



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DANIEL AKIO MORITA

**ANÁLISE DE INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM PLANTAS
INDUSTRIAIS E RESIDENCIAIS PELO MODELO DO DESVIO DO CAMPO
ELÉTRICO**

FORTALEZA

2019

DANIEL AKIO MORITA

ANÁLISE DE INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM PLANTAS
INDUSTRIAIS E RESIDENCIAIS PELO MODELO DO DESVIO DO CAMPO ELÉTRICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Wilkley Bezerra
Correia

Coorientador: Dr. Ednardo Moreira Ro-
drigues

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M849a Morita, Daniel Akio.

Análise de incidência de descargas atmosféricas em plantas industriais e residenciais pelo modelo do desvio do campo elétrico / Daniel Akio Morita. – 2019.
129 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Wilkley Bezerra Correia.

Coorientação: Prof. Dr. Ednardo Moreira Rodrigues.

1. Descargas atmosféricas. 2. Desvio do campo elétrico. 3. Elementos finitos. 4. Sistema de proteção.
5. NBR 5419. I. Título.

CDD 621.3

DANIEL AKIO MORITA

ANÁLISE DE INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM PLANTAS
INDUSTRIAIS E RESIDENCIAIS PELO MODELO DO DESVIO DO CAMPO ELÉTRICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wilkley Bezerra Correia (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Ednardo Moreira Rodrigues (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Filipe Ribeiro Parente Garcia
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Soli Deo gloria

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter proporcionado essa experiência inesquecível e ter me guardado de todo o mal.

Ao meu pai, Teruyuki Morita. Seus conselhos me mantiveram firme e seu exemplo me motivou a não desistir.

À minha mãe, Sandra Regina Migoranci Morita. Seu carinho transcendeu milhares de quilômetros e suas palavras me direcionaram para o caminho em que se deve seguir.

À minha irmã, Tamires Morita, por todos os aprendizados e momentos compartilhados.

À minha linda namorada, Vitória Lima de Souza, por todo amor, companheirismo, carinho e dedicação.

Aos grandes amigos que fiz durante esses 5 anos na Engenharia Elétrica, José Rafael, Gabriel Marçal, Leonardo Milfont, Bruno Vasconcelos, Filipe Diógenes, Melissa Viana e Pedro Victor. Muito obrigado por cada momento, cada sessão de estudo, cada projeto, cada conversa e cada desafio que passamos juntos.

Ao meu orientador professor Wilkley Bezerra Correia pela orientação, conselhos, confiança e por cada umas proposições realizadas com o objetivo de tornar esse trabalho mais completo e robusto.

Ao meu co-orientador Ednardo Rodrigues. Agradeço pela paciência, pela atenção, pelos ensinamentos, pelo tempo despendido e por ter me guiado ao longo dessa jornada. Muito obrigado.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica e todos os seus membros.

Aos membros do Programa de Educação Tutorial (PET) Engenharia Elétrica. Vocês foram minha família cearense ao longo da graduação.

“E tu, ó filho do homem, não os temas, nem temas as suas palavras; ainda que estejam contigo sarças e espinhos, e tu habite entre escorpiões, não temas as suas palavras, nem te assustes com os seus semblantes (...)”

(Ezequiel 2:6)

RESUMO

Descargas atmosféricas são caracterizadas pela grande transferência de elétrons em um curto espaço de tempo. Tais fenômenos possuem grande potencial destrutivo, podendo inclusive ocasionar acidentes fatais. Com o intuito de evitar tais acidentes, diversos métodos de proteção foram desenvolvidos por pesquisadores e engenheiros em todo o mundo. Esse trabalho tem como objetivo apresentar um método alternativo de determinação de zonas de proteção propiciadas por um sistema de proteção contra descargas atmosféricas através da aplicação do Método do Desvio do Campo Elétrico, um modelo físico que descreve a trajetória de descargas atmosféricas. Para isso, implementou-se o modelo em um software que aplica o Método dos Elementos Finitos com a finalidade de simular a incidência de descargas atmosféricas sobre duas estruturas hipotéticas utilizadas como estudo de caso, sendo elas uma residencial e outra industrial. Ao longo desse trabalho são apresentados definições e princípios do Método dos Elementos Finitos, bem como os principais modelos que descrevem o comportamento de relâmpagos, os métodos de proteção, de avaliação de riscos e os passos para realização do projeto de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, de acordo com a norma técnica brasileira que estabelece os parâmetros necessários para redução dos riscos associados às descargas atmosféricas, a ABNT NBR 5419:2015. As simulações conduzidas ao longo desse estudo foram realizadas em dois diferentes casos, o primeiro deles apresenta ambas as estruturas sem um sistema de proteção contra descargas atmosféricas e o segundo apresenta ambas as estruturas devidamente protegidas após a implementação do projeto de um sistema de proteção, realizado de acordo com as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 5419:2015. A partir da realização deste trabalho, foi possível criar um fluxograma com os passos para implementação do Método do Desvio do Campo Elétrico no software de simulação utilizado. Também foi possível constatar a baixa complexidade de implementação do método, o que o coloca como uma opção alternativa para simulação do comportamento de descargas atmosféricas e comprovação da eficácia dos métodos de determinação de zonas de proteção formadas por um sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

Palavras-chave: Descarga atmosférica. Desvio do Campo Elétrico. Elementos Finitos. Sistema de proteção. NBR 5419.

ABSTRACT

Lightning strikes are characterized by large electron transfer in a short length of time. Such discharges have great destructive potential and may lead to fatal accidents. In order to prevent such accidents, several protection methods have been developed by researchers and engineers around the world. This final course assignment aims to present an alternative method for determining protection zones provided by a lightning protection system by applying the Electric Field Deflexion Method, a physical model that describes lightnings trajectory. The model was applied in a computer software that simulates, through the finite element method, a lightning storm over two hypothetical structures, one residential and the another one, an industrial structure. Throughout this work, definitions and principles of the Finite Element Method are presented, as well as the main models that describe the behavior of lightnings, the protection methods, the risk assessment and the steps for designing a lightning protection system according to the Brazilian technical standard ABNT NBR 5419:2015 that establishes the necessary parameters to reduce the risks associated with lightning strikes. The simulations conducted throughout this study were performed in two different cases, the first presents both structures unprotected against lightning strikes and the second presents both structures properly protected after the implementation of the protection system projected according to the guidelines established by ABNT NBR 5419:2015. From this work, it was possible to create a flowchart with the steps to implement the Electric Field Deflexion Method in the simulation software used. It was also noted the low complexity during the implementation of the method, which makes it an alternative option for simulating lightning strikes behavior and establish the effectiveness of the methods used to determine protection zones generated by a lightning protection system.

Keywords: Lightning Strikes. Electric Field Deflexion Method. Finite Elements. Protection System. NBR 5419.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração dos tipos de descargas atmosféricas existentes na natureza. a) Nuvem-solo descendente negativa; b) Nuvem-solo descendente positiva; c) Nuvem-solo ascendente negativa; d) Nuvem-solo ascendente positiva; e) intranuvens; f) Descarga para o ar; g) Entre nuvens.	26
Figura 2 – Modelo Eletrogeométrico	28
Figura 3 – Diagrama do líder descendente descrito pelo <i>Electric Field Deflexion</i> / Desvio do Campo Elétrico (<i>EFD</i>)	30
Figura 4 – Ilustração do volume de proteção provido por um mastro	32
Figura 5 – Ilustração do método da esfera rolante	33
Figura 6 – Rede de elementos finitos	34
Figura 7 – Triângulo utilizado na subdivisão do domínio	42
Figura 8 – Procedimento para decisão da necessidade da proteção e para selecionar medida de proteção	51
Figura 9 – Fachada norte da edificação residencial	52
Figura 10 – Fachada leste da edificação industrial	53
Figura 11 – SPDA externo da cobertura da edificação residencial	55
Figura 12 – Detalhe fachada norte com SPDA externo da edificação residencial	55
Figura 13 – Legenda de símbolos utilizados no projeto do SPDA externo da edificação residencial	56
Figura 14 – Cobertura com SPDA externo da edificação industrial	57
Figura 15 – Fachada leste com SPDA externo da edificação industrial	57
Figura 16 – Passo a passo para criação de um projeto no Comsol com aplicação do <i>EFD</i>	58
Figura 17 – Seleção de geometria	59
Figura 18 – Seleção de geometria	59
Figura 19 – Seleção de estudo	59
Figura 20 – Criação de elementos	60
Figura 21 – Exemplo de sistema e seus componentes	61
Figura 22 – Exemplo de definição da variável <i>lambda</i> para um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) de classe IV	61
Figura 23 – Exemplo de aplicação da equação do <i>EFD</i> em um modelo bidimensional	62
Figura 24 – Exemplo de inserção de permeabilidade em uma estrutura	63

Figura 25 – Exemplo de construção de malha	64
Figura 26 – Exemplo de plotagem de descargas atmosféricas em geometria bidimensional	65
Figura 27 – Potencial elétrico fachada norte instalação residencial sem SPDA	66
Figura 28 – Potencial elétrico fachada norte instalação residencial com SPDA	67
Figura 29 – Campo elétrico fachada norte instalação residencial sem SPDA	68
Figura 30 – Campo elétrico fachada norte instalação residencial protegida	68
Figura 31 – Descarga atmosférica sobre fachada norte instalação residencial sem SPDA	69
Figura 32 – Descarga atmosférica sobre fachada norte em instalação residencial protegida	69
Figura 33 – Descarga atmosférica sobre fachada norte em detalhe de instalação residencial com SPDA	70
Figura 34 – Esfera rolante sobre fachada norte instalação residencial	71
Figura 35 – Detalhe esfera rolante sobre fachada norte instalação residencial	71
Figura 36 – Descarga atmosférica sobre fachada norte em instalação residencial com SPDA projetado de acordo com <i>Rolling Sphere Method</i> / Método das Esferas Rolantes (<i>RSM</i>)	72
Figura 37 – Potencial elétrico modelo tridimensional instalação residencial sem SPDA .	72
Figura 38 – Potencial elétrico modelo tridimensional instalação residencial com SPDA .	73
Figura 39 – Descargas atmosféricas sobre instalação residencial sem SPDA	74
Figura 40 – Detalhe descargas atmosféricas sobre instalação residencial sem SPDA . . .	74
Figura 41 – Descargas atmosféricas sobre instalação residencial com SPDA	75
Figura 42 – Detalhe descargas atmosféricas sobre instalação residencial com SPDA . . .	75
Figura 43 – Malha da instalação residencial com SPDA refinada	76
Figura 44 – Detalhe descargas atmosféricas sobre instalação residencial com SPDA com malha refinada	77
Figura 45 – Potencial elétrico fachada leste instalação industrial sem SPDA	78
Figura 46 – Potencial elétrico fachada leste instalação industrial com SPDA	79
Figura 47 – Campo elétrico fachada leste instalação industrial sem SPDA	79
Figura 48 – Campo elétrico fachada leste instalação industrial com SPDA	80
Figura 49 – Descarga atmosférica sobre fachada leste em instalação industrial sem SPDA	80
Figura 50 – Descarga atmosférica sobre fachada leste em instalação industrial com SPDA	81
Figura 51 – Esfera rolante sobre edificação industrial com SPDA	81
Figura 52 – Detalhe esfera rolante sobre edificação industrial com SPDA	82

Figura 53 – Potencial elétrico modelo tridimensional instalação industrial sem SPDA . . .	82
Figura 54 – Potencial elétrico modelo tridimensional instalação industrial com SPDA . . .	83
Figura 55 – Descargas atmosféricas sobre instalação industrial sem SPDA	84
Figura 56 – Descargas atmosféricas sobre instalação industrial com SPDA	84
Figura 57 – SPDA externo da cobertura da edificação residencial	112
Figura 58 – Detalhe fachada leste com SPDA externo da edificação residencial	112
Figura 59 – Detalhe fachada oeste com SPDA externo da edificação residencial	113
Figura 60 – Detalhe fachada norte com SPDA externo da edificação residencial	113
Figura 61 – Detalhe fachada sul com SPDA externo da edificação residencial	114
Figura 62 – Legenda de símbolos utilizados no projeto do SPDA externo da edificação residencial	114
Figura 63 – Fachada leste com SPDA externo da edificação residencial	115
Figura 64 – Fachada oeste com SPDA externo da edificação residencial	116
Figura 65 – Fachada norte com SPDA externo da edificação residencial	117
Figura 66 – Fachada sul com SPDA externo da edificação residencial	118
Figura 67 – Cobertura com SPDA externo da edificação industrial	119
Figura 68 – Fachada leste com SPDA externo da edificação industrial	119
Figura 69 – Fachada oeste com SPDA externo da edificação industrial	119
Figura 70 – Fachada norte com SPDA externo da edificação industrial	120
Figura 71 – Fachada sul com SPDA externo da edificação industrial	120
Figura 72 – Potencial fachada sul instalação residencial com SPDA	121
Figura 73 – Potencial fachada oeste instalação residencial com SPDA	122
Figura 74 – Potencial fachada leste instalação residencial com SPDA	122
Figura 75 – Campo elétrico fachada leste instalação residencial com SPDA	123
Figura 76 – Campo elétrico fachada oeste instalação residencial com SPDA	123
Figura 77 – Campo elétrico fachada sul instalação residencial com SPDA	124
Figura 78 – Descarga atmosférica sobre fachada oeste instalação residencial com SPDA	124
Figura 79 – Descarga atmosférica sobre fachada leste instalação residencial com SPDA .	125
Figura 80 – Descarga atmosférica sobre fachada sul instalação residencial com SPDA . .	125
Figura 81 – Potencial fachada sul instalação industrial com SPDA	126
Figura 82 – Potencial fachada norte instalação industrial com SPDA	126
Figura 83 – Potencial fachada oeste instalação industrial com SPDA	127

Figura 84 – Campo elétrico fachada norte instalação industrial com SPDA	127
Figura 85 – Campo elétrico fachada oeste instalação industrial com SPDA	128
Figura 86 – Campo elétrico fachada sul instalação industrial com SPDA	128
Figura 87 – Descarga atmosférica sobre fachada sul instalação industrial com SPDA . .	129
Figura 88 – Descarga atmosférica sobre fachada norte instalação industrial com SPDA .	129
Figura 89 – Descarga atmosférica sobre fachada oeste instalação industrial com SPDA .	130

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>EFD</i>	<i>Electric Field Deflexion</i> / Desvio do Campo Elétrico
<i>FEM</i>	<i>Finite Element Method</i> / Método dos Elementos Finitos
<i>PDE</i>	<i>Partial Differential Equation</i> / Equação Diferencial Parcial
<i>RSM</i>	<i>Rolling Sphere Method</i> / Método das Esferas Rolantes
CPL	Conceito do Potencial Líder
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surto
MEG	Modelo Eletrogeométrico
MLP	Modelo do Líder Progressivo
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Carga elétrica do líder descendente
R_s	Raio da esfera produzida pela carga elétrica do líder descendente
\vec{E}_L	Vetor Direção da propagação da descarga atmosférica
\vec{E}	Vetor intensidade campo elétrico
λ	Profundidade de desvio
∇E	Operador gradiente do módulo do campo
\vec{r}	Vetor posição da descarga líder
$V(\vec{r})$	Vetor potencial sobre a posição da descarga líder
$E(\vec{r})$	Campo elétrico na posição da descarga líder
A	Topo do captor
B	Plano de referência
OC	Raio da base do cone de proteção
h_1	Altura do mastro acima do plano de referência
α	ângulo de proteção
r	Raio da esfera rolante
F	Função admissível
y	Função
$v(x)$	Função aproximadora
ϕ_i	Função de forma linearmente independente
a_i	Parâmetro de deslocamento
L	Operador
v	Função que satisfaz condições de contorno
ε	Resíduo
Π	Funcional
\vec{H}	Vetor intensidade do campo magnético
\vec{B}	Vetor densidade do campo magnético

\vec{S}	Vetor densidade superficial de corrente elétrica
ρ	Densidade volumétrica de cargas
μ	Permeabilidade magnética (Henry/metro)
ϵ	Permissividade elétrica(Faraday/metro)
σ	Condutividade elétrica (1/(Ohm · metro))
\vec{A}	Potencial vetor A
Ω	Domínio em que se busca a solução para o problema do <i>Finite Element Method</i> / Método dos Elementos Finitos (<i>FEM</i>)
Γ	Contorno externo retangular em torno de estrutura magnética
g	Função de teste
R_j	Parâmetro que representa potenciais nos nós das malhas
$S1$	Fonte de dano: descargas atmosféricas na estrutura
$S2$	Fonte de dano: descargas atmosféricas perto da estrutura
$S3$	Fonte de dano: descargas atmosféricas na linha
$S4$	Fonte de dano: descargas atmosféricas perto da linha
$D1$	Dano: ferimentos a seres vivos por choques elétricos
$D2$	Dano: danos físicos
$D3$	Dano: falhas de sistemas eletroeletrônicos
$L1$	Perda: perda de vida humana (incluindo ferimentos permanentes)
$L2$	Perda: perda de serviço ao público
$L3$	Perda: perda de patrimônio cultural
$L4$	Perda: perda de valores econômicos (estrutura, conteúdo, e perdas de atividades)
$R1$	Risco de perdas ou danos permanentes em vidas humanas
$R2$	Risco de perdas de serviço ao público
$R3$	Risco de perdas ou danos permanentes em vidas humanas
$R4$	Risco de perdas de valor econômico (opcional)

