e sua distribuição foram então tratadas com o auxílio do FEMM, que possibilitou a verificação da distribuição e da intensidade de campo elétrico sobre uma estrutura modelada. Com essa ferramenta, foi possível analisar a possibilidade de ocorrência de uma descarga atmosférica num ponto onde o campo elétrico ultrapassa o valor mínimo necessário para o surgimento de uma descarga ascendente que provavelmente interceptará o líder descendente.

No Capítulo 5 é deixado de lado, temporariamente, o subsistema captor do SPDA para realização do estudo do comportamento transitório do subsistema de descida do mesmo. O interesse na realização da análise transitória dos efeitos provocados pela passagem de uma corrente de uma descarga atmosférica pelos condutores de descida se dá pela suspeita de tal

acontecimento interferir significativamente na distribuição de campo elétrico sobre o subsistema captor.

Para isso, a modelagem computacional foi utilizada utilizando-se o *software* ATP e se mostrou satisfatória pela possibilidade de se detalhar os condutores com suas propriedades elétricas assim como suas interligações. Da mesma forma, a modelagem da fonte de surto possibilitou uma simulação bastante próxima do comportamento real da corrente de uma descarga atmosférica com relação aos seus tempos de crista e de cauda.

Por fim, após apresentar o Modelo Eletrogeométrico e suas limitações, além de apresentar a importância em se considerar a distorção de campo elétrico, é apresentado no Capítulo 6 um estudo de caso no qual a aplicação do Método dos Elementos Finitos, em uma situação prática e real, pôde ser comparada a utilização do primeiro.

Como pôde ser observada, a aplicação do Método da Esfera Rolante acusou regiões desprotegidas sobre a estrutura enquanto a análise da distribuição de campos elétricos mostrou que nenhuma parte da estrutura possui, nas condições estudadas, valores de campos elétricos superiores ao mínimo necessário para a formação do líder ascendente. Em outras palavras, pôde-se concluir que o Método dos Elementos finitos pode, além de apresentar uma solução mais física que geométrica para o fenômeno das descargas atmosféricas, o mesmo pode levar a reduções de custos em projetos de SPDA em função da melhor utilização e posicionamento dos elementos captores.

O trabalho constitui-se, portanto, uma importante contribuição ao estudo de proteção contra a incidência direta de descargas atmosféricas. Além disso, em função da escassez de documentos que tratam deste assunto no Brasil [13], este trabalho juntamente com seu conteúdo constituem, dentre outras, uma contribuição significativa no sentido de buscar um método físico eficiente e confiável para se proteger estruturas.

7.2 Trabalhos futuros

Este trabalho apresenta uma ferramenta que pode auxiliar no projeto de posicionamento de captores em projetos de SPDA. Como pôde ser observado, o *software*



FEMM, apesar de considerar a profundidade do objeto estudado, realiza a análise da estrutura modelada em duas dimensões. Sendo assim, a modelagem da estrutura fica limitada a um corte da mesma. Como sugestão para um trabalho futuro, sugere-se a utilização de *softwares* que possibilitem a modelagem em um ambiente 3D (três dimensões) pois, dessa forma, é possível informar, através da modelagem, o conteúdo interno da estrutura modelada.

Dessa forma, pode-se realizar uma análise mais detalhada da distribuição de campo elétrico sobre o objeto estudado e, além disso, verificar se existe influência de seu conteúdo interno sobre a distribuição de campo elétrico.

Outro ponto importante que pode ser desenvolvido a partir deste trabalho é a análise dinâmica da ocorrência da descarga atmosférica. Na realização do estudo de caso, foi adotada uma situação estática para a aproximação do líder descendente. Entretanto, sabe-se que o líder descendente parte da nuvem e caminha através de passos discretos em direção ao solo e às estruturas nele presentes. Assim, ao verificar a distorção do campo elétrico durante a aproximação do líder, pode-se concluir sobre a influência da velocidade de propagação do líder descendente sobre esse parâmetro e sobre a formação do líder ascendente.



BIBLIOGRAFIA

- [1] BETZ, H. D.; SCHUMANN, U.; LAROCHE, P. **Lightning: Principles, Instruments and Applications - Review of Modern Lightning Research.** [S.I.]: SPRINGER, 2009. 641 p.
- [2] RAKOV, V.; UMAN, M. A. **Lightning: Physics and Effects.** 3. ed. Nova Iorque: Cambridge Press, 2005.
- [3] ELAT - GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA. História. **Portal ELAT.** Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/electricidade.atmosferica/historia.php>>. Acesso em: 23 Agosto 2011.
- [4] KRIDER, E. P. Benjamin Franklin and Lightning Rods. **Physics Today**, p. 42-48, Janeiro 2006.
- [5] COORAY, V. **Lightning Protection.** Londres: IET Power and Energy Series 58, 2010.
- [6] RISON, W.; MOORE, C. B.; AULICH, G. D. Lightning Air Terminals - Is Shape Important? **IEEE Electromagnetic Compatibility International Symposium on**, 2004. 300-305.
- [7] INTERNATIONAL STANDARD. **IEC 62305-1:** Protection Against Lightning, part 1: General principles, 2006.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419:** Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2005.
- [9] GUIMARÃES JÚNIOR, S. C. **Análise dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas utilizando o método dos elementos finitos.** Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. São Paulo. 1998.
- [10] D'ALESSANDRO, F.; PETROV, N. I. Field study on the interception efficiency of lightning protection systems and comparison with models. **Proceedings of the Royal Society A**, Londres, 2006.
- [11] MICROSOFT. Introdução ao Excel 2010. **Microsoft Office**, 2010. Disponível em: <<http://office.microsoft.com/pt-br/excel-help/introducao-ao-excel-2010-HA010370218.aspx>>. Acesso em: 01 Novembro 2011.
- [12] IEEE. Std 998. **Guide for direct lightning stroke shielding of substations**, 1996. 163.
- [13] KINDERMANN, G. **Proteção contra descargas atmosféricas em estruturas edificadas.** Florianópolis: LabPlan, 2003.
- [14] LACERDA, M. Dúvidas e limitações do Modelo Eletrogeométrico. **Eletricidade Moderna**, p. 20-28, julho 1989.

-
- [15] GUMLEY, J. R. Standard Association of Australia. **Cones and spheres and downconductors - A critical discussion and alternative concepts**, Maio 1986.
 - [16] AIT-AMAR, S.; BERGER, G. A modified version of the Rolling Sphere Method. **Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transaction on**, Junho 2009. 718-725.
 - [17] ISHII, M. et al. Probability of lightning hits to tall structures taking account of upward lightning. **Electromagnetic Compatibility (APEMC) - Asia-Pacific Symposium on**, Abril 2010. 1185-1188.
 - [18] MIKROPOULOS, P. N.; TSOVILIS, T. E. Interception probability and proximity effects: Implication in shielding design against lightning. **Power delivery IEEE Transactions on**, Julho 2010. 1940-1951.
 - [19] GOLDE, R. H. The lightning conductor. In: GOLDE, R. H. **Lightning, vol 2: Lightning Protection**. New York: Academic Press, v. 2, 1977. p. 545-76.
 - [20] HORVÁTH, T. **Understanding Lightning and Lightning Protection: A Multimedia Teaching Guide**. Chichester: Wiley, 2006.
 - [21] D'ALESSANDRO, F. The use of 'Field Intensification Factors' in calculations for lightning protection of structures. **Journal of Electrostatics**, v. 58, n. 1, p. 17-43, Maio 2003.
 - [22] UMAN, M. A. Natural Lightning. **IEEE Transaction on Industry Applications**, 30, maio/junho 1994.
 - [23] HARTMANN, G. Theoretical evaluation of Peek's Law. **Industry Application, IEEE Transactions on**, Novembro 1984. 1647-1651.
 - [24] CARRARA, G.; THIONE, L. Switching surge of large air gaps: A physical approach. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, Março 1976. 512-524.
 - [25] MEEKER, D. **Finite Element Method Magnetics**. Disponível em:
<http://www.femm.info/wiki/HomePage>. Acesso em: 19 julho 2011.
 - [26] G.BELANGER et al. The ATLAS Liquid Argon Forward Calorimeter Electrode Uniformity, 10 setembro 2005. Disponível em: http://atlas-fcaltb.web.cern.ch/atlas-fcaltb/FCal_Info/TheDetector/General/Cap.Report.pdf. Acesso em: 07 outubro 2011.
 - [27] DIELECTRIC constants. **Krohne**. Disponível em:
http://www.krohne.com/Dielectric_Constants.6840.0.html.
 - [28] XU HUI, L. B. X. S. F. H. The Measurement of Dielectric Constant of the Concrete Using Single-Frequency CW Radar. **Intelligent Networks and Intelligent Systems, ICINIS'08. First International Conference on**, 1-3 Novembro 2008. 588-591.