R_A	: Componente relativo a ferimentos aos seres vivos causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentro da estrutura e fora nas zonas até 3 m ao redor dos condutores de descidas
R_B	: Componente relativo a danos físicos causados por centelhamentos perigosos dentro da estrutura iniciando incêndio ou explosão, os quais podem também colocar em perigo o meio ambiente
R_C	: Componente relativo a falhas de sistemas internos causados por LEMP (pulsos eletromagnéticos devido aos raios) por conta de descargas que atingem a estrutura
R_M	: Componente relativo a falhas de sistemas internos causados por LEMP por conta de descargas que atingem áreas próximas à estrutura
R_U	: Componente relativo a ferimentos aos seres vivos causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentro da estrutura
R_V	: Componente relativo a danos físicos (incêndio ou explosão iniciados por centelhamentos perigosos entre instalações externas e partes metálicas geralmente no ponto de entrada da linha na estrutura) devido à corrente da descarga atmosférica transmitida ou ao longo das linhas
R_W	: Componente relativo a falhas de sistemas internos causados por sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura e transmitidas a esta
R_Z	: Componente relativo a falhas de sistemas internos causados por sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura e transmitidas a esta
N_X	Número de eventos perigosos por ano
P_X	Probabilidade de dano à estrutura
L_X	Perda consequente
C_0	Capacitância no vácuo
N_D	Número de eventos perigosos devido à descargas atmosféricas em uma estrutura
P_A	Probabilidade de ferimentos de seres vivos por choque elétrico (descargas atmosféricas à estrutura)

L_A	Perda relacionada aos ferimentos a seres vivos por choque elétrico (descargas atmosféricas à estrutura)
P_B	Probabilidade de danos físicos à estrutura (descargas atmosféricas à estrutura)
L_B	Perda em uma estrutura relacionada a danos físicos (descargas atmosféricas à estrutura)
N_L	Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas a uma linha
N_{DJ}	Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas em uma estrutura adjacente
P_U	Probabilidade de ferimentos de seres vivos por choque elétrico (descargas atmosféricas perto da linha conectada)
L_U	Perda relacionada a ferimentos de seres vivos por choque elétrico (descargas atmosféricas na linha)
P_V	Probabilidade de danos físicos à estrutura (descargas atmosféricas perto da linha conectada)
L_V	Perda em uma estrutura devido a danos físicos (descargas atmosféricas na linha)
P_C	Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas à estrutura)
L_C	Perda relacionada à falha dos sistemas internos (descargas atmosféricas à estrutura)
N_M	Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas perto de uma estrutura
P_M	Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da linha conectada)
L_M	Perda relacionada à falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da estrutura)
P_W	Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas na linha conectada)
L_W	Perda devido à falha de sistemas internos (descargas atmosféricas na linha)

N_I	Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas perto de uma linha
P_Z	Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da linha conectada)
L_Z	Perda relacionada à falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da linha)
N_G	Densidade de descargas atmosféricas para a terra
A_D	Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas a uma estrutura isolada
C_D	Fator de localização
L	Largura
W	Comprimento
H	Altura
P_{TA}	Probabilidade de reduzir P_A dependendo das medidas de proteção contra tensões de toque e passo
r_t	Fator de redução associado ao tipo de superfície do solo
L_T	Perda devido a ferimentos por choque elétrico
n_z	Número de possíveis pessoas em perigo (vítimas ou usuários não servidos)
n_t	Número total de pessoas (ou usuários atendidos) esperado
t_z	Tempo, em horas por ano, que pessoas estão presentes em um local perigoso
r_p	Fator redutor de perda devido às precauções contra incêndio
r_f	Fator redutor de perda dependente do risco de incêndio
h_z	Fator de aumento de perda quando um perigo especial está presente
L_F	Perda em uma estrutura devido a danos físicos
A_L	Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas em uma linha
C_I	Fator de instalação de uma linha
C_E	Fator ambiental
C_T	Fator de tipo de linha para um transformador AT/BT na linha
L_L	Comprimento de uma seção da linha

P_{TU}	Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha dentro a estrutura e cause choque a seres vivos devido a tensões de toque perigosas
P_{EB}	Probabilidade de reduzir P_U e P_V dependendo das características da linha e da tensão suportável do equipamento quando E_B (ligação equipotencial) é instalada
P_{LD}	Probabilidade de reduzir P_U , P_V e P_W dependendo das características da linha e da tensão suportável do equipamento (descargas atmosféricas na linha conectada)
C_{LD}	Fator dependente da blindagem, aterramento e condições de isolamento da linha para descargas atmosféricas na linha
P_{SPD}	Probabilidade de reduzir P_C , P_M , P_W e P_Z quando um sistema coordenado de DPS está instalado
L_O	Perda em uma estrutura devido à falha de sistemas internos
A_M	Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas perto de uma estrutura
P_{MS}	Valor obtido a partir do produto de variáveis que consideram eficiência da blindagem da malha, características da fiação interna e tensão suportável de impulso do sistema a ser protegido
K_{S1}	Fator relevante à efetividade da blindagem por malha de uma estrutura
K_{S2}	Fator relevante à efetividade da blindagem por malha dos campos internos de uma estrutura
K_{S3}	Fator relevante às características do cabeamento interno
K_{S4}	Fator relevante à tensão suportável de impulso de um sistema
A_I	Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas perto de uma linha
P_{LI}	Probabilidade de reduzir P_Z dependendo das características da linha e da tensão suportável do equipamento (descargas atmosféricas perto da linha conectada)
C_{LI}	Fator dependente da blindagem, aterramento e condições de isolamento da linha para descargas atmosféricas perto da linha

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	Motivação	22
1.2	Justificativa	22
1.3	Objetivo	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	Descargas atmosféricas	25
2.2	Modelos de descargas atmosféricas	27
2.2.1	<i>Modelo Eletrogeométrico</i>	28
2.2.2	<i>Modelo do Líder Progressivo</i>	28
2.2.3	<i>Conceito do Potencial Líder</i>	29
2.2.4	<i>Método do desvio do campo elétrico</i>	29
2.3	Métodos de proteção contra descargas atmosféricas	30
2.3.1	<i>Método Franklin</i>	31
2.3.2	<i>Método Gaiola de Faraday</i>	31
2.4	Método dos elementos finitos	33
3	METODOLOGIA	47
3.1	NBR 5419	47
3.1.1	<i>Cálculo do risco para edificação residencial</i>	50
3.1.2	<i>Cálculo do risco para edificação industrial</i>	52
3.2	Projeto de SPDA externo	53
3.2.1	<i>Projeto SPDA externo para edificação residencial</i>	54
3.2.2	<i>Projeto SPDA externo para edificação industrial</i>	55
3.3	Tutorial de aplicação do EFD: Software COMSOL Multiphysics®	57
3.3.1	<i>Criação do projeto</i>	58
3.3.2	<i>Criação de elementos e estruturas</i>	60
3.3.3	<i>Definição de variáveis e aplicação de parâmetros físicos</i>	60
3.3.4	<i>Criação da malha</i>	63
3.3.5	<i>Simulação</i>	64
4	RESULTADOS	66
4.1	Simulação em planta residencial	66

4.2	Simulação em planta industrial	78
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	86
	REFERÊNCIAS	88
	APÊNDICES	90
	APÊNDICE A – Memorial Cálculo do Risco	90
A.1	Cálculo do risco edificação residencial	90
A.1.1	<i>Edificação predial sem SPDA</i>	90
A.1.2	<i>Edificação residencial com SPDA</i>	94
A.2	Cálculo do risco edificação industrial	98
A.2.1	<i>Edificação industrial sem SPDA</i>	98
A.2.2	<i>Edificação industrial com SPDA</i>	105
	APÊNDICE B – Projeto do SPDA externo da edificações	112
	APÊNDICE C – Resultados das simulações	121
C.1	Resultado das simulações bidimensionais das estruturas com sistema de proteção contra descargas atmosféricas implementado	121

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo introduzir o presente trabalho, apresentando o que motivou sua realização, a justificativa por trás de sua execução e seus objetivos.

1.1 Motivação

Os raios intrigam a humanidade desde os primórdios da civilização. Suas ocorrências foram relacionadas por muitas culturas, como a babilônica, grega, romana e nórdica como uma manifestação do sobrenatural. Na mitologia, relâmpagos eram utilizados como ferramentas e até mesmo armas por heróis e divindades. Apesar de muitas indagações relacionadas a esse fenômeno já terem sido respondidas e diversos procedimentos, equipamentos, normas e sistemas terem sido desenvolvidos para proteger humanos, animais e estruturas contra essa manifestação da natureza, as descargas atmosféricas ainda intrigam cientistas e pesquisadores ao redor do mundo, pois muitas de suas características ainda não são totalmente conhecidas. A motivação da realização desse trabalho foi de responder, por meio de simulações utilizando os mais recentes modelos físicos propostos pela comunidade acadêmica e projetos baseados na principal norma brasileira de proteção contra descargas atmosféricas, o seguinte questionamento: um sistema de proteção contra descargas atmosféricas devidamente instalado garante a proteção da estrutura para o qual foi projetado, ou os modelos utilizados para determinação das zonas de proteção utilizados atualmente encontram-se ultrapassados?

1.2 Justificativa

Segundo o grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), primeiro grupo de pesquisa sobre raios criado no Brasil e participante do Centro de Ciências do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, o Brasil é líder mundial em registros de descargas atmosféricas com uma média de 77,8 milhões de raios por ano. Do período de 2000 à 2017 foram registradas 2044 mortes em território nacional, o que significa que, a cada 50 mortes por descargas atmosféricas no mundo, uma ocorre no Brasil, sendo que 18% das fatalidades tomaram lugar dentro de residências (ELAT, 2019). Esses números ressaltam a importância da presença de SPDA em edificações. A norma brasileira responsável por regulamentar os critérios para projeto, instalação e manutenção das medidas de proteção é a ABNT NBR 5419:2015. Apesar das medidas de proteções consideradas na NBR 5419 serem comprovadamente eficazes na redução

dos riscos associados às descargas atmosféricas, os métodos utilizados para determinação das zonas de proteção propiciadas por um SPDA podem apresentar elevada dificuldade de implementação, principalmente quando estão envolvidas estruturas de topologia complexa.

1.3 Objetivo

O objetivo desse trabalho é apresentar um método alternativo para determinação de zonas de proteção propiciadas por um SPDA por meio da aplicação de um novo método utilizado para descrever as trajetórias de descargas atmosféricas, o *EFD* proposto por Rodrigues (2019) e criar um guia para implementação do mesmo em um software de simulação. Para isso, são apresentados dois estudos de caso, sendo eles uma edificação residencial e uma edificação industrial, ambas hipotéticas. Todos os passos, do projeto e cálculo de gerenciamento de risco dos sistemas de proteção de acordo com a NBR 5419:2015 até a implementação do *EFD* em um software que simula a trajetória de descargas atmosféricas por meio do *FEM* é descrito ao longo desse trabalho. Para isso, esse trabalho foi dividido em 5 diferentes capítulos.

O Capítulo 1, introdutório, tem como objetivo contextualizar o leitor a cerca do tema, por meio da apresentação das motivações, justificativas e objetivos que levaram à produção deste trabalho.

O Capítulo 2, Fundamentação Teórica, aborda conceitos e fundamentos relacionados aos diferentes tipos de descargas atmosféricas e sua formação, os principais modelos de descargas atmosféricas utilizados para descrever o comportamento de raios, os métodos de proteção contra descargas atmosféricas apresentados pela NBR 5419:2015 e também definições e princípios do método *FEM*, utilizado para implementação do *EFD* em um software de simulação.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada ao longo desse trabalho, onde são exibidos os passos para o cálculo do gerenciamento de risco para o projeto dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas para ambas as edificações, residencial e industrial. Também é apresentado os projetos de SPDA que foram produzidos, bem como um tutorial de aplicação do *EFD* no software escolhido para a realização das simulações: o COMSOL.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com as simulações realizadas, exibindo o potencial, o campo elétrico e a trajetória das descargas atmosféricas em ambas as estruturas em duas diferentes situações, a edificação sem um sistema de proteção, e a edificação com um sistema de proteção e em dois diferentes casos, o projeto realizado em duas dimensões, e para o projeto realizado em três dimensões.

O Capítulo 5 conclui o trabalho, respondendo, por meio das observações dos resultados obtidos, os questionamentos levantados ao longo desta seção, bem como levanta novos questionamentos e indica possíveis trabalhos futuros a serem realizados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta conceitos e fundamentos teóricos que serão abordados ao longo do trabalho e foi dividido em quatro partes:

1. Descargas atmosféricas;
2. Modelos de descargas atmosféricas;
3. Métodos de proteção contra descargas atmosféricas;
4. Método dos Elementos Finitos.

A primeira parte, Descargas atmosféricas, situa o leitor em relação ao principal fenômeno físico abordado ao longo deste trabalho, o raio, tratando sobre os diferentes tipos de descargas atmosféricas e sua formação. A segunda parte, Modelos de descargas atmosféricas, descreve os principais modelos existentes utilizados para retratar o comportamento físico de um raio, sendo um deles aplicado nas simulações apresentadas na Seção 3.3. A terceira parte, Métodos de proteção contra descargas atmosféricas, apresenta os métodos citados pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015c) para posicionamento de subsistemas de captação de raios, sendo um deles aplicado nos projetos de SPDA dos estudos de caso da Seção 3.2. A quarta parte, Método dos elementos finitos, discorre sobre princípios, conceitos, definições e um exemplo aplicado ao eletromagnetismo do *FEM*, método utilizado nas simulações apresentadas ao longo do trabalho.

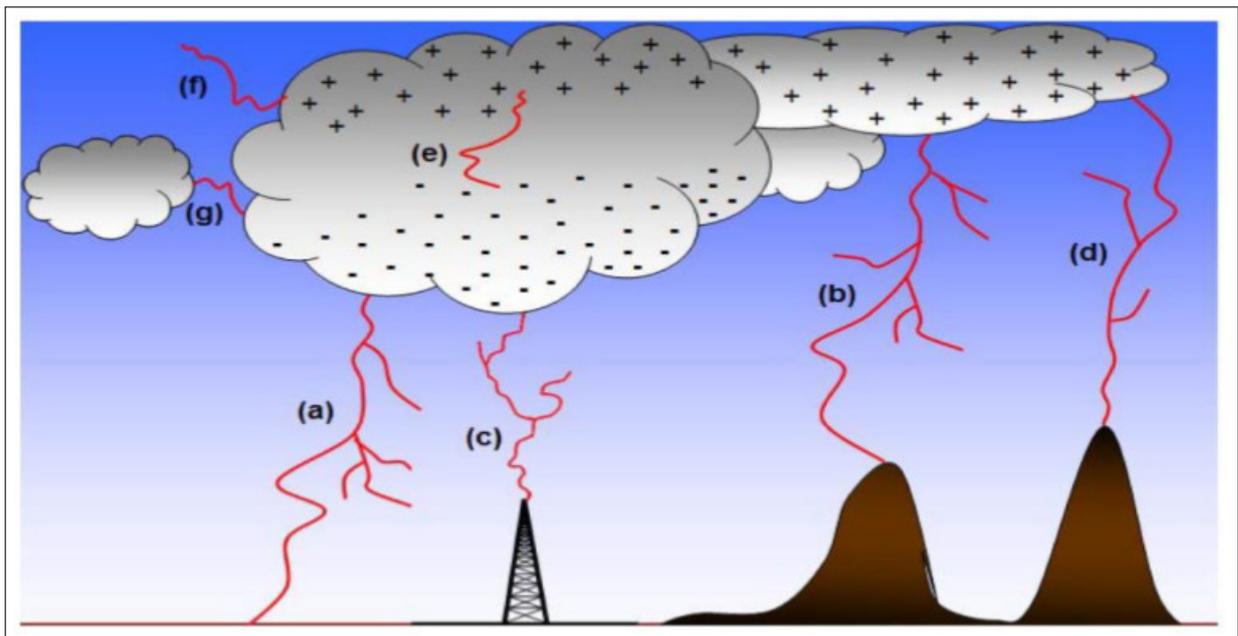
2.1 Descargas atmosféricas

Originadas nas nuvens *Cumulonimbus* (POTIER *et al.*, 2010), as descargas atmosféricas são fenômenos que ocorrem na natureza e são caracterizadas pela transferência de grande quantidade de elétrons de um ponto a outro em um curto espaço de tempo. Existem diferentes tipos de descargas, podendo ser elas intra-nuvem, nuvem-solo, solo-nuvem e entre nuvens. As descargas também pode ser descendentes (origem nas nuvens com ramificações em direção ao solo), ascendentes (originadas no solo e com ramificações em direção a terra), positivas e negativas. A classificação das descargas atmosféricas por Romero (2007) encontra-se abaixo e uma ilustração das mesmas encontra-se na Figura 1.

- a) Descargas nuvem-solo negativas: ocorrem da nuvem para o solo, transferindo cargas negativas de uma região carregada de dentro de uma nuvem para o solo;
- b) Descargas nuvem-solo positivas: originam-se na nuvem e partem para o solo,

- ocorrendo a transferência de elétrons do solo para a nuvem, equivalendo ao transporte de cargas positivas de dentro da nuvem para o solo;
- c) Descargas solo-nuvem negativas: originam-se no solo e partem para a nuvem, transferindo cargas negativas do solo para a nuvem, equivalendo ao transporte de cargas positivas da nuvem para o solo;
 - d) Descargas solo-nuvem positivas: originam-se no solo e partem para a nuvem, transferindo cargas negativas do solo para a nuvem, equivalendo ao transporte de cargas positivas da nuvem para o solo;
 - e) Descargas intranuvens: ocorrem dentro das nuvens;
 - f) Descargas no ar: ocorrem da nuvem para outro ponto na atmosfera;
 - g) Descargas entre nuvens: ocorrem entre nuvens

Figura 1 – Ilustração dos tipos de descargas atmosféricas existentes na natureza. a) Nuvem-solo descendente negativa; b) Nuvem-solo descendente positiva; c) Nuvem-solo ascendente negativa; d) Nuvem-solo ascendente positiva; e) intranuvens; f) Descarga para o ar; g) Entre nuvens.



Fonte: Adaptado de Romero (2007)

Os raios não ocorrem apenas em dias de tempestade, mas também em dias claros. Podem possuir diferentes aspectos como ramificado, bifurcado, trifurcado, zigue-zague, tipo fita ou até mesmo apresentar deslocamento horizontal. O tipo mais comum de descargas atmosféricas, responsável por representar 70% do número total é a descarga intranuvens (POTIER *et al.*, 2010).

Apesar de não serem as descargas com maior quantidade de ocorrência, as descargas atmosféricas nuvem-solo são as de maior interesse por estarem relacionadas com a segurança

dos seres humanos. Sueta (2005) diz que, para sua ocorrência, é necessário que a nuvem esteja carregada com cargas elétricas negativas e positivas que são geradas através dos seguintes mecanismos descritos por Potier *et al.* (2010):

- a) Processo Colisional Indutivo: ocorre devido às colisões entre granizos e cristais de gelo;
- b) Processo Colisional Termoelétrico: considera a temperatura como fator preponderante na determinação da polaridade da carga transferida.

A etapa inicial da formação de uma descarga nuvem-solo de polaridade negativa, denominada por período de quebra de rigidez preliminar se inicia com fracas descargas dentro da nuvem, originadas pelas diferentes cargas presentes nas regiões superiores e inferiores da nuvem. Ao final desse processo, uma das descargas, chamada de líder escalonado, também conhecido como *stepped leader*, se dirige da nuvem para o solo. Conforme o líder escalonado se aproxima da terra, um campo elétrico intenso é gerado e, nos locais em que o valor desse campo excede a rigidez dielétrica do ar, uma ou mais descargas ascendentes podem acontecer (GARCIA, 2016), essas descargas, por sua vez, se unem ao líder escalonado em um processo conhecido como junção, ou *attachment* (SUETA, 2005). Nesse momento, ocorre o estabelecimento de uma onda de corrente de alta intensidade definida por Visacro (2005) como corrente de retorno, sendo ela o componente mais importante em uma descarga atmosférica devido a seus parâmetros físicos (SUETA, 2005).

Os raios de polaridade positiva, diferente dos de polaridade negativa, possuem um líder escalonado com menor luminosidade e que não apresenta etapas, apenas uma luminosidade contínua com variações de intensidade e, na maior parte, somente uma descarga de retorno (POTIER *et al.*, 2010).

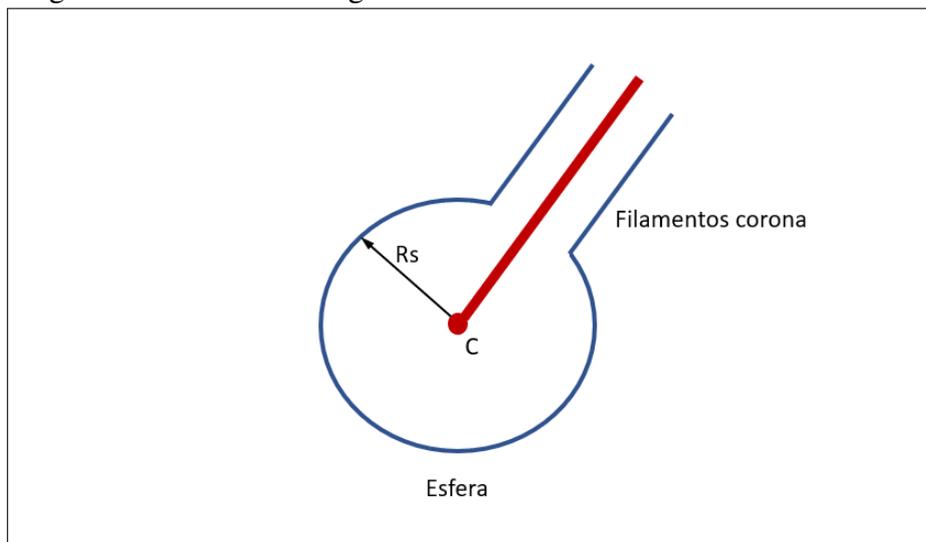
2.2 Modelos de descargas atmosféricas

Com o objetivo de descrever o comportamento dos raios, foram desenvolvidos diferentes modelos físicos e computacionais, dentre eles o Modelo Eletrogeométrico (MEG), o Modelo do Líder Progressivo (MLP), o Conceito do Potencial Líder (CPL) e o *EFD* que serão descritos a seguir.

2.2.1 Modelo Eletrogeométrico

O Modelo Eletrogeométrico, também conhecido como *RSM*, é o mais simples e usual. Ele é representado na Figura 2 e toma como premissa que uma carga elétrica do líder descendente (C) produz um campo elétrico em formato de esfera (de raio R_s) e com filamentos corona (POTIER *et al.*, 2010).

Figura 2 – Modelo Eletrogeométrico



Fonte: Adaptado de Potier *et al.* (2010)

O MEG é caracterizado por apresentar por meio de equações a “distância de atração” de um raio. Existem diferentes equações formuladas por diferentes autores como apresentado por Potier *et al.* (2010).

2.2.2 Modelo do Líder Progressivo

Diferente do MEG, avaliações dos efeitos de descargas atmosféricas em projetos de proteção contra raios que utilizam o MLP se baseiam em parâmetros físicos das descargas, e não na distância de atração. Para isso, o MLP considera similaridades entre descargas atmosféricas e descargas elétricas em longos espaçamentos de ar (POTIER *et al.*, 2010). Para sua descrição matemática, é necessário o cálculo do campo elétrico utilizando diferentes métodos (método de simulação de cargas empregando cargas em anel unipolar, cargas em segmento de retas e cargas pontuais) e em diferentes tempos com o intuito de simular o deslocamento da carga.

2.2.3 Conceito do Potencial Líder

O CPL é apresentado por Potier *et al.* (2010) como um modelo alternativo em que se aplicam métodos computacionais para determinação de campos elétricos dado à interação entre um líder descendente negativo proveniente de uma descarga atmosférica nuvem-solo e de uma estrutura. A aplicação desse modelo retrata a relação entre o líder descendente negativo e o líder ascendente positivo, bem como suas respectivas interações com estruturas presentes no sistema.

Para simular as cargas presentes, emprega-se a equação de Poisson para determinação da distribuição do campo elétrico. Os parâmetros que definem o líder são o potencial e diâmetro. Executam-se vários passos para realização das simulações, onde em cada um deles é encontrada a solução do problema eletrostático e a solução de cada passo é dependente da anterior.

2.2.4 Método do desvio do campo elétrico

Uma descarga atmosférica acontece quando a rigidez dielétrica do ar é quebrada pelo campo elétrico. Para determinar a direção de sua propagação é necessário considerar, além do campo elétrico gerado por nuvens, solo e estrutura, o desvio do campo elétrico (RODRIGUES, 2019). O modelo que realiza tais considerações, descrevendo a trajetória de descargas atmosféricas e que é proposto neste estudo de caso para verificar a eficiência de um projeto de SPDA em estruturas residenciais e industriais é o *EFD*.

O modelo descreve a trajetória de descargas atmosféricas através da equação

$$\vec{E}_L = \vec{E} + \lambda \nabla E \quad (2.1)$$

Onde

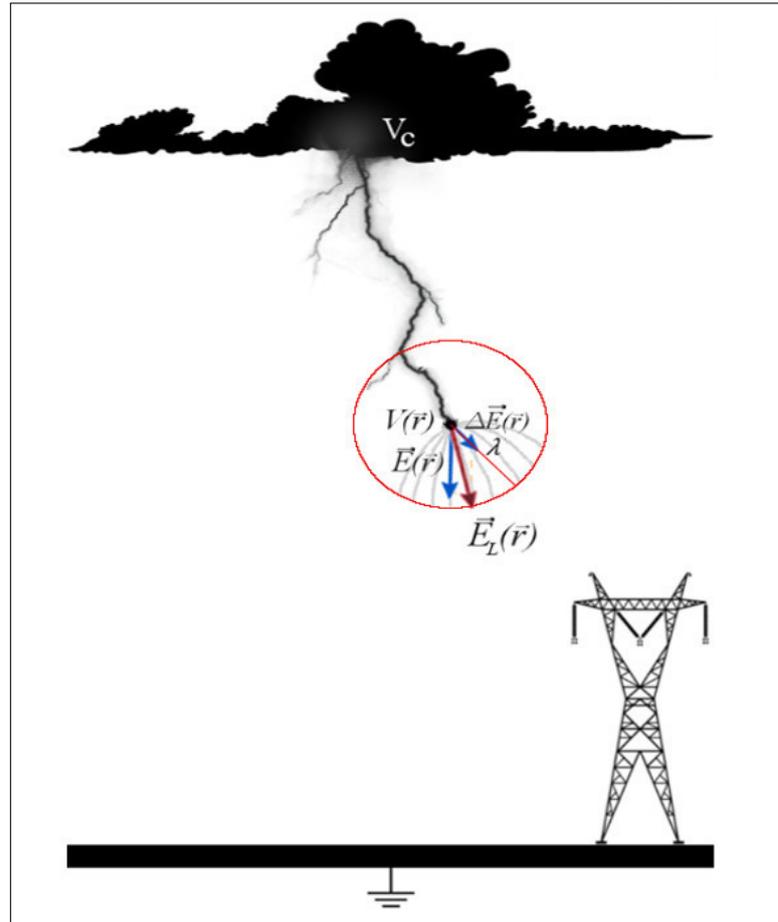
λ é a profundidade de desvio;

∇E é o operador gradiente do módulo do campo elétrico.

Sendo a profundidade de desvio representada por λ um parâmetro com dimensão de comprimento e a direção do desvio do campo elétrico encontrada pelo operador do gradiente do módulo do campo elétrico representada por ∇E (RODRIGUES, 2019).

A Figura 3 ilustra uma descarga atmosférica líder descendente negativa (da nuvem para o solo) descrita pelo *EFD*. Ela é composta por uma extremidade, um canal e uma zona, de acordo com Rakov e Uman (1993). Na extremidade da descarga líder, o potencial sobre a posição \vec{r} é dado por $V(\vec{r})$ e seu respectivo campo elétrico dado por $E(\vec{r})$. Com isso, uma carga pode ser acelerada por esse campo, ocasionando seu movimento descrito não apenas pelo campo

Figura 3 – Diagrama do líder descendente descrito pelo *EFD*



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

elétrico gerado pela nuvem, o solo e as estruturas, mas também por um desvio representado por $\Delta\vec{E}$, tal que

$$\vec{E}_L = \vec{E} + \Delta\vec{E} \quad (2.2)$$

Em que a direção da propagação da descarga atmosférica é representada por \vec{E}_L (RODRIGUES, 2019).

2.3 Métodos de proteção contra descargas atmosféricas

Um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas, SPDA, tem como objetivo reduzir danos físicos devido a uma descarga elétrica em uma estrutura. Ele é composto por três subsistemas:

1. Subsistema de captação: responsável por receber as descargas atmosféricas e direcioná-las ao subsistema de descida;
2. Subsistema de descida: responsável por conduzir a descarga atmosférica ao

subsistema de aterramento, reduzindo ao mínimo a probabilidade de descargas laterais e de campos eletromagnéticos perigosos no interior da estrutura;

3. Subsistema de aterramento: responsável por dispersar a corrente da descarga atmosférica no solo, reduzindo ao mínimo a probabilidade de tensões de toque e de passo perigosas;

A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015c) define três métodos utilizados para posicionamento do subsistema de captação, o Método de Franklin, ou ângulo de proteção, o Método da Gaiola de Faraday e o método das esferas rolantes, que serão detalhados nas subseções à seguir.

2.3.1 Método Franklin

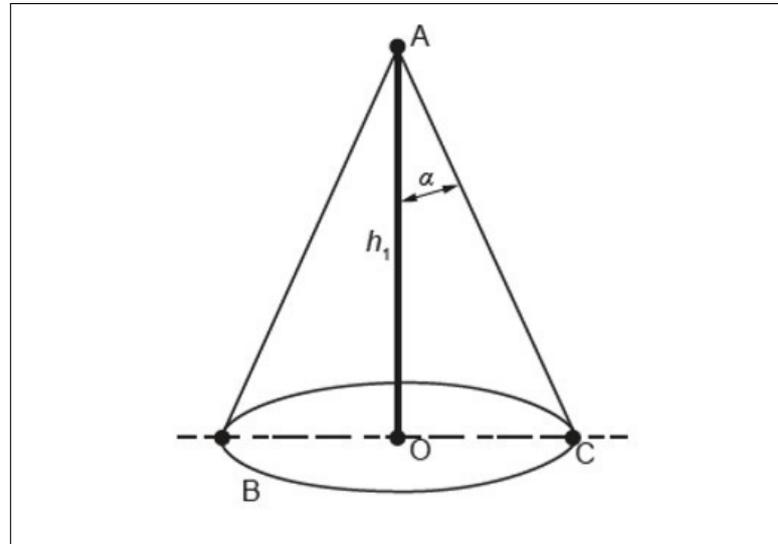
Baseado na interceptação de descargas descendentes que se aproximam da estrutura a ser protegida por meio de descargas ascendentes provenientes dos captores instalados no sistema de proteção (VISACRO, 2005), o método Franklin utiliza um captor metálico que deve ser posicionado sobre a estrutura na posição vertical ou inclinado, de tal forma que garanta uma zona de proteção para a edificação. Tal zona de proteção pode ser determinada por dois métodos (GARCIA, 2016): método do ângulo de proteção e o método da esfera rolante.

O método do ângulo de proteção é descrito pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015c), que considera a posição do subsistema de captação adequada caso a estrutura a ser protegida esteja situada totalmente dentro do volume de proteção provido pelo sistema. O volume de proteção proporcionado pelo captor é definido pela forma de um cone circular com vértice posicionado no topo do mastro, com ângulo do mastro variando de acordo com o nível de proteção estabelecido no cálculo do gerenciamento de risco (GARCIA, 2016). A Figura 4 ilustra o volume de proteção provido pelo mastro do captor do tipo Franklin, em que A representa o topo do captor, B o plano de referência, OC o raio da base do cone de proteção, h_1 a altura do mastro acima do plano de referência e α o ângulo de proteção. O método da esfera rolante será descrito na subseção a seguir.