-
- [29] DIAS, G. A. D.; TELLÓ, M.; HAFFNER, S. L. Blindagem contra descargas diretas em prédios e instalações de alta tensão. **Eletrociadade Moderna**, São Paulo, Outubro 1992.
- [30] D'AJUZ, A. **Transitórios elétricos e coordenação de isolamento - Aplicação em sistemas de potência de alta tensão**. Niterói: Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987. 435 p.
- [31] GUIMARÃES, R. **Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob o enfoque da eficiência energética**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 172. 2008.
- [32] TAVARES, M. C. D.; CAMPOS, P. G.; PRADO, P. Guia resumido do ATP - Alternative Transient Program, Apostila, Universidade Federal de Campinas, 2003.
- [33] WANG JIA, Z. X. Double-Exponential Expression of Lightning Current Waveforms. **CEEM**, Dalian, 2006. 320-323.
- [34] EMTP USER GROUP. **EMTP Rule Book Vol. 1**. [S.I.].
- [35] PRYSMIAN. Redes aéreas. **Downloads - Cabos de cobre nus**. Disponível em: <<http://www.prysmian.com.br/export/sites/prysmian-ptBR/energy/pdfs/cobrenu.pdf>>. Acesso em: 29 agosto 2011.
- [36] SILVA, M. V. Comportamento elétrico transitório de um condutor de descida submetido a uma descarga atmosférica. **VIII CEEL**, Uberlândia, outubro 2010. 6.
- [37] MCALLISTER, I. W. Electric Field Theory and the Fallacy of Void Capacitance. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, Junho 1991. 458-459.
- [38] MOTOYAMA, H.; KINOSHITA, Y.; NONAKA, K. Experimental Study on Lightning Surge Response of 500-kV Transmission Tower With Overhead Lines. **IEEE Transactions on power delivery**, Outubro 2008. 2488-2495.
- [39] IEEE. Std 1243. **Guide for improving the Lightning Performance of Transmission Lines**, 1997. 44.
- [40] GREENWOOD, A. **Electrical Transients in Power Systems**. 2. ed. United States: Wiley, 1991.
- [41] EMTP RULE BOOK. **Section 10 - Cable Constants**. [S.I.], p. 90.
- [42] DIELECTRIC Constants Chart. **Magtech**. Disponível em: <http://www.isemagtech.com/page_dieleccharta-c.cfm>. Acesso em: 11 Novembro 2011.
- [43] SZCZERBINSKI, M. A discussion of 'Faraday cage' lightning protection and application to real building structures. **Journal of Electrostatics**, v. 48, p. 145-154, 2000.
- [44] N.I. PETROV, G. P. R. T. W. Determination of attractive area and collection volume of earthed
-

-
- structures. **Proceedings of the 25th ICLP**, Rhodes, Greece, 2000. 374-379.
- [45] F. D'ALESSANDRO, J. R. G. A 'Collection Volume Method' for the placement of air terminals for the protection of structures against lightning. **Journal of Electrostatics**, v. 50, p. 279-302, 2001.
- [46] PETROV, N. I.; AVANSKII, V. R.; N. V. BOMBENKOVA. Measurement of the electric field in the streamer zone and in the sheath of the channel of a leader discharge. **Technical Physics**, v. 39, p. 546-551, Julho 1994.



ANEXOS



Anexo A

ARTIGO PUBLICADO – SNPTEE 2011

UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

21º Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica

XXI SNPTEE

Florianópolis – SC

2011

GRUPO -VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Marcos Vinícius Silva (*) Décio Bispo Alin do A. Martins José R. Camacho Sérgio F. de Paula Silva
UFU UFU UFU UFU UFU

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar avanços e descobertas realizadas na área de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) no que se refere às dúvidas quanto ao Método Eletrogeométrico presente na norma brasileira NBR 5419 de 2004 e também na norma internacional IEC 62305 a respeito da verificação do volume de proteção oferecido por um sistema captor. Como método complementar de verificação do bom posicionamento de captores instalados em estruturas como subestações e linhas de transmissão, defende-se o projeto de locação de captores e descidas utilizando o cálculo da distribuição de campos elétricos estáticos sobre essas estruturas utilizando-se do Método dos Elementos Finitos.

PALAVRAS-CHAVE

Descarga Atmosférica, Para-raios, SPDA, Modelo Eletrogeométrico, Elementos Finitos

1.0 - INTRODUÇÃO

A formação de cargas elétricas nas nuvens tem sido ao longo dos anos objeto de grande curiosidade e interesse de pesquisadores e cientistas e, apesar de existirem várias teorias que tentam explicar a formação dessas cargas nas nuvens, nenhuma conseguiu explicar, até o momento, a maneira exata de como esse fato ocorre sendo, portanto, um fenômeno ainda não totalmente conhecido [1].

As cargas presentes nas nuvens geram, entre a nuvem e a terra, uma distribuição de potenciais elétricos que pode ser representada através de linhas equipotenciais cujo valor do potencial elétrico decresce à medida que se afasta da nuvem em direção à terra. Deste modo, um condutor vertical, tal como um mastro metálico ou uma haste para-raios, curto-circuita parte dessas linhas equipotenciais, de tal maneira que uma intensa concentração de campo elétrico é produzida na ponta dos mesmos, caracterizando a proteção oferecida pelas estruturas de captação de descargas atmosféricas [1]. A Figura 1 ilustra essa situação.

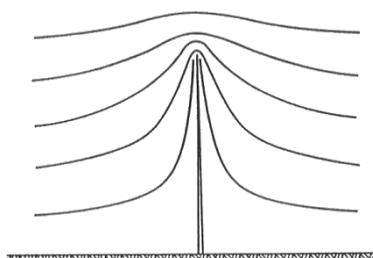


FIGURA 1 - Linhas equipotenciais curto-circuitadas

Uma descarga atmosférica, qualquer que seja sua origem, se desenvolve através de um líder. O líder é a primeira etapa da criação de um caminho condutor no ar para a ocorrência da descarga.

No caso de uma descarga nuvem-terra que, por seu interesse prático é a mais importante e mais estudada, seu início ocorre no interior da nuvem sendo seu primeiro componente o líder descendente que surge em direção à terra através de saltos discretos. Estruturas na terra, neste estágio, não influenciam o caminho e a formação do líder descendente. A partir daí, o líder viaja por um caminho em forma de zig-zag podendo haver ramificações ao longo de seu percurso e seu início é resultado de uma ruptura da rigidez dielétrica do ar que ocorre no interior da nuvem. Ao aproximar-se da terra e objetos aterrados, líderes ascendentes se formam através das estruturas e tendem a se conectar ao líder descendente.

Há uma diferença de potencial entre a extremidade mais baixa do líder descendente e a terra de modo que, à medida que a extremidade do líder descendente se aproxima da superfície do solo, o campo elétrico em objetos pontiagudos no solo ou irregularidades na superfície pode aumentar a ponto de romper a rigidez dielétrica do ar. Quando isso ocorre, uma ou mais descargas ascendentes são iniciadas a partir desses pontos e o processo de união entre o líder descendente e a descarga ascendente ocorre. Quando uma das descargas ascendentes se conecta ao líder descendente, a algumas dezenas de metros acima do solo, o líder se torna efetivamente conectado ao potencial do solo criando um caminho através do ar ionizado. Como a condutividade do solo é consideravelmente maior que a da nuvem, uma descarga de corrente ocorre de forma a neutralizar as cargas opostas da nuvem e da terra.

O ponto de contato entre o líder descendente e o ascendente é determinado dentro dos últimos 100 m acima do solo ou de um objeto. A própria norma brasileira NBR 5419:2005 utiliza como distância entre o ponto de partida do líder ascendente e a extremidade do líder descendente, valores abaixo de 100 metros como orientação na aplicação do Modelo Eletrogeométrico.

Quanto maior for o potencial elétrico entre a nuvem e o chão, mais alto será o ponto de contato. Também quanto mais intenso o campo elétrico, menor é a probabilidade do líder se desviar da vertical em sua aproximação ao solo. A área dentro da qual se espera que aconteça o ponto de contato próximo a um alto objeto aterrado depende, portanto, da intensidade do campo elétrico e isto torna difícil a especificação de uma “zona de segurança” para este objeto [2].

Neste sentido, o Modelo Eletrogeométrico, ao apresentar um volume de proteção puramente geométrico, desconsidera fatores importantes como as distorções do campo elétrico na terra e em estruturas aterradas e a formação do líder ascendente que se forma nas estruturas [3]. Portanto, com o auxílio de um software utilizado para realizar a modelagem de uma estrutura qualquer e a simulação através do Método dos Elementos Finitos, é possível visualizar a distribuição de campo elétrico citada, de forma a observar os locais onde sua intensidade é maior ou menor em comparação com o valor de campo elétrico que surge em estruturas vizinhas. Deste modo, é possível determinar as áreas de maior risco de incidência de uma descarga, já que são essas as regiões a partir das quais os líderes ascendentes se formam. No caso da instalação de um SPDA, da aplicação do Método dos Elementos Finitos e a visualização dos resultados das simulações através do software, deve-se observar se existem valores de campo elétrico elevados nas estruturas a serem protegidas. Caso isso ocorra, pode-se concluir que o para-raios não está cumprindo sua função de proteção da estrutura contra uma descarga. Neste caso o projeto deve ser refeito de modo a ajustar o SPDA para que esteja instalado de forma correta. A proposta é, portanto, que ao aplicar o Método dos Elementos Finitos, possa-se visualizar a melhor configuração para um sistema de captação de uma descarga atmosférica. Isto ocorre quando se observa toda a distribuição de campo elétrico somente ao redor da extremidade dos captores, ou distribuída em cordoalhas de uma possível gaiola de Faraday instalada de forma conjugada com um captor em forma de haste.

2.0 - DÚVIDAS QUANTO AO MODELO ELETROGEOMÉTRICO

O Método Eletrogeométrico, também conhecido como Método da Esfera Rolante ou Esfera Fictícia, é um método mais apurado em relação ao método Franklin, para a obtenção da zona de proteção de uma estrutura pelo fato de ser baseado no mecanismo de desenvolvimento das descargas atmosféricas. É uma técnica adotada em muitos países, inclusive, fazendo parte de muitas normas como a norma internacional IEC 62305.

De acordo com a norma brasileira NBR 5419:2005, o modelo eletrogeométrico serve para delimitar o volume de proteção oferecido pelos captores de um SPDA independente de sua configuração ser em hastes, cabos ou

combinação de ambos. A norma brasileira também afirma que os pontos nos quais ocorre maior intensidade de campo elétrico, seja no solo ou em estruturas, são geralmente os pontos mais próximos da extremidade do líder descendente. Portanto, a superfície de uma esfera com centro na extremidade do líder e raio igual ao comprimento do seu último salto é o lugar geométrico dos pontos a serem atingidos pela descarga. Estes pontos podem então ser simulados por uma esfera fictícia, cujo raio seja igual ao comprimento do último trecho a ser vencido pelo líder descendente [2].

Entretanto, o procedimento normatizado e aqui apresentado de forma simplificada, ao apresentar um volume de proteção puramente geométrico, desconsidera fatores importantes como as distorções do campo elétrico na terra e em estruturas aterradas e a formação do líder ascendente que se forma nas estruturas. Tais considerações alteram de forma significativa a maneira como se desenvolve a verificação do volume de proteção oferecido pelo subsistema captor de um SPDA colocando em dúvida a eficácia do Modelo Eletrogeométrico. Algumas dessas considerações e sua influência sobre o volume de proteção final oferecido pelo subsistema captor serão apresentadas a seguir.

2.1 A descarga ascendente

Como o Modelo Eletrogeométrico não leva em conta todos os fenômenos físicos envolvidos no processo de uma descarga atmosférica e sua interação com objetos aterrados, dúvidas quanto à sua eficácia podem ser levantadas. Estudos já mostraram que antes da ocorrência de uma descarga atmosférica, o líder descendente que precede a descarga faz com que o campo elétrico sobre estruturas aterradas cresça de forma que certamente o líder ascendente se desenvolverá dentro desse campo elétrico crescente gerado pela aproximação do líder descendente.

Portanto, a distância de atração, que de acordo com a NBR 5419:2005 é medido a partir da ponta do elemento captor, pode então ser redefinida como sendo a distância da ponta superior do líder ascendente à ponta do líder descendente. Essa consideração faz com que a altura do objeto efetivamente aumente já que a distância de atração é medida não mais a partir da ponta do captor, mas da ponta do líder ascendente.

Em [4], o lugar geométrico, tanto para o líder ascendente quanto para o líder descendente, foi calculado. Estas regiões, juntamente com a nova distância de atração, estão mostradas na Figura 2. Conforme mostrado anteriormente, a partir do momento em que a distância de atração é medida a partir da extremidade superior do líder ascendente, é como se a altura da estrutura tivesse sido aumentada ao utilizar o Método Eletrogeométrico como indicado pela norma.

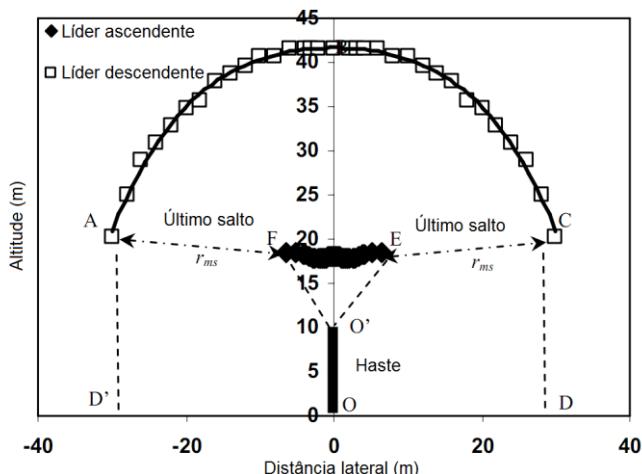


FIGURA 2 - Lugar geométrico dos líderes ascendentes e descendentes

Assim, ao levar em consideração a presença do líder ascendente durante o processo de descarga, para qualquer trajetória do líder descendente e, aplicando o Método das Esferas rolante sobre o solo e as extremidades do líder ascendente emitido por um captor, o novo volume de proteção é apresentado na Figura 3.