2.3.2 Método Gaiola de Faraday

A proteção da edificação por esse método se baseia no experimento desenvolvido por Faraday, que afirma que graças a distribuição homogênea das cargas ao longo de uma superfície condutora, o campo elétrico em seu interior é nulo. Para aplicação do método da gaiola de

Figura 4 – Ilustração do volume de proteção provido por um mastro



Fonte: Adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015c)

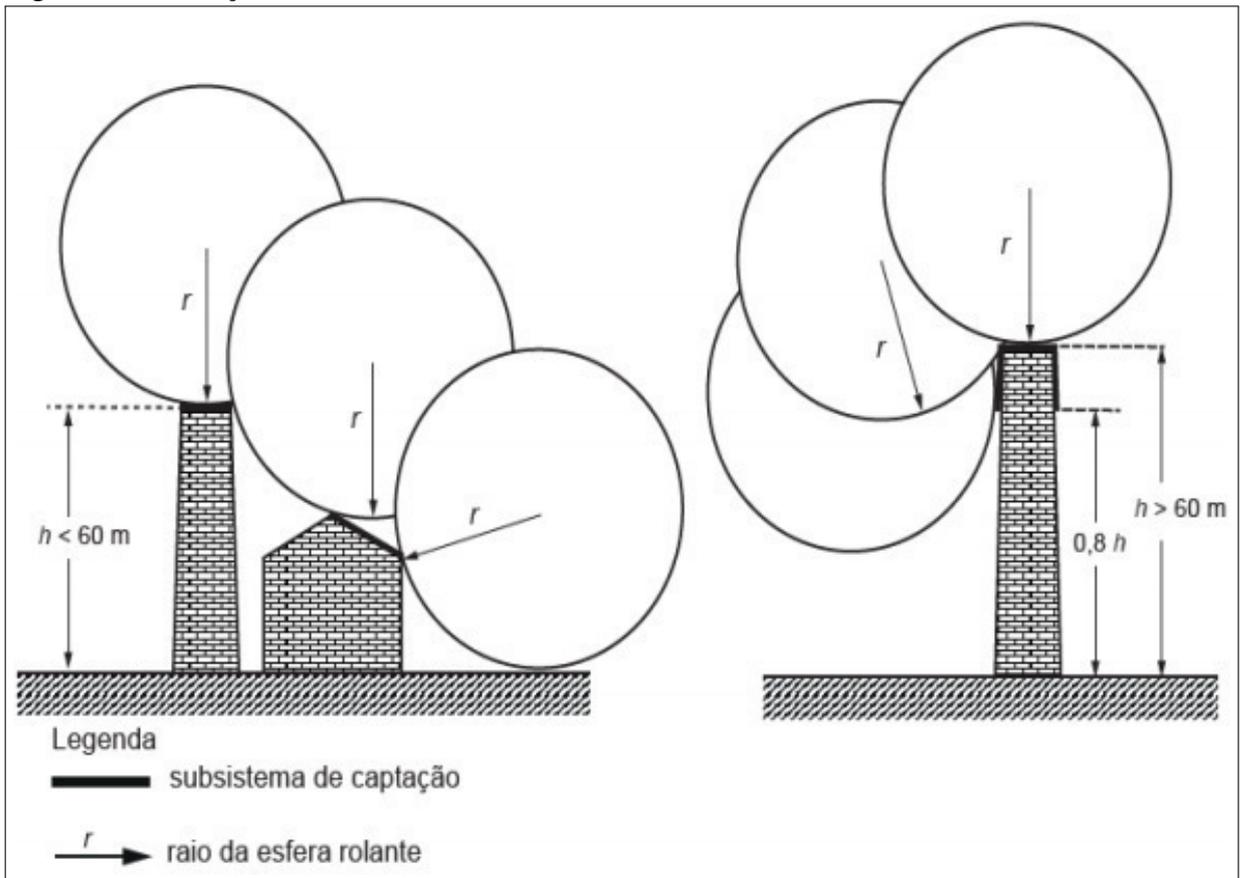
Faraday, instala-se condutores horizontais ao longo de todo o perímetro da estrutura e laterais da porção superior da edificação, criando-se malhas (GARCIA, 2016). As dimensões das malhas são definidas de acordo com a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015c). Para constatar as zonas de proteção propiciadas pelas malhas instaladas, pode-se aplicar dois métodos: o método das esferas rolantes e o método das malhas.

A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015c) considera adequado o posicionamento do subsistema de captação de acordo com o método das esferas rolantes se "nenhum ponto da estrutura a ser protegida entrar em contato com uma esfera fictícia rolando ao redor e no topo da estrutura em todas as direções possíveis.". A esfera rolante deverá entrar em contato somente com o subsistema de captação. O raio da esfera é definido de acordo com a classe de proteção definida pelo projetista. Um exemplo da aplicação correta do método pode ser visualizado na Figura 5.

O método das malhas descrito no Anexo A da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015c) é composto por requisitos que, ao serem devidamente cumpridos, dispensam a necessidade de avaliação pelo método da esfera rolante (GARCIA, 2016). Os requisitos do método estão descritos abaixo:

- a) condutores captadores devem ser instalados: na periferia da cobertura da estrutura, nas saliências da cobertura da estrutura e nas cumeeiras dos telhados, se o declive exceder 1/10;
- b) As dimensões de malha não podem ser maiores que os valores encontrados na

Figura 5 – Ilustração do método da esfera rolante



Fonte: Adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015c)

- Tabela 2 de (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015c);
- c) o conjunto de condutores do subsistema de captação deve ser construído de tal modo que a corrente elétrica da descarga atmosférica sempre encontre pelo menos duas rotas condutoras distintas para o subsistema de aterramento;
 - d) nenhuma instalação metálica, que por suas características não possa assumir a condição de elemento captor, ultrapasse para fora o volume protegido pela malha do subsistema de captação;
 - e) os condutores da malha devem seguir o caminho mais curto e retilíneo possível da instalação.

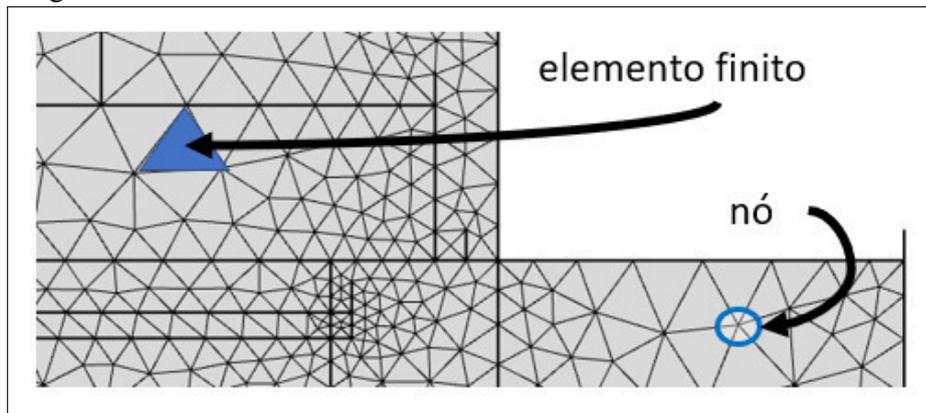
2.4 Método dos elementos finitos

Concebido com o intuito de ser utilizado em análises estruturais na década de 30 (ASSAN, 2003) onde elementos estruturais contínuos como uma placa foram substituídos por uma estrutura formada por barras mantendo a geometria original, bem como as respectivas

condições de vinculação e cargas, o *FEM* passou a ser utilizado para solução de problemas envolvendo o eletromagnetismo na década de 60 (POTIER *et al.*, 2010).

O *FEM* realiza a transformação de um domínio contínuo em um domínio discreto através da divisão do domínio de integração em pequenas regiões denominadas *elementos finitos* (ASSAN, 2003) e pontos de intersecção de linhas denominados nó, conforme representado na Figura 6.

Figura 6 – Rede de elementos finitos



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Para compreender o diferencial proposto pelo *FEM*, é necessário discorrer sobre alguns temas previamente, como o cálculo variacional, condições de contorno, funções admissíveis e os métodos no qual o *FEM* é baseado: o Método de Raileigh-Ritz e o Método de Galerkin.

O *FEM* busca a solução de problemas de otimização que na matemática está relacionado a problemas de máximos e mínimos. Flores (2011) diz que uma das áreas da Matemática muito útil para solução de tais problemas é o Cálculo de Variações, ou Cálculo Variacional, que é responsável por generalizar a teoria de máximos e mínimos do Cálculo Diferencial para funções cujo domínio é formado por um conjunto de curvas admissíveis. O Cálculo Variacional aborda funcionais ao invés de funções (ASSAN, 2003). Segundo Flores (2011): “O domínio de um funcional é uma classe de funções. Intuitivamente, pode-se dizer que um funcional é uma função de uma função”.

Condições de contorno são condições que acompanham sistemas de equações diferenciais necessárias para encontrar uma de suas possíveis soluções (POLYANIN, 2002). Para se compreender o que seria uma função admissível no cálculo variacional, define-se uma função F dependente de uma função y e de sua derivada $y' = \frac{dy}{dx}$ caracterizada por

$$F = F(x, y, y'). \quad (2.3)$$

Uma função admissível representa a função exata $y(x)$, desde que dentro de uma tolerância e admitindo condições de contorno definidas em Assan (2003).

O Método de Rayleigh-Ritz se baseia na minimização da energia potencial total do sistema, escrita em função de um campo predefinido de deslocamentos (ASSAN, 2003). Ao invés de procurar uma função $y(x)$ que dentre as funções admissíveis seja a solução exata para minimizar um determinado funcional representado por

$$\int_{x_1}^{x_2} F(x, y, y') dx, \quad (2.4)$$

o Método de Rayleigh-Ritz é caracterizado por substituir a função exata por uma função aproximada $v(x)$, ou seja,

$$y(x) \cong v(x) = \sum_{i=1}^n a_i \phi_i(x). \quad (2.5)$$

A Equação 2.5 é composta por combinações lineares de ϕ_i conhecidas como funções de forma linearmente independentes, de tal forma que, ao se realizar a substituição de $v(x)$ no funcional, obtém-se a minimização do mesmo. Os parâmetros a_i são denominados por parâmetros de deslocamentos. Maiores detalhes referentes ao método podem ser encontrados em Assan (2003) e Brebbia e Ferrante (1975).

O Método de Galerkin utiliza diretamente a equação diferencial para a resolução do problema de minimização, deste modo, a existência de um funcional não é necessária para aplicação do método. Apesar disso, o Método de Galerkin apresenta resultados similares ao Método de Rayleigh-Ritz (ASSAN, 2003).

Para encontrar a solução de um sistema de equações diferenciais representado por

$$Lv = f, \quad (2.6)$$

em que L é um operador e v uma função que satisfaz condições de contorno, o Método de Galerkin substitui funções aproximadoras tal qual a apresentada na Equação 2.5 que, apesar de não serem a solução exata da equação diferencial, apresenta funções que satisfazem condições de contorno, representadas por ϕ_i . Por conta disso, surgem resíduos, ou erros representados por

$$\varepsilon = Lv - f, \quad (2.7)$$

que devem ser ponderados por funções de tal forma que, o produto entre a função residual e cada uma das funções ponderadores ϕ_i determina uma condição de ortogonalidade dado o valor

supostamente igual a zero no domínio da integração como pode ser observado em (ASSAN, 2003).

$$\int_V (Lv - f)\phi_i dV = 0; \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2.8)$$

Os coeficientes da Equação 2.5 provêm da solução de n equações representadas pela Equação 2.8, e são determinados de forma que se anulem em cada integração ponderada (ASSAN, 2003).

A dificuldade em implementar o Método de Rayleigh-Ritz e o Método de Galerkin é que a obtenção de funções aproximadoras que satisfaçam as condições de contorno não é fácil (ASSAN, 2003). O *FEM*, ao discretizar o domínio em elementos finitos, elimina a necessidade de uma única função admissível que satisfaça as condições de contorno de todo o domínio, e define as funções admissíveis apenas no domínio de cada elemento finito.

Existem duas maneiras que o *FEM* pode ser derivado segundo Bastos e Sadowski (2003). A primeira delas utiliza o Método de Ritz e os princípios variacionais, e a segunda utiliza o Método de Galerkin, em que equações discretas são obtidas por meio da aplicação de métodos residuais.

O método dos elementos finitos comumente utilizado é baseado no Método de Rayleigh-Ritz e é descrito por Assan (2003). Nele, o funcional Π para todo o domínio é composto de n funcionais atribuídos individualmente para cada elemento finito i

$$\Pi = \sum_{i=1}^n \Pi_i. \quad (2.9)$$

A função aproximadora de cada elemento v é composta de variáveis referidas aos nós do elemento, conhecidas como *parâmetros nodais* a_j , bem como por funções de forma ϕ_j .

$$v = \sum_{j=1}^m a_j \phi_j \quad (2.10)$$

O funcional para o domínio, Π , passa a ser expresso por:

$$\Pi(a_j) = \sum_{i=1}^n \Pi_i(a_j) \quad (2.11)$$

Dada a condição de estacionariedade, definida como a condição que encontra a função que minimiza ou maximiza o funcional tornando-o estacionário (ASSAN, 2003), é formado um sistema de equações algébricas lineares tal que

$$\delta\Pi = \sum_{i=1}^n \delta\Pi_i(a_j) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\partial \Pi_i(a_j)}{\partial a_j} = 0 \quad (2.12)$$

Os parâmetros nodais a_j , são dados pela solução do sistema de equação 2.12 (ASSAN, 2003).

Tal sistema de equações algébricas lineares é esparso e tipicamente simétrico. Com a conversão de equações diferenciais ou integrais em sistemas de equações, o problema de integração de uma *Partial Differential Equation* / Equação Diferencial Parcial (*PDE*) é substituído pela procura de uma função que traz como resultado um valor mínimo de uma integral em particular (ASSAN, 2003). Um exemplo de aplicação prático do *FEM* em uma viga prismática em balanço é apresentado por Assan (2003).

Outra maneira de se solucionar *PDE* por meio do *FEM* é através do Método de Galerkin, também conhecido como método dos resíduos (POTIER *et al.*, 2010). Para ilustrá-lo, será apresentado a aplicação do *FEM* ao eletromagnetismo.

Primeiramente, apresenta-se em sua forma diferencial as equações de Maxwell (1865), que regem os fenômenos eletromagnéticos:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.13)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{S} \quad (2.14)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.15)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.16)$$

Onde

\vec{E} - vetor intensidade do campo elétrico;

\vec{H} - vetor intensidade do campo magnético;

\vec{D} - vetor densidade do campo elétrico;

\vec{B} - vetor densidade do campo magnético;

\vec{S} - vetor densidade superficial de corrente elétrica;

ρ - densidade volumétrica de cargas;

Para materiais isotrópicos lineares, são verdadeiras as seguintes relações entre intensidades e densidades de campo elétrico e magnético (SHADIKU, 2012):

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (2.17)$$

$$D = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (2.18)$$

$$\vec{S} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (2.19)$$

Onde

μ - permeabilidade magnética (Henry/metro);

ε - permissividade elétrica(Faraday/metro);

σ - condutividade elétrica (1/(Ohm · metro)).

No caso de fenômenos estáticos para as equações 2.13, 2.14, 2.15 e 2.16, têm-se:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (2.20)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{S} \quad (2.21)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.22)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.23)$$

Para aplicação do *FEM* no estudo de campos magnéticos estáticos, serão abordados apenas as equações 2.21, 2.22 e 2.17.

Nesse primeiro momento é também necessário definir o Teorema de Green no Plano que será utilizado para a derivação do *FEM* (PEREIRA, 2012). Ele estabelece que para duas funções $u(x,y)$ e $v(x,y)$, vale a relação

$$\iint_A \nabla^2 u(x,y) \cdot v(x,y) \cdot dA = - \iint_A \nabla u(x,y) \cdot \nabla v(x,y) \cdot dA + \oint_{L(A)} \nabla u(x,y) \cdot v(x,y) \cdot dl \quad (2.24)$$

O Teorema de Green apresenta uma relação entre uma integral de linha sobre uma curva fechada e uma integral dupla sobre a região delimitada por ela. A utilização desse teorema é uma importante ferramenta para resolução de integrais de linha complexas por integrais duplas.

Para se realizar a solução das equações de Maxwell, é necessário encontrar soluções que satisfaçam três equações simultaneamente, o que eleva o nível de dificuldade do processo. Por conta disso, introduz-se um potencial vetor. Através dele, encontra-se uma única equação que representa as equações 2.21, 2.22 e 2.17.

Pereira (2012) define o potencial vetor \vec{A} como

$$\nabla \times \vec{A} = \vec{B} \quad (2.25)$$

Para qualquer função vetorial, é válida a relação

$$\nabla \bullet (\nabla \times \vec{A}) = 0 \quad (2.26)$$

Ao se realizar a introdução da Equação 2.17 na Equação 2.25, obtém-se

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \vec{A} \quad (2.27)$$

Realizando-se a introdução da Equação 2.27 na Equação 2.21 obtém-se

$$\nabla \times \vec{H} = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \cdot \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{S} \quad (2.28)$$

Ao se realizar a consideração de apenas materiais isotrópicos lineares (PEREIRA, 2012):

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \mu \cdot \vec{S} \quad (2.29)$$

Dado a introdução do potencial vetor na Equação 2.25, escolhendo-se um potencial vetor tal que

$$\nabla \times \vec{A} = 0 \quad (2.30)$$

e expandindo a Equação 2.29 como sugere Bastos e Sadowski (2003) para

$$\nabla(\nabla \bullet \vec{A}) - \nabla \times \nabla \vec{A} = \mu \cdot \vec{S} \quad (2.31)$$

obtém-se

$$\nabla \times \nabla \vec{A} = -\mu \cdot \vec{S} \quad (2.32)$$

conhecida como Equação de Poisson no espaço.