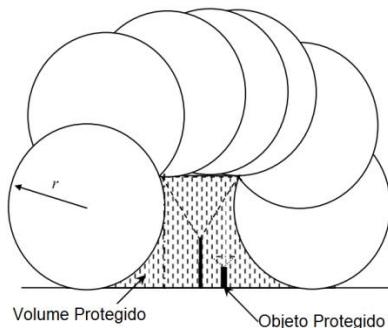


FIGURA 3 - O método da Esfera Rolante modificado

2.2 A distorção do campo elétrico

Outro fenômeno desconsiderado pelo Método Eletrogeométrico é a distorção do campo elétrico que existe entre a nuvem e a terra ou entre o líder descendente e a terra. Esta afirmação equivale a dizer que, à esquerda da parábola apresentada na Figura 4, que representa o lugar geométrico dos centros das várias possibilidades de valor de raio para as esferas, as linhas de campo incidem apenas sobre o captor e que à direita da parábola incidem apenas sobre o solo, em um ponto $x \geq x_0$, como mostrado na Figura 5 [3], já que, de acordo com o método, o raio da esfera representa o comprimento do último passo do líder descendente.

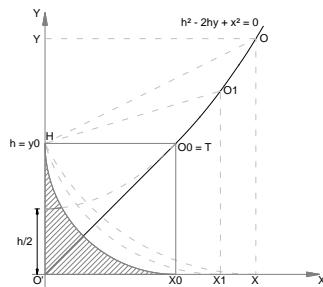


FIGURA 4 – Lugar geométrico dos centros das esferas

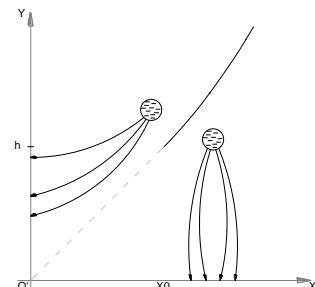


FIGURA 5 – Linhas de sentido do movimento dos elétrons

Se fosse verdadeira a afirmação de que as linhas de campo se comportam de acordo com o apresentado na Figura 5, seria o mesmo que afirmar que não existem as linhas de campo distribuídas da maneira como mostram a Figura 6a e Figura 6b

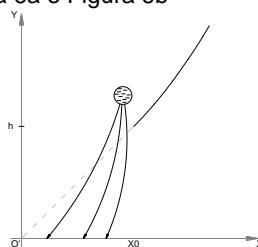


FIGURA 6a - Linhas de sentido real do movimento dos elétrons

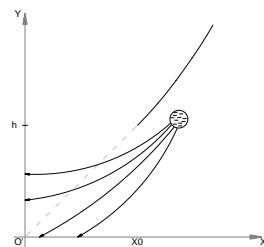


FIGURA 6b - Linhas de sentido real do movimento dos elétrons

A forma das linhas de campo mostradas nas figuras acima pode ser entendida observando-se o diagrama simplificado apresentado na figura 7 e que permite visualizar as contribuições da haste e do solo na determinação das trajetórias das cargas por ocasião do último passo. Por simplicidade, supõe-se toda essa carga concentrada num ponto e que as cargas na haste e no solo são estacionárias [3].

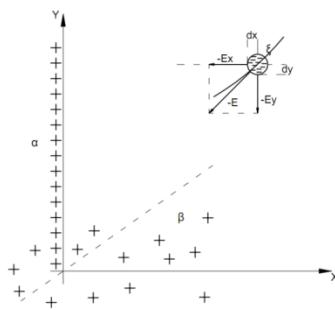


Figura 7 – Linhas de campo elétrico

Sabe-se que o campo elétrico devido às cargas presentes na haste é radial tendo como centro das superfícies equipotenciais, neste caso cilíndricas, o eixo Y. Deste modo, ao considerar apenas o efeito das cargas presentes na haste, a intensidade do campo elétrico E_x , em V/m, devido ao condutor retilíneo carregado é dada por:

$$E_x = \frac{\alpha}{2\pi\epsilon x} \quad (1)$$

Onde:

α = densidade linear de cargas [C/m]

x = menor distância (direção normal) da linha ao ponto de interesse [m]

ϵ = permissividade do meio

Da mesma forma, o campo elétrico E_y devido à ação do solo e sem considerar o efeito da haste, é independente da distância ao solo e representado por linhas perpendiculares (normais) ao solo. A intensidade do campo E_y , em V/m é dada por:

$$E_y = \frac{\beta}{2\epsilon} \quad (2)$$

Onde:

β = densidade superficial de carga [C/m²]

Da mesma forma, o campo elétrico E_y devido à ação da haste e sem considerar o efeito do solo, é independente da distância ao solo e representado por linhas perpendiculares (normais) ao solo. A intensidade do campo E_y , em V/m é dada por:

$$\frac{E_x}{d_x} = \frac{E_y}{d_y} \quad (3)$$

Substituindo na expressão acima as expressões de E_x e E_y , obtém-se a equação diferencial necessária para a obtenção da equação da linha de força no plano xy. Substituindo E_x e E_y na Equação 3 e integrando a equação resultante, tem-se que:

$$y = \frac{\pi \beta}{2 \alpha} x^2 + C \quad (4)$$

Onde C é uma constante que depende das condições iniciais do problema.

A Equação 4 é uma equação de segundo grau que representa, fisicamente, uma família de parábolas cuja concavidade está expressa em função das densidades das cargas na haste e no solo e representam, por sua vez, as linhas de campo. O ponto C é o que determina onde a parábola corta o eixo.

Analizando a equação y para diferentes valores de α e β , pode-se perceber que, no caso em que a concavidade é muito pequena ($\alpha \ll \beta$), a curva tende a ser horizontal indicando que a densidade linear de cargas na haste tem uma forte influência na inclinação das linhas de campo. Quando a concavidade é muito grande ($\alpha \gg \beta$), a curva tende a ser mais vertical, o que significa dizer que os raios serão pouco afetados pela presença da haste quando a densidade superficial de cargas no solo for um número muito maior que a densidade linear de cargas ao longo da haste.

A Figura 8 ilustra as duas situações.

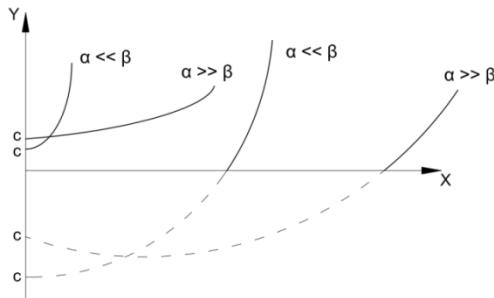


FIGURA 8 – Curvas parabólicas de sentido do movimento dos elétrons

Portanto, pode-se perceber que a afirmação de que as linhas de campo se comportam como mostrado na Figura 5 não é verdadeira, como demonstrado através da equação das linhas de campo e seu comportamento de acordo com as densidades de carga na haste e no solo. Essa falha pode ser também mostrada através da introdução de uma haste dentro do volume de proteção, situação mostrada na Figura 9.

Pode-se perceber de forma bastante clara que a introdução de uma haste entre uma estrutura e o ponto de tangência no solo provoca uma distorção das linhas equipotenciais de forma que surgem campos elétricos dentro do volume teoricamente protegido e que, em certas situações, podem ser de valor mais elevado do que os valores de campo elétrico nos pontos tangenciais. Esta é considerada a maior anomalia no Método da Esfera Rolante [3].

3.0 - O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Com o auxílio do software FEMM [5], que utiliza o Método dos Elementos Finitos para cálculo de problemas de natureza eletromagnética, pode-se realizar a modelagem de estruturas a serem protegidas de forma a possibilitar a visualização da distribuição de campo elétrico sobre a estrutura e os pontos nos quais este campo é suficientemente elevado para dar início à formação do líder ascendente. Com essa análise, é possível determinar as áreas de maior risco de incidência de uma descarga atmosférica.

Neste trabalho, será utilizada como exemplo, a modelagem de uma torre de transmissão de energia elétrica em tensão de 230 kV. Para a realização da simulação, foi considerada uma nuvem com tensão igual a $1,5 \times 10^{10}$ com uma altura de 3000 m sob o solo [2]. O solo por sua vez foi definido com tensão 0 V.

A Figura 10 apresenta a torre utilizada na simulação tendo seu volume de proteção analisado pelo Método Eletrogeométrico. O raio r utilizado para se traçar o contorno ABCD é de 20 metros conforme sugerido pela NBR 5419:2005 quando há interrupção inaceitável de serviços públicos por breve ou longo período de tempo [6]. Pode-se perceber que, da forma como os condutores de proteção (cabos-guarda) e os condutores relativos às fases estão distribuídos, o sistema de proteção não está cumprindo sua função de forma efetiva pois as fases nas extremidades da torre não estão protegidas.

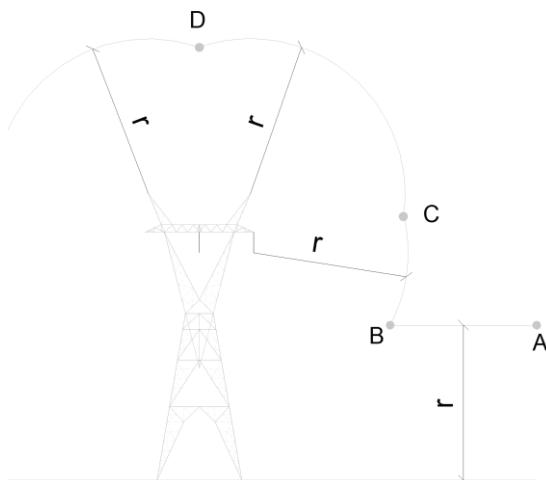


FIGURA 10 – Método Eletrogeométrico sobre a torre de 230 kV

Utilizando o Método dos Elementos Finitos sobre a torre, pode-se perceber a distribuição de campo elétrico sobre a estrutura através da diferença na intensidade de cor. A maior intensidade de cor, como era de se esperar, ocorre nas extremidades superiores da torre, onde se encontram os cabos-guarda. Entretanto, é possível observar que a distribuição do campo elétrico atinge também as fases da torre podendo levar à formação do líder ascendente e consequente descarga sobre a fase. A intensidade do campo elétrico nas fases é menor, mas mostra que as fases não estão completamente protegidas. Valores de campo elétrico medidos próximos às fases mostram valores em torno de 50 MV/m, intensidade suficiente para a formação de um líder ascendente partindo da fase. Neste caso, ambos os métodos apresentaram condições similares. Vale salientar que a cadeia de isoladores não foi considerada na modelagem pois simulações utilizando o FEMM mostraram que a presença da cadeia de isoladores não alteram de forma significativa a distribuição de campo elétrico sobre as fases.

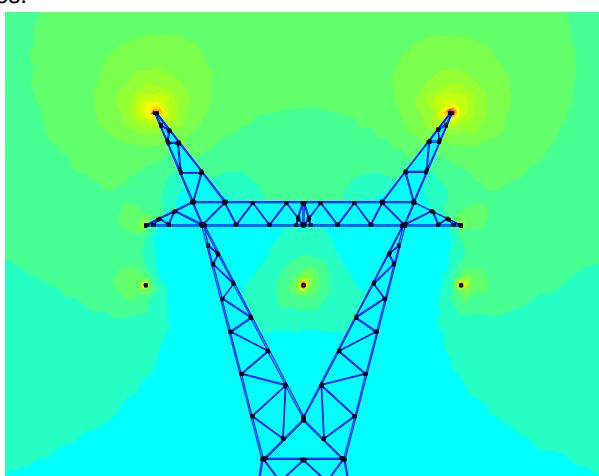


FIGURA 11 – Método dos Elementos Finitos sobre a torre de 230 kV

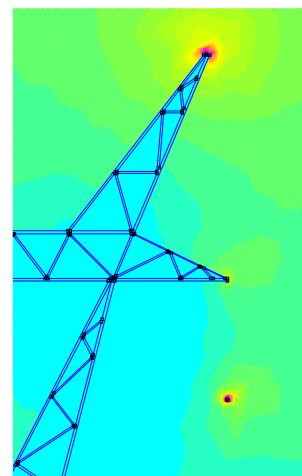


FIGURA 12 - Método dos Elementos Finitos sobre a torre de 230 kV

Os resultados apresentados representam uma situação específica para certa combinação entre tensão da nuvem e sua altitude. Partindo do princípio de que estas duas grandezas não são constantes, cada situação deve ser representada da maneira que melhor representar a tensão e altitude da nuvem de tempestade. Além disso, a análise da distribuição do campo elétrico sobre a estrutura é apenas um dos critérios a serem verificados. Complementando o projeto do posicionamento de captores, deve-se levar em conta parâmetros do raio como a carga do líder descendente e sua distribuição além de parâmetros como efeito da altitude na rigidez dielétrica do ar e a geometria da estrutura.

4.0 - CONCLUSÃO

Estudos realizados desde o surgimento do Modelo Eletrogeométrico mostram que o método possui falhas ao desconsiderar fatores importantes relacionados ao fenômeno dos raios. O método apresentado neste trabalho, ao verificar a distribuição de campo elétrico sobre uma estrutura a ser protegida, complementa de forma significativa o Método Eletrogeométrico ao levar em consideração o surgimento de campos elétricos intensos em regiões que deveriam estar protegidas pelo sistema de proteção contra descargas atmosféricas instalado. Portanto, o cálculo da distribuição de campo elétrico se mostra um complemento bastante significativo para a análise de um volume de proteção e regiões de possível incidência de uma descarga atmosférica. A análise de situações em 3 dimensões pode apresentar de forma mais clara esse volume de proteção.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) GOMES, G.L. Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas. Apostila, 1995.
- (2) GUIMARÃES JÚNIOR, Sebastião Camargo. **Análise dos Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas Utilizando o Método dos Elementos Finitos.** 133 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- (3) LACERDA, M. *Dúvidas e limitações do modelo eletrogeométrico.* Revista Eletricidade Moderna, Julho 1989.
- (4) Ait-Amar, S.; Berger, G.; "A Modified Version of the Rolling Sphere Method," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol.16, no.3, pp.718-725, June 2009
- (5) MEEKER, David. Finite Element Method Magnetics. Searched at: <<http://www.femm.info/wiki/HomePage>>. Accessed on: October, 15, 2010.
- (6) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419:** Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2005



Anexo B

ARTIGO PUBLICADO – IEEE PES POWERTECH 2011

Lightning Protection Design Using Information Visualization and Virtual Reality

Conferência do IEEE Power & Energy Society na Europa

Trondheim – Noruega

2011

Lightning Protection Design Using Information Visualization and Virtual Reality

G. F. Mendes, D. Bispo, M. V. Silva, E. A. Lamounier, A. Cardoso

Abstract - This paper proposes a CAD application for Lightning Protection where the results are presented using Information Visualization techniques. Complex 3D calculation is undertaken in an intuitive and strategic conjunction to perform risk assessment on a structure or on a service due to lightning flashes to earth. Vulnerable points, on a structure inside a 3D virtual environment, are seen by taking into account the most recent international standards. The application composes an easy tool and allows a proper understanding of protection models, creating several scenarios for protective measures and focusing the design engineer's attention on the main objective: protect goods and the human life against lightning.

Index Terms - Lightning, Lightning Protection, Information Technology, Virtual Reality

NOMENCLATURE

EGM – Electrogeometric Model;
LPS – Lightning Protection System;
RSM – Rolling Sphere Method;
IEC – International Electrotechnical Commission;
NBR – Brazilian Standards;
CAD – Computer-Aided Design;
GUI – Graphical User Interface;
UFU – Federal University of Uberlândia.
LTAD – Laboratory of Technology in Friction and Wear;

INTRODUCTION

LIGHTNING protection air terminals are placed on structures and other grounded objects with the purpose of capturing the lightning stroke. A well estimation of the volumetric protection distance is very important in predicting the protection volume of the lightning rod. The geometric solution was firstly proposed and adopted during the early years [1]. In 1767, Franklin was the first to have named a critical distance as “the striking distance” [2], based on the assumption that in a certain point, the developing lightning will strike the rod instead of the ground if the rod is the shortest path. The protection distance was based only on the height of the rod. This resulted in the

geometric approach of the cone protection method. Since it was found in 1945, the dependence between the striking distance and the lightning current has been used by electrical engineers and recommended by standards. The first version of the EGM was developed by Golde [3], based on the assessment of ambient electric field between the downward leader's tip and the studied object by introducing the leader charge. The striking distance is taken to be the height of the leader tip above the ground at which a critical breakdown field is reached across the final air gap [4]. The calculation of the striking distance can estimate the probability of lightning strike a structure and thereby evaluate the effectiveness of a LPS.