Dessa maneira, a solução visa determinar \vec{A} , onde as grandezas eletromagnéticas de interesse poderão ser obtidas. Nos casos em que o campo é invariável no eixo z, obtém-se potencial vetor com componentes apenas no eixo z, pois o vetor densidade de corrente é

perpendicular ao plano em que é descrito (PEREIRA, 2012). Com isso, a equação de Poisson assume a forma de

$$\nabla \times \nabla A = \nabla^2 A = -\mu \cdot S \quad (2.33)$$

Sabe-se ainda que nas regiões em que S é zero, é válida a aplicação da equação de Laplace (HAYT; BUCK, 2003)

$$\nabla^2 A = 0 \quad (2.34)$$

Dessa forma, para determinar o campo nas direções x e y, é preciso determinar o potencial A(x,y) (PEREIRA, 2012).

Os valores de potencial na fronteira do domínio de estudo são necessários para se obter a solução completa da Equação de Poisson (PEREIRA, 2012). Tais valores também são comumente conhecidos como condições de contorno. Segundo Oliveira *et al.* (2010), as duas principais condições de contorno utilizadas são as de Dirichlet e de Neumann, em que a primeira é utilizada para se definir o mesmo potencial de valor elétrico ao longo da fronteira do domínio do problema e a segunda é aplicada nos locais da fronteira do domínio em que o potencial não apresenta variação na direção ortogonal (BASTOS; SADOWSKI, 2003).

Com o que fora apresentado, é possível realizar a descrição dos problemas de potencial, que será apresentado a seguir. Seja dado um domínio Ω em que se busca a solução, delimitado por um contorno externo retangular Γ em torno de uma estrutura magnética. A condição de Dirichlet, imposta na região do domínio Γ_1 é representada por

$$\nabla^2 A = 0 \quad \text{sobre } \Gamma_1 \quad (2.35)$$

A condição de Neumann é imposta no restante do domínio, Γ_2 , e é representada por

$$\frac{\partial A}{\partial n} = \nabla A = 0 \quad \text{sobre } \Gamma_2 \quad \Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \quad (2.36)$$

E a Equação de Poisson representada pela Equação 2.33, é válida para todo o domínio (PEREIRA, 2012).

Primeiramente, multiplica-se ambos os lados da igualdade da Equação 2.33 por uma função de teste g(x,y), obtendo-se

$$\nabla^2 A \cdot g = -\mu \cdot S \cdot g, \quad (2.37)$$

Integra-se ambos os lados sobre o domínio Ω

$$\iint_{\Omega} \nabla^2 A \cdot g = - \iint_{\Omega} \mu \cdot S \cdot g, \quad (2.38)$$

E aplicando o Teorema de Green, obtém-se

$$\iint_{\Omega} \nabla A \cdot \nabla g \cdot d\Omega - \oint_{\Gamma} \nabla A \cdot g \cdot d\Gamma = \iint_{\Omega} \mu \cdot S \cdot g \cdot d\Omega, \quad (2.39)$$

Pode-se ainda rearranjar a Equação 2.39 dado a divisão de Γ

$$\iint_{\Omega} \nabla A \cdot \nabla g \cdot d\Omega - \oint_{\Gamma_1} \nabla A \cdot g \cdot d\Gamma - \oint_{\Gamma_2} \nabla A \cdot g \cdot d\Gamma = \iint_{\Omega} \mu \cdot S \cdot g \cdot d\Omega, \quad (2.40)$$

Aplicando a condição de contorno definida na Equação 2.36, obtém-se

$$\iint_{\Omega} \nabla A \cdot \nabla g \cdot d\Omega - \oint_{\Gamma_1} \nabla A \cdot g \cdot d\Gamma = \iint_{\Omega} \mu \cdot S \cdot g \cdot d\Omega, \quad (2.41)$$

Escolhe-se então uma função de teste $g(x,y)$ tal que

$$g(x,y) = 0 \quad \text{sobre} \quad \Gamma_1, \quad (2.42)$$

Com isso, obtém-se

$$\iint_{\Omega} \nabla A \cdot \nabla g \cdot d\Omega = \iint_{\Omega} \mu \cdot S \cdot g \cdot d\Omega, \quad (2.43)$$

Definidas as equações básicas utilizadas pelo *FEM*, sendo elas as equações 2.41 e 2.42, é necessário realizar a subdivisão do domínio Ω (PEREIRA, 2012). O domínio discretizado é conhecido como malha e tem seus subdomínios compostos por elementos geométricos que podem assumir diferentes formas (BREBBIA; FERRANTE, 1975). Para essa aplicação, serão considerados apenas elementos triangulares, e a utilização de funções lineares.

Ao realizar a subdivisão do domínio em M elementos, obtém-se

$$\sum_{e=1}^M \iint_{\Omega_e} \nabla A \cdot \nabla g \cdot d\Omega_e = \sum_{e=1}^M \iint_{\Omega_e} \mu \cdot S \cdot g \cdot d\Omega_e, \quad (2.44)$$

Devido a consideração apenas de elementos triangulares e utilização de funções lineares, Pereira (2012) apresenta a função de aproximação na forma

$$A = A(x,y) \cong \bar{A}(x,y) = \sum_{j=1}^N R_j \cdot \phi_j(x,y), \quad (2.45)$$

Que vale para todo domínio, existindo N parâmetros R_j a serem determinados para as N funções para se obter a solução aproximada, solução esta dada pela combinação linear das mesmas

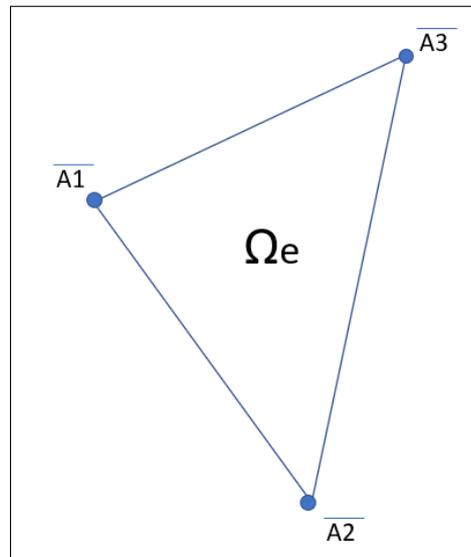
(PEREIRA, 2012). Os parâmetros de R_j representam os potenciais nos nós da malha \bar{A} . Para as funções $\phi_j(x, y)$, determina-se valores tal que a maioria delas seja igual a zero, facilitando a solução do problema.

Ao considerar um triângulo conforme apresentado na Figura 7, obtém-se

$$\bar{A}(x, y) = C_0 + C_1 \cdot x + C_2 \cdot y, \quad (2.46)$$

Onde C_0 , C_1 e C_2 são coeficientes.

Figura 7 – Triângulo utilizado na subdivisão do domínio



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Para se obter os potenciais em cada um dos nós do triângulo, impõe-se que a função \bar{A} os forneça, obtendo assim 3 equações que serão utilizadas na determinação dos coeficientes (PEREIRA, 2012)

$$\bar{A}(x_1, y_1) = \bar{A}_1, \quad (2.47)$$

$$\bar{A}(x_2, y_2) = \bar{A}_2, \quad (2.48)$$

$$\bar{A}(x_3, y_3) = \bar{A}_3, \quad (2.49)$$

Em que (x_1, y_1) , (x_2, y_2) e (x_3, y_3) representam as coordenadas dos nós. As constantes então podem ser obtidas através de

$$\bar{A}(x, y) = \sum_{j=1}^3 \bar{A}_j \cdot \phi_j(x, y), \quad (2.50)$$

Em que as funções $\phi_j(x,y)$ são dadas por

$$\phi_1 = \frac{1}{D} \cdot [(x_2 \cdot y_3 - y_2 \cdot x_3) + x \cdot (y_3 - y_1) + y \cdot (x_1 - x_3)], \quad (2.51)$$

$$\phi_2 = \frac{1}{D} \cdot [(x_3 \cdot y_1 - y_3 \cdot x_1) + x \cdot (y_2 - y_3) + y \cdot (x_3 - x_2)], \quad (2.52)$$

$$\phi_3 = \frac{1}{D} \cdot [(x_1 \cdot y_2 - y_1 \cdot x_2) + x \cdot (y_1 - y_2) + y \cdot (x_2 - x_1)], \quad (2.53)$$

Em que D é dado por

$$D = x_2 \cdot y_3 - y_2 \cdot x_3 + x_3 \cdot y_1 - y_3 \cdot x_1 + x_1 \cdot y_2 - y_1 \cdot x_2, \quad (2.54)$$

Devido a particularidade do *FEM* em que as funções $\phi_j(x,y)$ são utilizadas como funções de teste, designadas $g(x,y)$ (Equação 2.43), as funções de teste e as de aproximação são idênticas dentro de cada triângulo (PEREIRA, 2012). Portanto, ao se substituir a Equação 2.50 na Equação 2.43, têm-se

$$\iint_{\Omega_e} \nabla[\Sigma_{j=1}^3 \bar{A} \cdot \phi_j] \cdot \nabla \phi_i \cdot d\Omega_e = \iint_{\Omega_e} \mu \cdot S \cdot \phi_i \cdot d\Omega_e \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.55)$$

$$\Sigma_{j=1}^3 \bar{A} \cdot \iint_{\Omega_e} \nabla \phi_j \cdot \nabla \phi_i \cdot d\Omega_e = \iint_{\Omega_e} \mu \cdot S \cdot \phi_i \cdot d\Omega_e \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.56)$$

Devido a existência de apenas 3 funções teste para cada triângulo, obtém-se 3 equações para cada triângulo. Dado μ e S constantes, então obtém-se

$$\Sigma_{j=1}^3 \bar{A} \cdot \iint_{\Omega_e} \nabla \phi_j \cdot \nabla \phi_i \cdot d\Omega_e = \mu \cdot S \cdot \iint_{\Omega_e} \phi_i \cdot d\Omega_e \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.57)$$

Essa equação vale para um triângulo do domínio. Expandindo ela para todo o domínio, obtém-se

$$\Sigma_{e=1}^M \Sigma_{j=1}^3 \bar{A} \cdot \iint_{\Omega_e} \nabla \phi_j \cdot \nabla \phi_i \cdot d\Omega_e = \mu \cdot S \cdot \iint_{\Omega_e} \phi_i \cdot d\Omega_e \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.58)$$

Por conta da simplicidade das funções $\phi_j(x,y)$, seus valores são constantes (PEREIRA, 2012). Para se obter o sistema de equações de um elemento finito, no caso abordado um

triângulo, onde os potenciais dos nós aparecem como incógnitas, considera-se a Equação 2.57 e varia-se os índices i e j de 1 a 3

$$\sum_{j=1}^3 \bar{A} \cdot K_{ij}^e = b_i \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.59)$$

$$K_{ij}^e = \iint_{\Omega_e} \nabla \phi_j \cdot \nabla \phi_i \cdot d\Omega_e \quad i = 1, 2, 3 \quad j = 1, 2, 3, \quad (2.60)$$

$$b_i^e = \mu \cdot S \cdot \iint_{\Omega_e} \phi_i \cdot d\Omega_e \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.61)$$

Esse sistema pode ser escrito no seguinte formato matricial

$$\begin{pmatrix} K_{11}^e & K_{12}^e & K_{13}^e \\ K_{21}^e & K_{22}^e & K_{23}^e \\ K_{31}^e & K_{32}^e & K_{33}^e \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{A}_1 \\ \bar{A}_2 \\ \bar{A}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1^e \\ b_2^e \\ b_3^e \end{pmatrix}. \quad (2.62)$$

A matriz de coeficientes locais, ou seja, que representam apenas um elemento finito, é simétrica. Apesar de representar apenas um sistema local, essa matriz é semelhante para todos os outros sistemas do domínio. Para se obter a matriz que representa todo o domínio, é necessário realizar a soma de todos os elementos locais tal qual explicitado na Equação 2.58. Os índices das equações locais (1,2,3) possuem correspondência com a numeração global de todos os nós que varia de 1 a M . Para a montagem da matriz global é necessário avaliar a contribuição de cada um dos elementos. Um exemplo dado por Pereira (2012) é quando um dos elementos, chamado de elemento 1 de uma malha contendo 10 nós esteja sendo considerado e que exista a seguinte correspondência entre os nós locais e globais: $1 \rightarrow 5, 2 \rightarrow 7, 3 \rightarrow 9$

No momento do processamento, sua contribuição será adicionada à matriz global do

sistema da seguinte forma

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{11}^1 & 0 & K_{12}^1 & 0 & K_{13}^1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{12}^1 & 0 & K_{22}^1 & 0 & K_{23}^1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{13}^1 & 0 & K_{23}^1 & 0 & K_{33}^1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \overline{A_1} \\ \overline{A_2} \\ \overline{A_3} \\ \overline{A_4} \\ \overline{A_5} \\ \overline{A_6} \\ \overline{A_7} \\ \overline{A_8} \\ \overline{A_9} \\ \overline{A_{10}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_5^1 \\ 0 \\ b_7^1 \\ 0 \\ b_9^1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2.63)$$

Neste exemplo observa-se que as contribuições locais de cada um dos sistemas são posicionadas na matriz global dado pelo número de nós globais. Por exemplo, K_{22}^1 será colocado na linha 7 da coluna 7, K_{12} será colocado na linha 5, coluna 7, e assim por diante.

Agora considere um outro elemento, chamado de elemento 2 com a seguinte relação entre nós locais e nós globais: $1 \rightarrow 3$, $2 \rightarrow 5$, $3 \rightarrow 10$

Após inserir o elemento 2 na matriz, obtém-se o seguinte resultado

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{11}^2 & 0 & K_{12}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{13}^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{12}^2 & 0 & K_{11}^1 + K_{22}^2 & 0 & K_{12}^1 & 0 & K_{13}^1 & K_{23}^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{12}^1 & 0 & K_{22}^1 & 0 & K_{23}^1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K_{13}^1 & 0 & K_{23}^1 & 0 & K_{33}^1 & 0 \\ 0 & 0 & K_{13}^2 & 0 & K_{23}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{33}^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \overline{A_1} \\ \overline{A_2} \\ \overline{A_3} \\ \overline{A_4} \\ \overline{A_5} \\ \overline{A_6} \\ \overline{A_7} \\ \overline{A_8} \\ \overline{A_9} \\ \overline{A_{10}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3^2 \\ 0 \\ b_5^1 + b_5^2 \\ 0 \\ b_7^1 \\ 0 \\ b_9^1 \\ b_{10}^2 \end{pmatrix}. \quad (2.64)$$

Ao dar prosseguimento ao preenchimento da matriz com os valores de todos os elementos que compõe a malha, obtém-se um sistema do tipo:

$$[\overline{A}] \cdot [K]_g = b, \quad (2.65)$$

Em que a matriz $[K]_g$ é simétrica e esparsa. O número de nós conectado ao nó relativo àquela linha corresponde ao número de elementos fora da diagonal principal (PEREIRA, 2012).

Com a matriz de coeficientes construída, é possível encontrar a solução para o sistema de equações, obtendo assim os potenciais nos nós. Introduzindo os valores de potenciais na Equação 2.50, determina-se o potencial em cada um dos elementos e por fim obtém-se a grandeza elétrica de interesse, indução magnética \vec{B} pela relação

$$\vec{B}(x, y) = \nabla \times \bar{A}(x, y). \quad (2.66)$$

Ambas as maneiras de derivação do Método dos elementos finitos discutidas nessa seção foram apresentadas de maneira introdutória. Maiores informações podem ser encontradas em Bastos e Sadowski (2003), Brebbia e Ferrante (1975), Assan (2003) e Zienkiewicz *et al.* (2005).

Em suma, a análise do *FEM* é dividida em quatro passos (POTIER *et al.*, 2010):

1. Discretização da região de interesse (domínio de estudo) em sub-regiões ou em elementos tipicamente triangulares ou tetraédricos;
2. Obtenção das equações de campo nas superfícies de cada elemento;
3. Junção de todos os elementos na região de solução utilizando uma matriz de equações;
4. Solução do sistema de equações obtido.

O *FEM* é uma boa alternativa para modelar meios não homogêneos pois possibilita a definição independente das propriedades dos materiais (POTIER *et al.*, 2010). A discretização do domínio em sub-regiões também possui diversas vantagens como cita Reddy (2006):

1. Representação precisa de geometrias complexas;
2. Inclusão de propriedades distintas em materiais dissimilares;
3. Identificação de efeitos localizados (concentração de tensões).

Além disso Potier *et al.* (2010) diz que o *FEM* é uma metodologia apropriada para solução de problemas de dispersão e uma técnica versátil para manipulação de problemas envolvendo geometrias complexas e não homogêneas, sendo então o método escolhido para implementação do *EFD* nesse estudo de caso.

3 METODOLOGIA

Com o intuito de comparar os métodos de determinação de zonas de proteção com o *EFD*, ambos apresentados no Capítulo 2, elaborou-se um projeto de SPDA de acordo com a ABNT NBR 5419:2015 para uma planta residencial e uma planta industrial, ambas hipotéticas. Aplicou-se nos projetos dos sistemas de proteção os métodos de proteção que utilizam como modelo de verificação de zona de proteção o *RSM* e o método das malhas. Realizou-se a modelagem em duas e três dimensões das plantas com seus respectivos SPDA em um software de simulação computacional onde foram aplicadas as equações que regem o modelo *EFD*. Com isso, espera-se obter a trajetória das descargas atmosféricas para que se possa constatar, por meio dos resultados das simulações, a eficácia dos sistemas de proteção implementados.