The dimensioning and the positioning of air-terminals on structures can be performed with the RSM. RSM has originated from the electric power transmission industry and is based on the well-known EGM [5]. The EGM relates the striking distance to the prospective peak stroke current. To apply this technique, an imaginary sphere is rolled over the structure. All surface contact points are deemed to require protection, whilst the unaffected volumes are deemed to be protected. The 2006 standard IEC 62305 of the IEC is the most updated international standard, concerning the lightning protection of persons, structures including their installations, contents and services [6]. The risk management method is reported in IEC 62305-2 [4]. The lightning strike model considered in IEC 62305 is the RSM, and in Brazil the NBR 5419 follow this recommendations.

Structure protection against lightning is realized using different types of lightning conductor. Evaluation of the zone of protection is a very important task in the designer's practice. Since the zone of protection is the volume within which a lightning conductor gives protection against a direct lightning strike by directing the strike to itself, the problem is a three-dimensional one [7].

CAD tools are very useful for engineering design process to enable alternative simulation before the final solution, improving quality and maturity in the engineering projects. In the Electrical Installation area, these tools have proved automation in several design activities [8]. This research proposes a CAD tool to improve the Lighting Design procedures using innovative concepts of Information Visualization to present intuitive results of the RSM inside a virtual environment, allowing the engineer to create a computer-simulated with a wide variety of details associated with simulation, interaction, artificiality and immersion possibilities. I also allow the user to access information in an intuitive and simplified environment, composing the necessary notion for a better design project. The application was developed inside AutoCAD MAP 2010 using Visual Lisp, and is able to perform the risk of lightning flashes on structures or on a service.

G. F. Mendes, is with Federal University of Uberlândia (UFU), PO.593,38400-902 BRAZIL (e-mail: gersonlima@ieee.org).

D. Bispo, is with Federal University of Uberlândia (UFU) , PO.593,38400-902 BRAZIL (e-mail: bispo@ufu.b@ufu.br).

M. V. Silva, is with Federal University of Uberlândia (UFU), PO.593,38400-902 BRAZIL (e-mail: marcossilva.eng@gmail.com).

E. A. Lamounier, is with Federal University of Uberlândia (UFU), PO.593,38400-902 BRAZIL (e-mail: lamounier@ufu.br).

A. Cardoso, is with Federal University of Uberlândia (UFU), PO.593,38400-902 BRAZIL (e-mail: alexandre@ufu.br).

INFORMATION VISUALIZATION AND VIRTUAL REALITY

In order to present data for lightning protection within a simplified and informative context, this work follows the use information visualization techniques. This tool enables understanding of information in a clear, simple and realistic environment by the professional in the field of electrical engineering. Among the main features of view, we highlight the following proposed features implemented in the application:

- a) Allows the use of 3D meshes;
- b) Supports simultaneous viewing of 3D CAD models and the protection region simulated for recommended standard methods;
- c) Allows navigation and interaction using a 3D Mouse;
- d) Use intuitive color to represent the building, the soil, the rod and the estimated protection volume to possibility the designer proof concepts.
- e) Control the Illumination and shading resulting in simple and efficient presentations.

ELECTROGEOMETRIC AND FRANKLIN MODEL

The Electrogeometric model is based in the protection volume defined by a rotation of a circle segment tangent to the soil around the captor masts. The circle segment radius is a function of the protection level desired to the installation.

The Electrogeometric model admits the simplification hypothesis:

- a) There are only negative discharges started in the clouds.
- b) The vertical descendant leading is unique.
- c) The last discharge will go the nearest grounded object, uncommitted with its mass or grounding conditions.
- d) The vertical rod and the horizontal conductors have the same attraction power.
- e) The probability to hit a grounded structure or the earth plan is the same if the leading have the same distance of both.

The Franklin Method is a particular case of the Electrogeometric Model, where the circle segment is approximated by a liner segment and, tangent to the circle in the captor height, the protection volume of the rod is approximated by a liner segment tangent to the Electrogeometric model circle. In geometric terms the Franklin Method is easier to apply than the Electrogeometric Model, although it can result in a super-dimensioned protection system, because the protection volume created by a linear segment is always superior of the volume created by a circle segment, and cause mistakes to predict the protection volume.

Figure 1 presents the application of the Electrogeometric model in a building, where it is verified that the captor in the top of the roof protects just a part of the building, and it is necessary to install another captor to cover the other part of the installations. In accordance with this model, the points of the circle segment determinates the geometric place that is possible to start the called "ascendant leader" to find the "descendant leader" localized at the circle center,

complementing the ionized channel, where the returning discharge occurs.

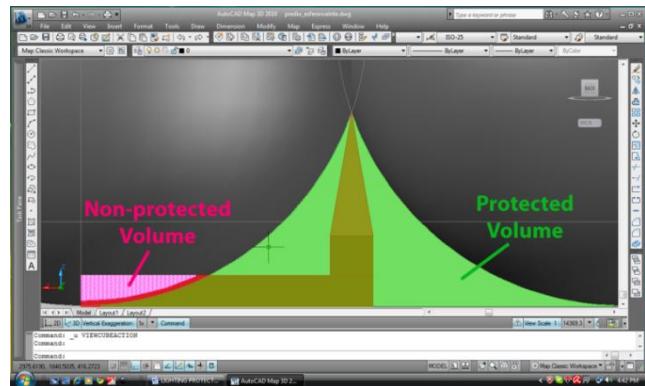


Fig. 1. Rolling Sphere Method - Protection Volume and Non Protection Volume

In the Electrogeometric model, the attraction distance is calculated for $R_a = a \cdot I_{\max}^b$, where I_{\max}^b is the max return current value and the constants 'a' and 'b' are different for many researchers.

When applied to structures, the standard NBR-5419/2005 adopt $a=10$ and $b=0,65$:

$$R_a = 10 \cdot I_{\max}^{0,65}$$

The Electrogeometric model is compatible with the practical consideration that the higher structures are susceptible to lateral atmospheric discharges. Effectively, if the structure has a superior height of the distance R, one captor localized in the top will not guarantee the adequate protection, because the circle segment tangent to the soil will touch the side of the structure.

SOFTWARE IMPLEMENTATION

One of AutoCAD's greatest assets is its adaptability. A key element of this adaptability is its built-in programming language AutoLISP. Using this artificial intelligence programming language the knowledge and use of AutoCAD is extended. According to the AutoCAD and AutoLISP interaction the own AutoLISP application is made [7].

The implementation intends to aid the engineering process to evaluate the building conditions, the geographic location placing process, and many characteristics presented in figure 2. All the process follows the IEC Standard recommendation to the design considerations and is compatible with the Brazilian NBR 5419/2005, and is organized in a chronological order to simplify the process and turn the design lifecycle more efficient. The GUI is created in accordance of good productivity techniques to allow the best user productivity.



Fig. 2. Graphical User Interface.

In the first step, the user inserts the building inside a virtual environment to start the Lighting Protection Design process. Then, he is supposed to choose the Length, Width, and Height and the application calculate the Exposure Area.

Following this process, the application permits to locate the Building in a map assigning the coordinate system appropriated to determinate geographic position. This procedure is very important to possibility the addition in the virtual environment of the Geodesic considerations as Topographic and Morphological terrain characteristics. The second step is to select the Ceraunic information to determinate the Annual frequency days of thunderstorms (N), figure 3.