Para isso, foram realizadas três etapas apresentadas ao longo desse capítulo:

1. NBR 5419;
2. Projeto de SPDA externo;
3. Tutorial de aplicação do *EFD*: Software COMSOL Multiphysics ®.

A primeira parte desta seção irá abordar a metodologia utilizada para realização de um projeto de SPDA conforme a NBR 5419:2015. A segunda parte destina-se a apresentar o projeto do SPDA na planta residencial e industrial hipotéticas utilizadas nesse trabalho. A terceira parte apresenta o tutorial para o desenvolvimento dos modelos bidimensionais e tridimensionais das edificações no COMSOL, bem como a aplicação do *EFD* e o passo a passo para realização das simulações através do *FEM*.

3.1 NBR 5419

O primeiro passo para se realizar um projeto de proteção contra descargas atmosféricas é a definição dos tipos de perdas em função dos tipos de danos que podem ser ocasionados por uma descarga atmosférica na instalação analisada. Segundo a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015b), Seção 4.1.1, as fontes de danos são:

- S1: descargas atmosféricas na estrutura;
- S2: descargas atmosféricas perto da estrutura;
- S3: descargas atmosféricas na linha;
- S4: descargas atmosféricas perto da linha.

Os tipos de danos listados na ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNI-

CAS (2015b) na Seção 4.1.2 são:

- D1: ferimentos a seres vivos por choques elétricos;
- D2: danos físicos;
- D3: falhas de sistemas eletroeletrônicos.

Os tipos de perdas associadas aos danos citados acima segundo a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015b), Seção 4.1.3 são:

- L1: perda de vida humana (incluindo ferimentos permanentes);
- L2: perda de serviço ao público;
- L3: perda de patrimônio cultural;
- L4: perda de valores econômicos (estrutura, conteúdo, e perdas de atividades).

Definido esses fatores, é necessário avaliar a necessidade ou não de um sistema de proteção após a realização de uma avaliação de risco conforme ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015b) Seção 4.1.2 para cada zona da estrutura. Para realização deste trabalho, cada uma das estruturas foram consideradas como possuidoras de uma única zona.

Risco é definido como “O valor da perda média anual provável (pessoas e bens) devido à descarga atmosférica, em relação ao valor total (pessoas e bens) da estrutura a ser protegida” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015b). Seu valor é influenciado diretamente pelo número de eventos perigosos que a estrutura está sujeita, a probabilidade de ocorrência de algum dano a estrutura ou a seus ocupantes e a quantidade média de perdas. Os tipos de riscos que podem ser considerados segundo a norma são:

- R1: risco de perdas ou danos permanentes em vidas humanas;
- R2: risco de perdas de serviço ao público;
- R3: risco de perdas do patrimônio cultural;
- R4: risco de perdas de valor econômico (opcional).

Cada risco R é composto pela soma de diversas variáveis, chamadas de componentes de risco, que são agrupadas de acordo com as fontes e tipos de danos que uma descarga atmosférica pode causar na estrutura. Elas são definidos na ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015b) como:

- R_A : componente relativo a ferimentos aos seres vivos causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentro da estrutura e fora nas zonas até 3 m ao redor dos condutores de descidas;

- R_B : componente relativo a danos físicos causados por centelhamentos perigosos dentro da estrutura iniciando incêndio ou explosão, os quais podem também colocar em perigo o meio ambiente;
- R_C : componente relativo a falhas de sistemas internos causados por LEMP (pulsos eletromagnéticos devido aos raios) por conta de descargas que atingem a estrutura;
- R_M : componente relativo a falhas de sistemas internos causados por LEMP por conta de descargas que atingem áreas próximas à estrutura;
- R_U : componente relativo a ferimentos aos seres vivos causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentro da estrutura;
- R_V : componente relativo a danos físicos (incêndio ou explosão iniciados por centelhamentos perigosos entre instalações externas e partes metálicas geralmente no ponto de entrada da linha na estrutura) devido à corrente da descarga atmosférica transmitida ou ao longo das linhas;
- R_W : componente relativo a falhas de sistemas internos causados por sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura e transmitidas a esta;
- R_Z : componente relativo a falhas de sistemas internos causados por sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura e transmitidas a esta.

Cada variável citada pode ser expressa pela equação geral

$$R_X = N_X \times P_X \times L_X \quad (3.1)$$

Onde

N_X é o número de eventos perigosos por ano;

P_X é a probabilidade de dano à estrutura;

L_X é a perda consequente.

em que N_X é influenciado pela densidade de descargas atmosféricas para a terra e características intrínsecas à estrutura, seus arredores, linhas de energia que estão conectadas e o solo. A probabilidade P_X é influenciada também pelas características intrínsecas à estrutura, das linhas de energia e das medidas de proteção implementadas, e a perda L_X varia dependendo do uso da estrutura, quantidade de ocupantes, serviços oferecidos ao público, valor dos bens e medidas implementadas que visam diminuir as perdas caso ocorra algum evento que cause dano.

Devido a natureza do uso das edificações apresentadas neste trabalho que serão descritas detalhadamente nas Seções 3.1.1 e 3.1.2, o único risco considerado foi o R1 (risco

de perdas ou danos permanentes em vidas humanas). Segundo a Seção 4.3 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015b), o risco R1 é composto pela soma das componentes de risco

$$R1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1}^1 + R_{M1}^1 + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1}^1 + R_{Z1}^1 \quad (3.2)$$

As variáveis R_{C1} , R_{M1}^1 , R_{W1}^1 e R_{Z1}^1 são consideradas somente em estruturas com risco de explosão e para hospitais com equipamentos elétricos para salvar vidas ou outras estruturas quando a falha dos sistemas internos imediatamente possa por em perigo a vida humana (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015b).

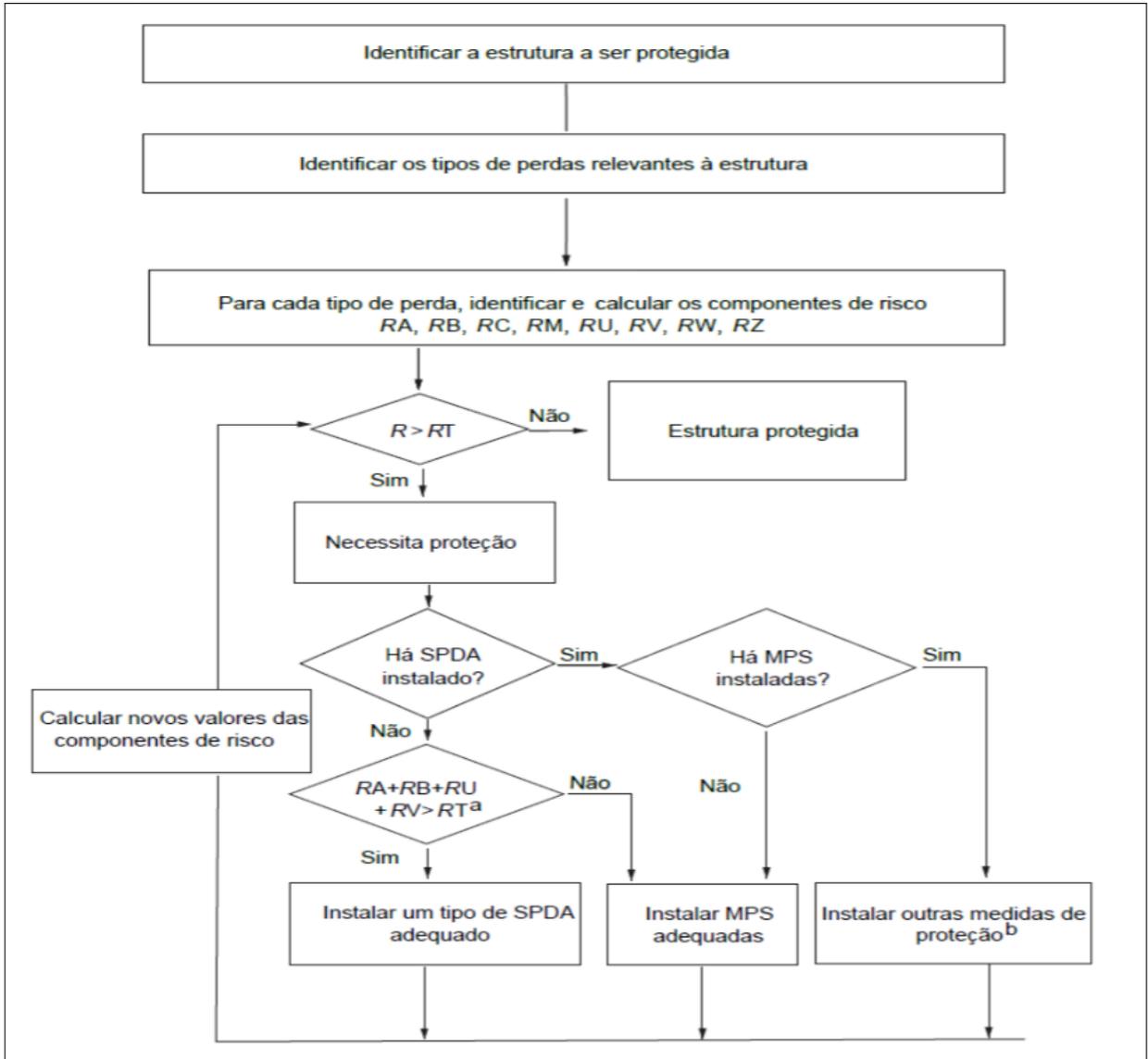
A proteção contra as descargas atmosféricas é obrigatória quando o risco calculado é maior que os riscos toleráveis definidos na Seção 5.3 na ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015b): perda de vidas humanas ou feridos permanentes (10^{-5}); perda de serviço ao público (10^{-3}) e perda de patrimônio cultural (10^{-4}). Por conta de o risco a ser considerado neste trabalho ser o R1, é necessário que o valor calculado do mesmo seja menor ou igual à 10^{-5} .

Para realizar a comparação entre o risco referenciado e o risco calculado, a norma orienta seguir os seguintes passos explicitados na Figura 8, onde primeiramente é calculado o risco dado os tipos de perdas relevantes. Se o risco for menor que o risco tolerável, então a estrutura é considerada protegida. Caso contrário, é necessária a instalação de alguma medida de proteção para diminuição do risco calculado. Realizado as implementações em projeto, recalcula-se o risco. Caso ele continue maior que o risco tolerável, é necessário a implementação de outras medidas de proteção. Repete-se o ciclo até que o risco calculado seja menor que o risco referenciado ou consiga-se diminuir ao máximo o risco de dano aos ocupantes da estrutura caso ocorra a incidência de uma descarga atmosférica

3.1.1 Cálculo do risco para edificação residencial

A edificação residencial hipotética que será utilizada neste estudo de caso é constituída por 01 (uma) torre residencial com 27 (vinte e sete) pavimentos, compostos por: 02 (dois) pavimentos Subsolo, pavimento Térreo, pavimento Mezanino, 22 (vinte e dois) pavimentos tipo com 4 (quatro) apartamentos por pavimento dispostos de forma simétrica, pavimento Cobertura/-Casa de Máquinas e pavimento Terraço. Para efeito de cálculos, considerou-se que a estrutura fica localizada no município de Fortaleza, no estado do Ceará, que possui todas as medidas de

Figura 8 – Procedimento para decisão da necessidade da proteção e para seleccionar medida de proteção



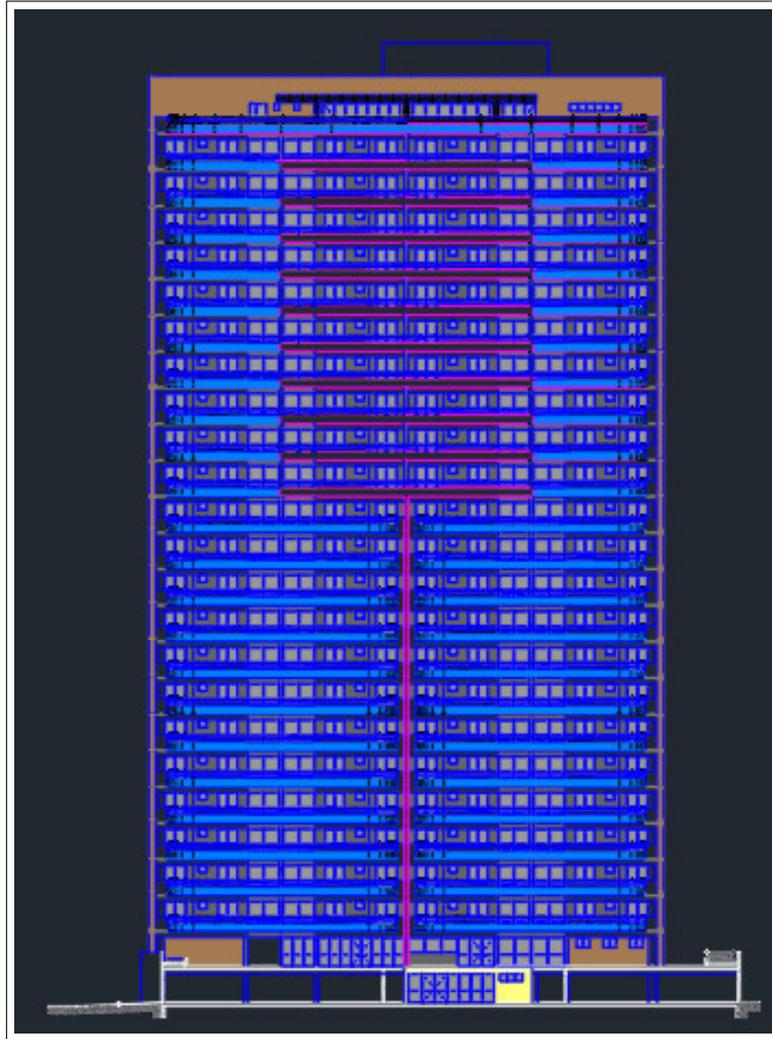
Fonte: Adaptado da NBR 5419 - 2 (2015).

combate a incêndios e que possui um sistema coordenado de Dispositivo de Proteção contra Surto (DPS). A Figura 9 apresenta a fachada norte da edificação.

Conforme Figura 8, primeiramente realizou-se a análise de risco para a estrutura sem considerar a presença de um SPDA externo. O valor calculado para cada uma das componentes de risco e de suas respectivas variáveis pode ser encontrado no memorial de cálculo no Apêndice A.

O valor encontrado para o risco considerado foi de $4,89 \times 10^{-6}$, dado as características intrínsecas à estrutura e as premissas adotadas. Como o valor foi menor que o estabelecido pela norma (10^{-5}), pode-se considerar que a provável perda anual causada por descargas atmosféricas tem uma probabilidade de ocorrência muito baixa. Entretanto, é uma boa prática de um projeto de instalação elétrica considerar a ocorrência de uma descarga que possa vir a

Figura 9 – Fachada norte da edificação residencial



Fonte: Nota de aula disciplina Materiais, equipamentos e Inst. Elétricas Prediais (2018)

causar danos a estrutura. Realizou-se então um projeto de SPDA externo detalhado na Seção 3.2, considerando o nível de proteção IV de acordo com a Tabela 3 e a Tabela 4 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015a). Ao recalcular o risco dado as novas medidas de proteção implementadas, chegou-se ao valor de $1,92 \times 10^{-8}$.

3.1.2 Cálculo do risco para edificação industrial

A edificação industrial hipotética utilizada neste estudo de caso atua na fabricação de eletrônicos e sua fachada leste pode ser observada na Figura 10. É constituída por uma estrutura de formato retangular com 2 pavimentos, sendo o primeiro composto por áreas de montagem, áreas de convivência (recepção, refeitório e copa), 2 laboratórios, vestiário, banheiro, almoxarifado e depósito. O segundo pavimento, por sua vez, é composto por uma sala de

convivência, almoxarifado, depósito, dois banheiros e uma sala. A localização da estrutura hipotética foi definida no município de Fortaleza, no estado do Ceará. Considerou-se que a mesma possui todas as medidas de combate a incêndios, possui sistema coordenado de DPS e que apresenta risco de explosão dado o ramo de atuação.

Figura 10 – Fachada leste da edificação industrial



Fonte: Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

Durante a realização da análise de risco inicial para a estrutura, não se considerou a presença de um SPDA externo. O valor das componentes de risco e de suas respectivas variáveis, bem como maiores detalhes quanto as premissas adotadas encontram-se no Apêndice A.

O valor encontrado para o risco considerado (R_1) foi de $2,73 \times 10^{-5}$. Como o risco encontrado é maior do que o risco tolerável (10^{-5}), foi necessário a instalação de medidas de proteção para diminuição do risco presente. Realizou-se, então, o projeto de um SPDA externo considerando o nível de proteção III definido na Tabela 3 e Tabela 4 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015a). Ao realizar novamente a análise de risco com a nova medida de proteção considerada, obteve-se um risco de $9,26 \times 10^{-6}$, enquadrando a estrutura dentro da faixa de risco considerado tolerável.

3.2 Projeto de SPDA externo

A seção referente ao projeto de SPDA externo será dividida em duas, subseção 3.2.1, relativa ao projeto da edificação residencial e subseção 3.2.2, relativa ao projeto da edificação industrial. Cada uma das subseções apresentará detalhes da planta de cada uma das estruturas, considerações referentes aos materiais utilizados, premissas adotadas, detalhamento sobre o posicionamento dos subsistemas de captação e subsistemas de descida. Dado o objetivo deste trabalho, o subsistema de aterramento, apesar de parte essencial de um projeto de SPDA, não se enquadra no escopo desta monografia, por conta disso, detalhes referente a tal subsistema não serão abordados.

3.2.1 Projeto SPDA externo para edificação residencial

O subsistema de captação da edificação residencial é composto por hastes e condutores em malha. Devido a sua altura (76,6 metros), o posicionamento deste subsistema exige especial atenção segundo a Seção 5.2 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015c). Por conta disso, escolheu-se o método das malhas, descrito no Anexo A da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015c), realizando-se também a verificação da zona de segurança de acordo com o *RSM*, apresentado na Figuras 34 e 35.

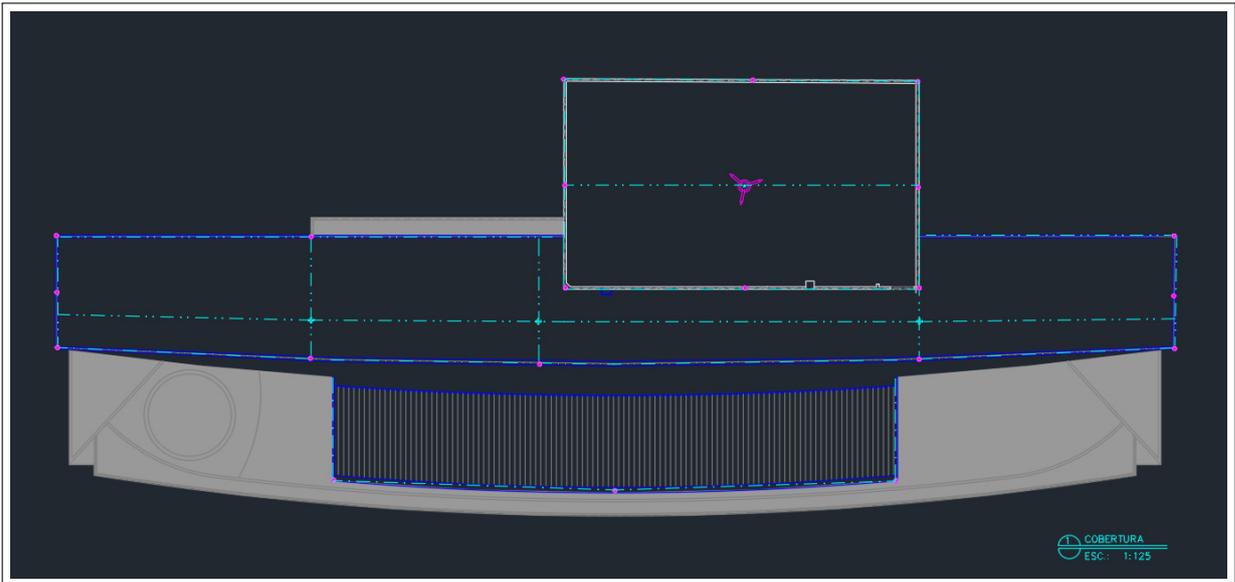
Foi considerado que a cobertura da estrutura é feita de material não explosivo. Distribuiu-se captosres de alumínio galvanizado a fogo de $\varnothing 3/8" \times 700$ mm ao longo da cobertura da torre residencial. Posicionou-se também um captor do tipo Franklin em latão cromado com 3 metros de altura sobre o ponto mais alto da edificação. Cada um desses captosres é ligado a malha, composta por um cabo de cobre nu encordoado de 35 mm^2 , sendo cada fio da cordoado com diâmetro de 2,5 mm, com exceção do captor do tipo Franklin que é ligado a malha por dois cabos ao invés de um. Dado a classe de proteção IV definida no projeto, o máximo afastamento dos condutores da malha foi de 20×20 metros de acordo com a Tabela 2 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015c).

As imagens referentes ao projeto de proteção das demais fachadas da edificação residencial poderão ser encontradas no Apêndice B. A Figura 11 apresenta o projeto do SPDA externo da cobertura, a Figura 12 apresenta o projeto do SPDA externo da fachadas norte e a Figura 13 apresenta a legenda dos símbolos utilizados.

Devido a altura da estrutura (acima de 60 metros), é exigido pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015c), Seção 5.2.3, a instalação de um subsistema de captação lateral com o objetivo de proteger a mesma contra descargas laterais. Por conta disso, foi considerado no projeto a instalação de uma malha ao longo dos últimos 20% da fachada até o topo da edificação. Os mesmos critérios e componentes da malha da parte superior da estrutura foram utilizados.

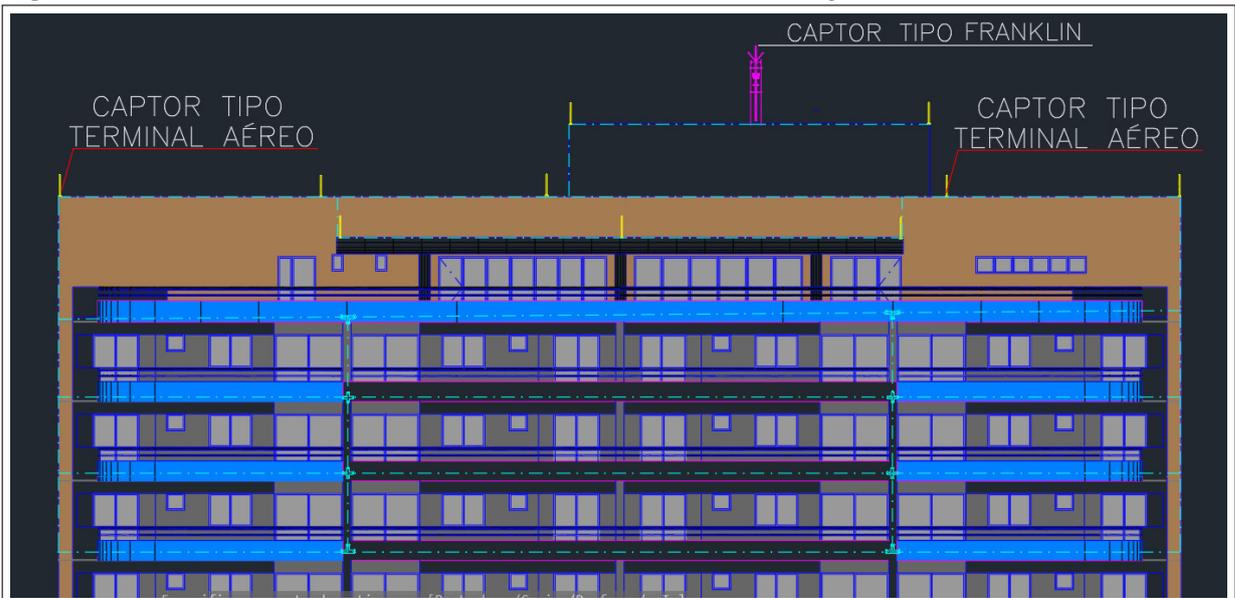
Para o subsistema de descida, foi considerado a presença de armaduras das estruturas de concreto armado eletricamente contínuas, armaduras essas classificadas como componentes naturais na estrutura (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015c).

Figura 11 – SPDA externo da cobertura da edificação residencial



Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

Figura 12 – Detalhe fachada norte com SPDA externo da edificação residencial



Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

3.2.2 Projeto SPDA externo para edificação industrial

A estrutura industrial apresenta um formato retangular simples e apenas dois pavimentos, tendo seu ponto mais alto atingindo 8 metros da superfície do solo. Considerou-se que a cobertura da estrutura é composta de material não explosivo. Seu subsistema de captação teve seu posicionamento realizado de acordo com o método das malhas descrito no Anexo A da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015c), tendo os requisitos citados em 3.2.1 atendidos. Realizou-se também a verificação da zona de segurança de acordo com o

Figura 13 – Legenda de símbolos utilizados no projeto do SPDA externo da edificação residencial

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
	CAPTOR TIPO FRANKLIN AEREO EM LATÃO CROMADO 2 Altura = 3,00m
	TERMINAL AÉREO EM AÇO GALVANIZADO A FOGO Ø 3/8" x 700 mm
	SOLDA EXOTÉRMICA TIPO L; CONEXÃO DE CABO DE COBRE NÚ DE 35mm ²
	SOLDA EXOTÉRMICA TIPO T; CONEXÃO DE CABO DE COBRE NÚ DE 35mm ²
	SOLDA EXOTÉRMICA TIPO X; CONEXÃO DE CABO DE COBRE NÚ DE 35mm ²
	CABO DE COBRE NU ENCORDOADO de 35mm ² ; CADA FIO DA CORDOADA COM DIÂMETRO DE 2,5 mm; USADO NA MALHA SUPERIOR.

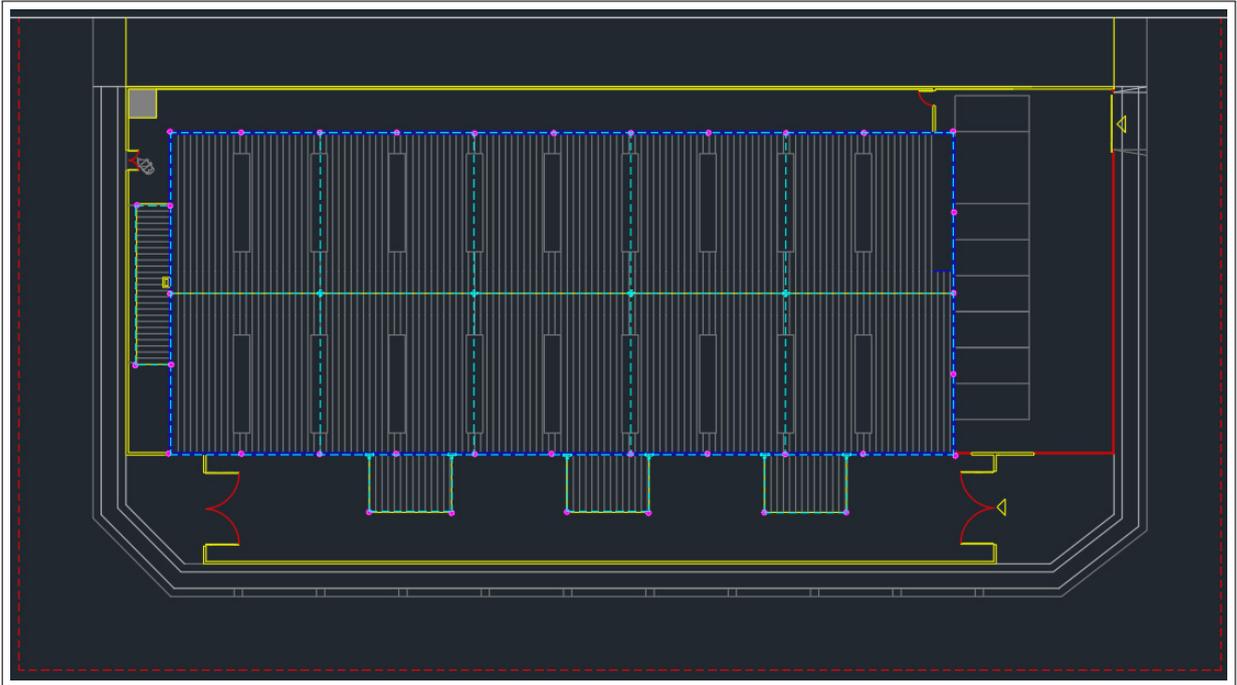
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

RSM, apresentado nas Figuras 51 e 52. O subsistema é composto por condutores em malha e captadores distribuídos ao longo da cobertura da estrutura. A malha é composta por um cabo de cobre nu encordoado de 35 mm², sendo cada fio da cordoado com diâmetro de 2,5 mm, e os captadores são de alumínio galvanizado a fogo de Ø 3/8" x 700 mm. Devido a classe de proteção definida no projeto (classe III de proteção), o máximo afastamento dos condutores da malha foi de 15 x 15 metros (Tabela 2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015c)).

A Figura 14 é referente a cobertura da edificação industrial com SPDA externo e a Figura 15 mostra a fachada leste da edificação com SPDA externo. As demais fachadas da estrutura com o projeto de SPDA externo implementado encontram-se no Apêndice B. Os elementos que compõe o projeto da edificação residencial são os mesmos presentes no projeto da edificação industrial. O significado dos mesmos pode ser encontrado na Figura 13.

Considerou-se que o subsistema de descida é um componente natural na estrutura, sendo composto por armaduras das estruturas de concreto armado eletricamente contínuas.

Figura 14 – Cobertura com SPDA externo da edificação industrial



Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

Figura 15 – Fachada leste com SPDA externo da edificação industrial



Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

3.3 Tutorial de aplicação do EFD: Software COMSOL Multiphysics ®.

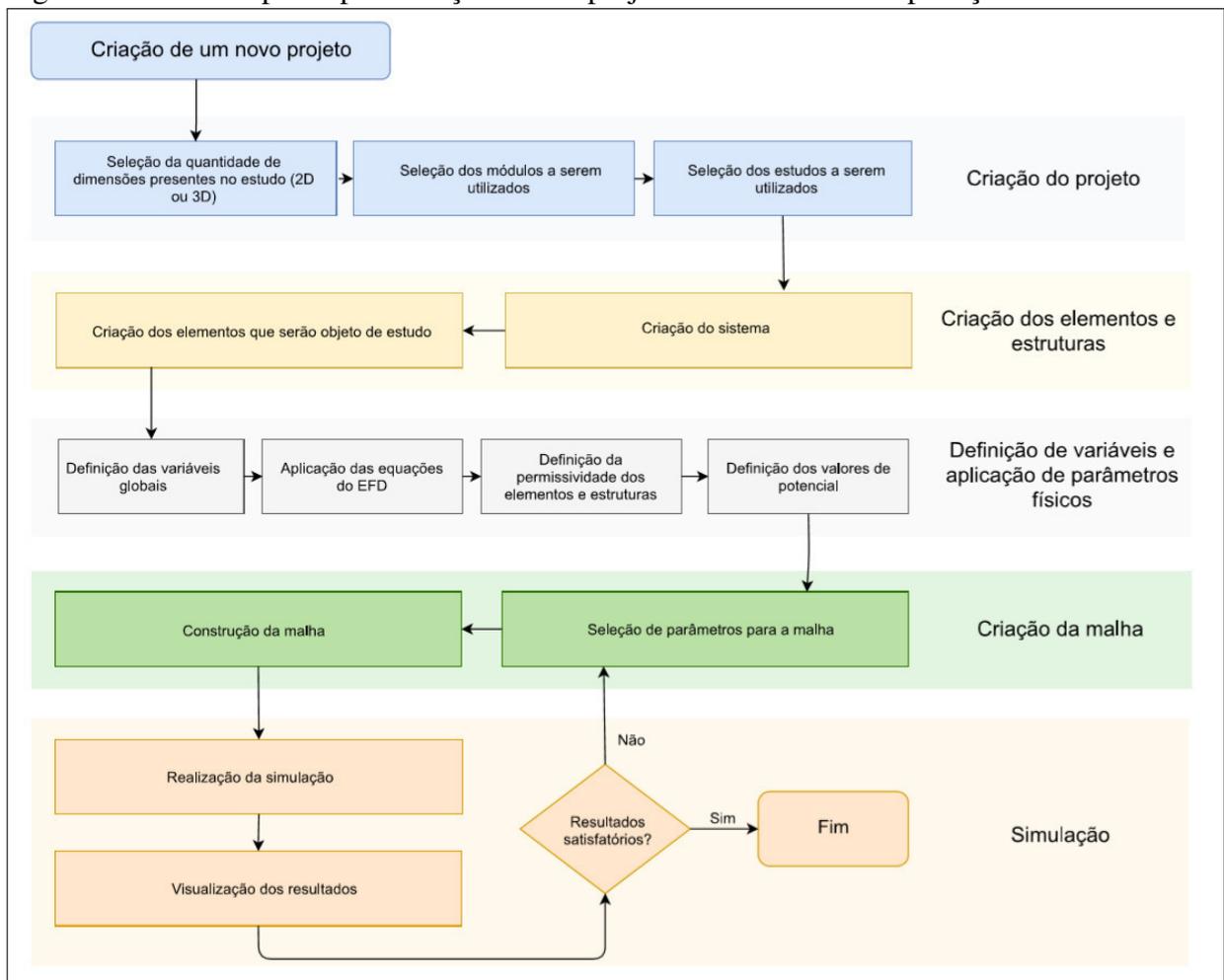
O software escolhido para implementação do *EFD* neste estudo de caso foi o COMSOL Multiphysics ®, uma ferramenta completa para simulação de problemas físicos e de engenharia que utiliza diversas técnicas numéricas para resolução de problemas. A plataforma possui diferentes módulos, como de eletromagnetismo, mecânica estrutural e acústica, escoamento e transferência de calor e de engenharia química. O interpretador de equações do software utiliza o sistema totalmente acoplado de *PDE* que é discretizado utilizando o *FEM* para variáveis de espaço (x,y,z), criando assim malhas com elementos apropriados para corresponder aos métodos numéricos associados (COMSOL, 2019). Utilizou-se o módulo de eletromagnetismo AC/DC para realização das simulações.