The most traditional index used in the identification of the lightning incidence level in certain geographic location is the ceraunic level index, which represents the number of days in a year that a thunderstorm was heard. The NBR 5419/2005 standard presents a Brazilian map using the isoceraunic curves that identify the regions with the same ceraunic index. This index is very limited to not allow the count of the number of rays between the clouds and the ground in the region. It's possible to establish an accurate index using the atmospheric discharge density index to the earth (Ng), that characterizes the number of discharges per year to the soil in determinate region (in rays/year/Km²). The ceraunic index (Td) can be correlated with the discharges density (Ng) using empiric formulation, valid to certain regions and certain studies based in statistics. In Brazil, the NBR 5419/2005 establishes (1):

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} \quad (1)$$

where N_g is in km^2/year .

Based on this information, the application returns the Density of Discharges per area per year (Ng) and the average annual frequency.

The third step is a questionnaire that enables the calculation of the general assessment of risk, as presented in figure 4. It is necessary to answer a questionnaire to set up the following characteristics:

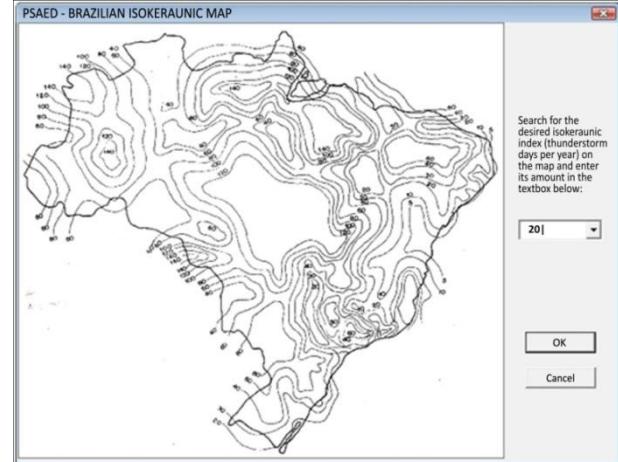


Fig. 3. Brazilian Ceraunic Map.

- a) Factor A-Structure Type Occupation;
- b) Factor B-Structure Construction Type;
- c) Factor C-Structure contents and indirect effects of Atmospheric Discharges;
- d) Factor D-Structure Location;
- e) Factor E-Structure Topography.

The questionnaire enables the General Risk Evaluation, setting values to the factors A, B, C, D, E and returning a Risk Level (recommended by Standards). Thus, the application results the Nc (Admissible Damage Frequency), compares with the standard recommendations and displays if the structure need a LPS or not.

Fig. 4. General Risk Evaluation – Questionnaire about the Structure.

If the system, as a result, recommends a LPS, the user can choose by the Franklin Method or by the Electrgeometric Model, or both and compare the results to define the better design solution. If it dispenses the LPS, it is possible to insert into the AutoCAD drawing a complete report to justify, based on the standards and all calculated parameters.

To insert the rod into the design, there is the possibility to the user to select the protection level between I, II, III or IV, and to select the rod height.

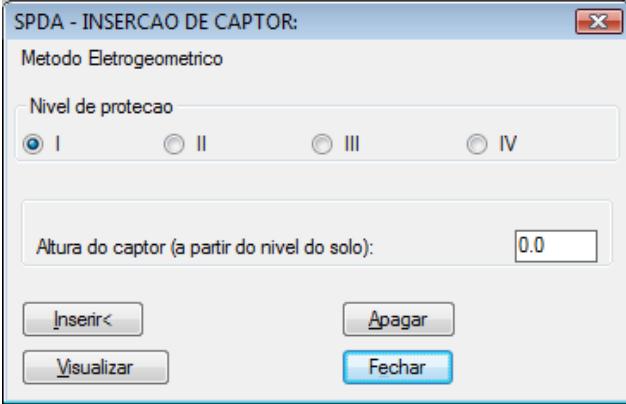


Fig. 5. Rod insertion

After inserting the rod into the Virtual Environment it is possible to choose the best view point to observe the results presented by the protection volume simulated, at figure 6 the options available are displayed.

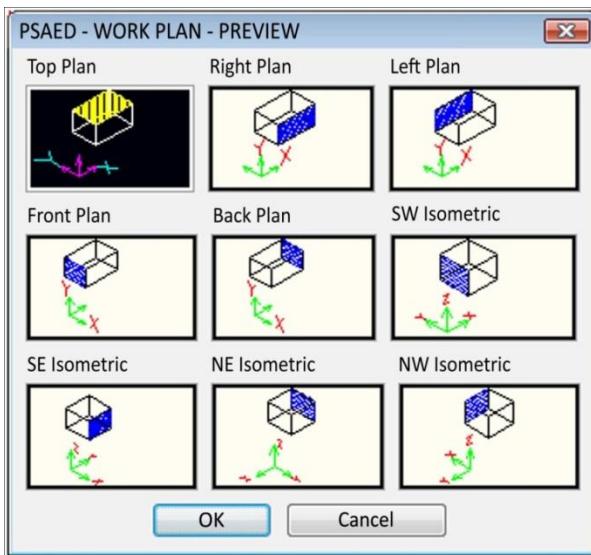


Fig. 6. 3D View Point Options

3D MOUSE CAPABILITY

The interaction is connected with the computer's capacity to detect the user's inputs and modify, in real time, the virtual world in function of the user actions. To turn the Virtual model more realistic, the virtual environment needs to be interactive [8]. For these purposes, the development uses a 3D mouse looking to provide the following degrees of freedom for the designer engineer:

- a) Zoom;
- b) Tilt;
- c) Pan left/right;
- d) Pan Up/Down;
- e) Spin;
- f) Roll

These capabilities propose to increase productivity, save time by navigating with the 3D mouse in one hand, while simultaneously using the traditional mouse to select, create and edit. Enhance comfort by spreading the workload across both hands, and reduce traditional mouse clicks. Providing Design Performance to working on a sketch or a complex

3D model, the superior navigation experience encourages levels of model exploration that are crucial to avoid costly design errors [9].

The main advantage of this type of interface is the fact that this abilities and the user intuitive knowledge can be used to manipulate virtual objects. To support this kind of interactions, the user can work with non-conventional equipment like a helmet, gloves, the body gesticulations and voice commands or conventional equipment like mouse, keyboard, and video display. It is important that the user has the impression to interact inside the virtual environment, appointing, handling, manipulating and executing the other actions over the virtual object in real time, or inside time limits well defined, or with delays that not cause discommodity.

PROJECTS CONSIDERATIONS

IEC 62305 deals with the protection in and around a structure against physical damage and injury to living beings due to touch and step voltages [10]. The main and most effective way for protection of structures against physical damage is considered to be the lightning protection system (LPS). It usually consists of both external and internal lightning protection systems.

The LPS composition should be studied at the building project stage to maximize the use of the building natural structure conductors in such a way that it is possible to achieve a better aesthetic installation and minimize the construction costs. The ground access and the adequate utilization of the foundation metallic grid (armatures) working as earth electrodes can be impossible after the building construction begin. The natures and the earth resistivity should be considered at the early stage of the project. This parameter can be valuable to dimension the grounding subsystem and can influence certain foundation civil project details. The probability of the atmospheric discharge penetration inside the protection volume is considerably reduced for the presence of the rightly designed capitation subsystem. The captors must have the following components:

- a) Rod;
- b) Stretched cables;
- c) Conductors in grid;
- d) Natural elements.

To avoid unnecessary work, it is very important to promote regular understanding between the LPS designers and the architects and the structure constructors, and 3D CAD Tool will be very important to this process. An external LPS is intended to:

- a) Intercept a lightning flash to the structure (with an air-termination system);
- b) Conduct the lightning current safely towards earth (using a down-conductor system);
- c) Disperse the lightning current into the earth (using an earth-termination system).

LPS prevents dangerous sparking within the structure using either equipotential bonding or a separation distance

(and hence electrical insulation) between the external LPS components and other electrically conducting elements internal to the structure. The type and location of an LPS should be carefully considered in the initial design of a new structure, thereby enabling maximum advantage to be taken of the electrically conductive parts of the structure. By doing so, the design and construction of an integrated installation is made easier, the overall aesthetic aspects can be improved, and the effectiveness of the LPS can be increased at minimum cost and effort.

To the right positioning of the captor, the requisites recommended by the Standards and is considered in this work. The dimensioning of the protection system's captors for direct discharges in a building is considered to be a geometric problem since the adequate protection level is defined. The solution of this problem is the identification of the better distribution of captor elements over the installation, usually compound by aerial terminals like masts with sensors Franklin and nude cables.

There are 3 models admitted by the Standards in Brazil: Electrogeometric Model, Franklin Method, and Faraday Method. In this work we implement only the Electrogeometric and Franklin methods. Figure 7 and figure 8 present the Standards recommendations for both.

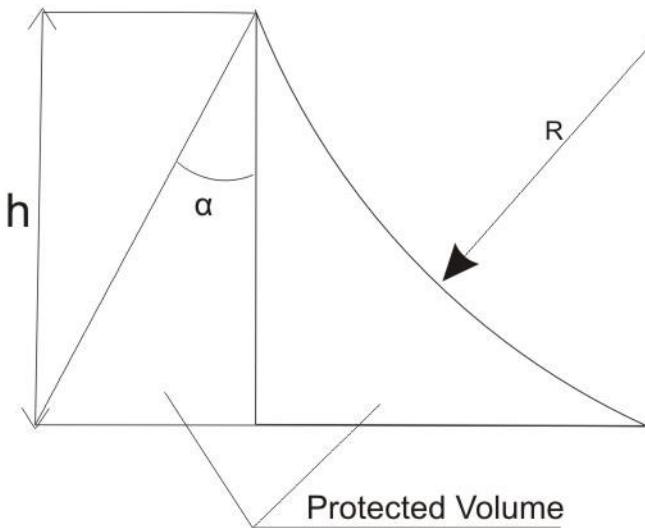


Fig. 7. Protected Volume : R=Radius of the Rolling Sphere, α = Protection Angle (Franklin Method), h=Captor height

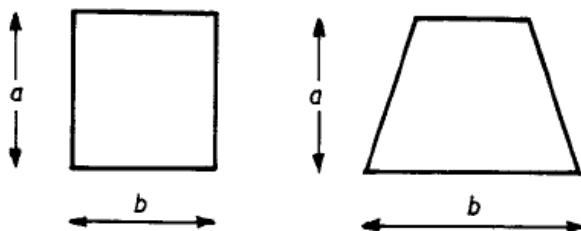


Fig. 8. Faraday Moethod. Mesh: a=Mesh Width, b=Mesh Length

CASE STUDY

It's proposed, in this work, the LPS design of one building of the Federal University of Uberlandia, Brazil, where the LTAD is installed. This building was constructed with proposes of pursuing research on oil and gas. The new infrastructure allow, besides other tests, wear tests of sliding

flexible lines (pipelines linking the oil well to the platform), in scale under the same conditions that exist on platforms at sea. The building is presented in figure 9.



Fig. 9. 3D Model LTAD (Laboratory of Technology in Friction and Wear) Building.

Figure 10 shows a 3D model created using Virtual Reality techniques. The Rolling Sphere Method applied, is presented in 3D with the protection volume in red, the calculation uses Protection Level I.

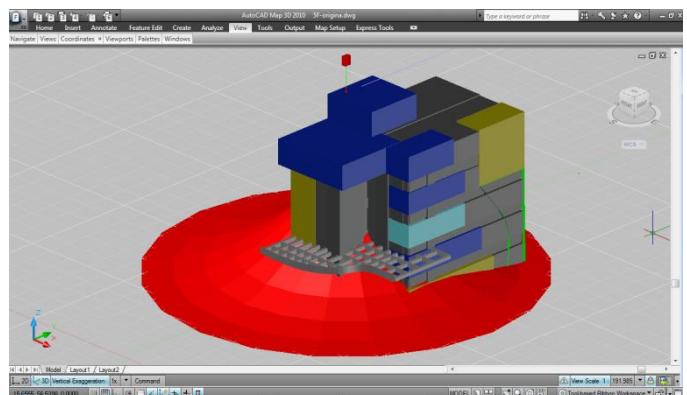


Fig. 10. 3D Building Protection using Rolling Sphere Method – Level I.

Analyzing the result presented in figure 10, it is easy to observe the incapacity to guarantee a good protection using only one rod, because the protection volume will just cover the inferior part of the building, and the extremities are unprotected. Figure 11 presents the result protection using 2 rods and a faraday cage designed for a driver set on the edges of the building.

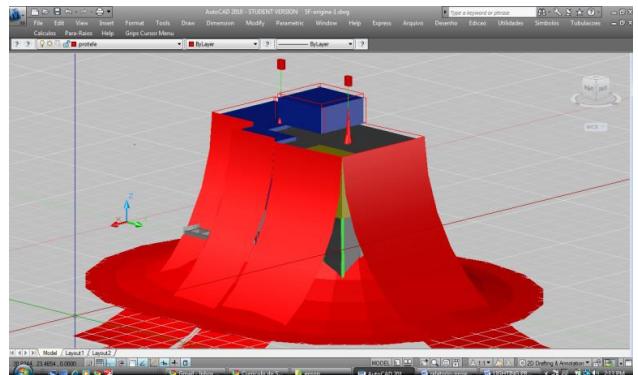


Fig. 11. 3D Building Protection using 2 rods and a Faraday Cage.

CONCLUSIONS

The proposed application is based on the most recent IEC standards, mainly the IEC 62305-2 and NBR 5419. The result software is able to perform the risk assessment due to lightning flashes to Earth, and the graphical computer simulation of the RSM, creating an AutoCAD drawing in 3D with the vulnerable points marked on the structure. Hence, reduced scale buildings are avoided, which is a burden task for designers. Many architecture and civil drawings are done by AutoCAD.

This is an advantage for AutoCAD users. Designers can use their drawings directly and they do not need any particular training. This application proved to be an easy tool and allows a proper understanding of the electro-geometric model, creating several scenarios for protective methods and focusing their attention on the main objective: protect goods and the human life.

REFERENCES

- [1] S. Ait-Amar and G. Berger: A Modified Version of the Rolling Sphere Method, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 16, No. 3*; June 2009.
- [2] R.B. Rodrigues*, V.M.F. Mendes*, J.P.S. Catalao *Computer Simulation for Lightning and Overvoltage Protection of Wind Power Plants* Journal of Electrostatics Volume 67, Issue 5, September 2009, Pages 774-780
- [3] R.H. Golde, *Lightning*, Vol. 1, *Physics of Lightning*, Academic Press,1977.
- [4] V. Rakov and M. A. Uman, *Lightning – Physics and Effects*, Cambridge University Press, UK, 2003.
- [5] E. P. Krider, "Benjamin Franklin and lightning rod", *Physics Today*,Vol. 59, No. 1, pp.42-48, 2006.
- [6] Standard of IEC, IEC 62305-2: "Protection against lightning - Part 2: Risk management", 2006.
- [7] Stojkovic, Zlatan, Stankic, Zivko: "AutoCAD-based concept for estimating lightning protection zone of transmission lines and structures." *International Journal of Electrical Engineering Education*. Outruber 2006.
- [8] M. P. Guimarães;;, B. B. Gnecco;;, M. Zuffo "Graphical Interaction Devices for Distributed Virtual Reality Systems". ACM Press. Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry. Singapura.pp 363-367.(2004)
- [9] Available: <http://www.3dconnexion.com/>.
- [10] E. R. Tufte. "The Visual Display of Quantitative Information" 2nd edition / Edward R. Tufte (ISBN 0961392142).