O fluxograma apresentado na Figura 16 representa o passo a passo para criação de

um projeto no Comsol e a aplicação do *EFD*. Ele é dividido em cinco diferentes partes:

1. Criação do projeto;
2. Criação dos elementos e estruturas;
3. Definição de variáveis e aplicação de parâmetros físicos;
4. Criação da malha;
5. Simulação.

Figura 16 – Passo a passo para criação de um projeto no Comsol com aplicação do *EFD*



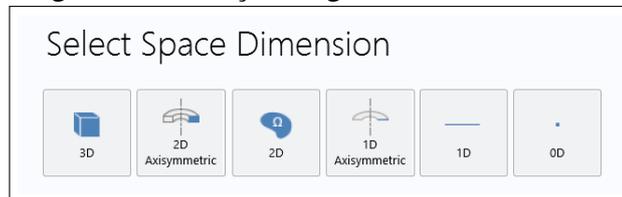
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

3.3.1 Criação do projeto

A primeira parte do diagrama, criação do projeto, relata os passos para se realizar a criação de um projeto no Comsol Figura 17. Como o software oferece ferramentas para a modelagem de geometrias 1D, 2D e 3D, é necessário escolher a geometria em que o projeto será realizado. No caso da aplicação do *EFD*, simulações em 2D são mais facilmente realizáveis

do que as em 3D por não exigirem tanto esforço computacional e pela simplicidade na criação dos objetos e visualização dos resultados, apesar de não permitirem uma análise completa dos resultados obtidos.

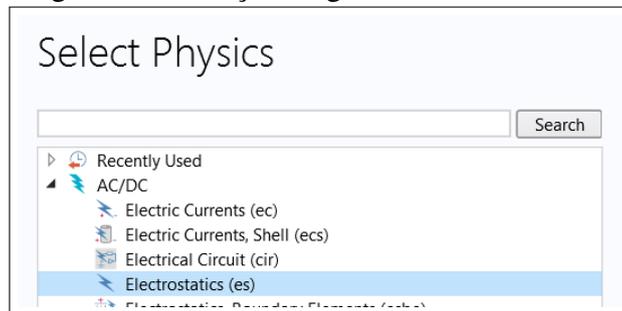
Figura 17 – Seleção de geometria



Fonte: Comsol Multiphysics

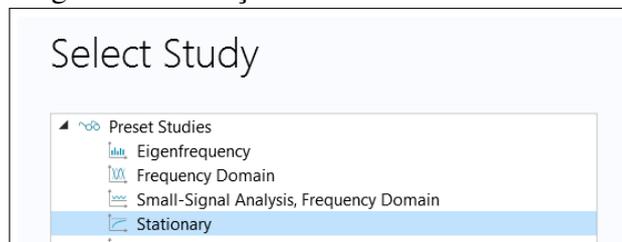
Realizada a seleção da geometria a ser utilizada, é necessário escolher o módulo a ser utilizado, o de Eletrostática Figura 18. Tal módulo permite a simulação de campos elétricos, deslocamento de campos elétricos e distribuição de potencial em dielétricos sob condições onde a distribuição de carga é descrita (COMSOL, 2019). Por fim, seleciona-se o tipo de estudo estacionário Figura 19, em que as variáveis não se alteram de acordo com o tempo.

Figura 18 – Seleção de geometria



Fonte: Comsol Multiphysics

Figura 19 – Seleção de estudo

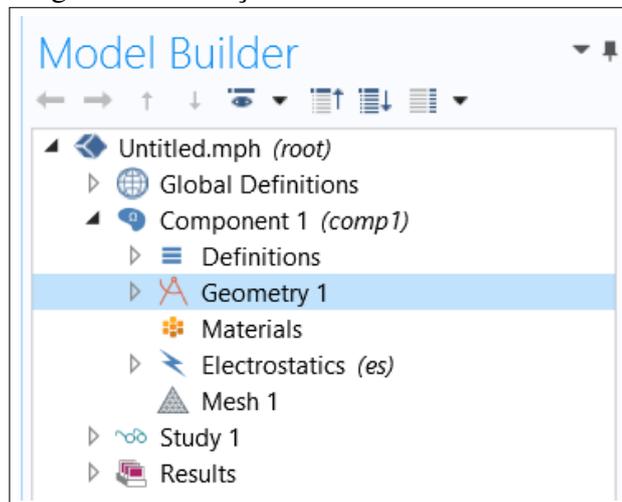


Fonte: Comsol Multiphysics

3.3.2 Criação de elementos e estruturas

A segunda parte do diagrama, criação dos elementos e estruturas, apresenta dois passos. O primeiro é a criação de um sistema cujas dimensões podem variar dependendo da geometria utilizada, geralmente um quadrado de dimensões 250 m x 250 m para a geometria bidimensional ou um cubo de dimensões 250 m x 250 m x 250 m para a geometria tridimensional. A inserção de tais elementos pode ser realizada através do item *Geometry* (Figura 20). Ele é necessário pois posteriormente serão atribuídos parâmetros físicos para que o mesmo simule as condições do ar.

Figura 20 – Criação de elementos



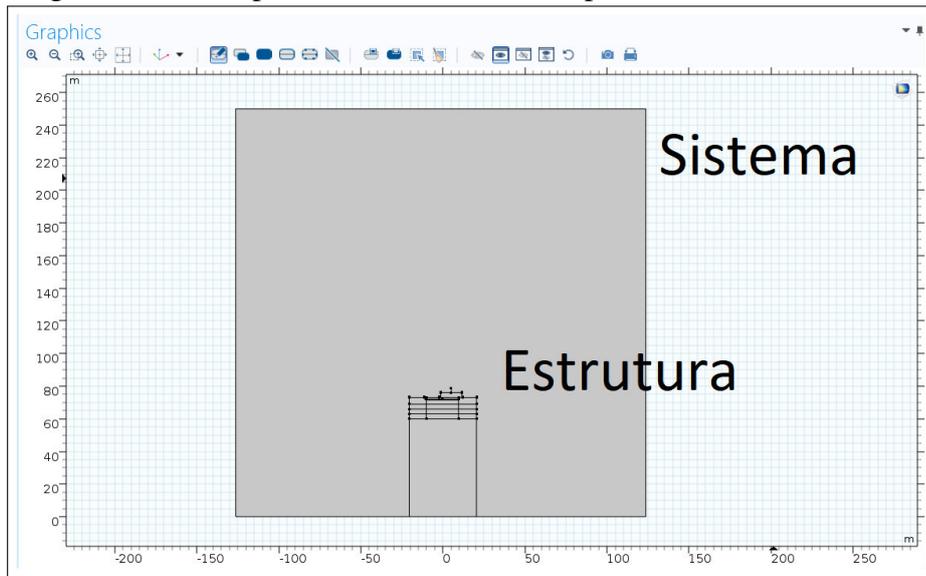
Fonte: Comsol Multiphysics

Realizada a criação do sistema, os objetos a serem criados deverão estar contidos dentro dele, como no exemplo pode ser observado na Figura 21. Os elementos que compõem o SPDA (captadores e malha) foram construídos utilizando elementos bidimensionais em ambas as geometrias (2D e 3D).

3.3.3 Definição de variáveis e aplicação de parâmetros físicos

A terceira parte do diagrama, definição de variáveis e aplicação de parâmetros físicos, é essencial para a realização da simulação. A primeira etapa, definição das variáveis globais, é realizada através da criação de uma nova variável, *lambda*, que irá assumir o valor referente ao raio da esfera rolante encontrado na Tabela 2 da (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015c) da correspondente classe do SPDA para qual o projeto foi realizado. O valor para *lambda* possui uma relação de aproximadamente 1 para 1 com o raio da esfera rolante de

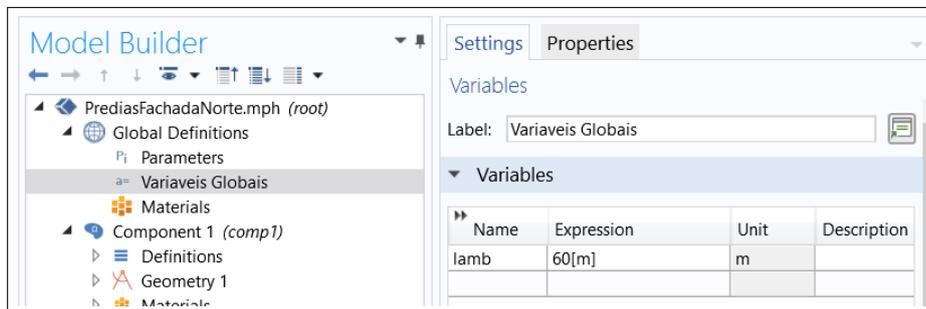
Figura 21 – Exemplo de sistema e seus componentes



Fonte: Comsol Multiphysics

acordo com Rodrigues (2019) , e é o parâmetro (λ) definido na equação 2.1.

Figura 22 – Exemplo de definição da variável *lamb* para um SPDA de classe IV



Fonte: Comsol Mutiphysics

O próximo passo, aplicação das equações do *EFD*, introduz a equação 2.1 na simulação. Para isso, no campo *Definitions*, cria-se uma nova variável e atribui-se o seguinte o seguinte valor para cada um dos eixos utilizados (aplica-se o valor para o eixo Z somente no caso de estudos em três dimensões):

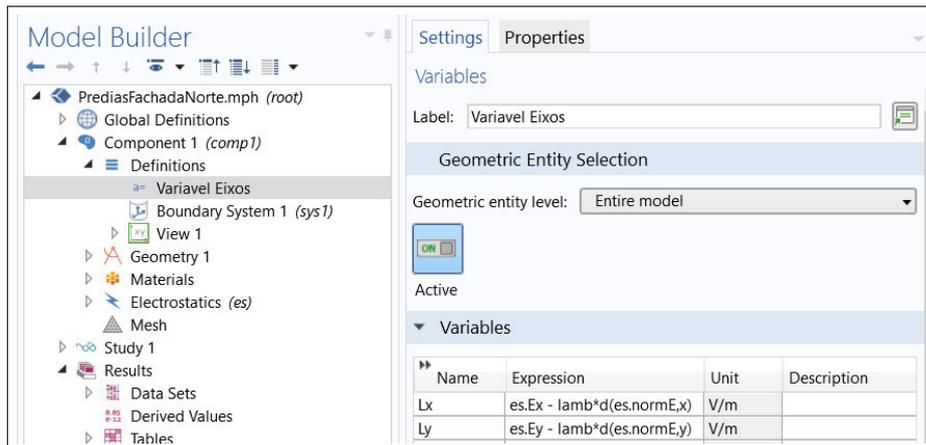
$$es.Ex - lamb * d(es.normE, x) \quad (3.3)$$

$$es.Ey - lamb * d(es.normE, y) \quad (3.4)$$

$$es.Ez - lamb * d(es.normE, z) \quad (3.5)$$

As equações 3.3, 3.4 e 3.5 são as equivalentes da equação 2.1 aplicada à direção de cada um dos eixos do modelo em construção. Um exemplo de inserção da equação pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 – Exemplo de aplicação da equação do EFD em um modelo bidimensional



Fonte: Comsol Multiphysics

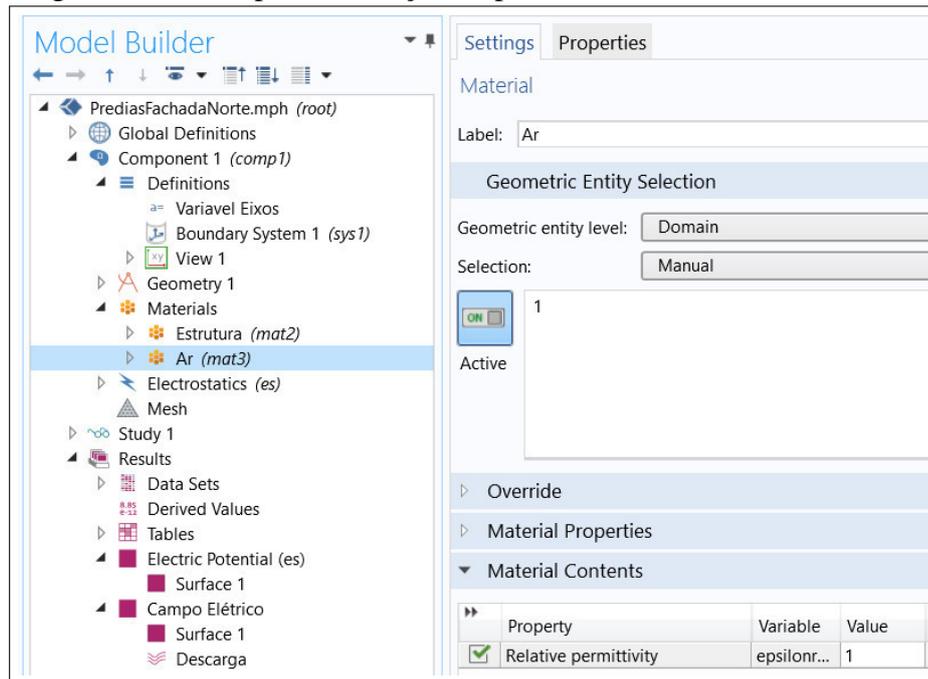
A próxima etapa é a definição da permissividade dos elementos e estruturas. A permissividade pode ser definida como a razão entre a capacitância de um capacitor preenchido por um dielétrico e o valor de capacitância do mesmo capacitor no vácuo (WARD, 2016)

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (3.6)$$

Para a realização deste estudo de caso, considerou que as estruturas construídas eram inteiramente feitas de concreto. Segundo McGraw (2015), o concreto é composto por uma mistura de cimento e outros agregados. Seus valores da permissividade relativa variam conforme a percentual de concreto na mistura (OGUNSOLA *et al.*, 2005), podendo alcançar valores quando seco de 2.5 à 7 e quando molhado de 8 à 12 (MCGRAW, 2015). Adotou-se o valor de permissividade relativa igual à 7 para a realização deste estudo de caso. Outro elemento também que precisa ter sua permissividade relativa definida é o ar, representado pelo sistema construído. Para isso adotou-se o valor de 1 conforme Hayt e Buck (2003), Apêndice C. Um exemplo de como inserir a permissividade relativa a um material no software encontra-se na Figura 24. É necessário ir em *Definitions, Materials*, adicionar um novo material, ir em propriedades do material, selecionar *Basic properties*, selecionar *Relative permittivity* e inserir o valor correspondente ao material da estrutura utilizada no projeto.

O próximo passo é a definição dos valores de potencial. O valor de potencial na base de uma nuvem de tempestade à 2 km de altitude de -100 MV (VISACRO, 2005). Rodrigues

Figura 24 – Exemplo de inserção de permeabilidade em uma estrutura



Fonte: Comsol Multiphysics

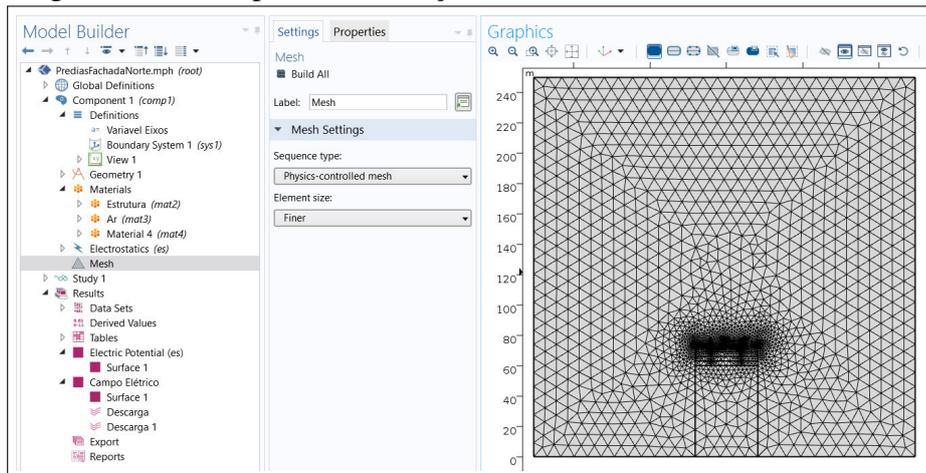
(2019) adota o valor de -12,5 MV à 250 metros de altitude em um domínio simulado no Comsol uma vez que produz o mesmo campo elétrico de intensidade de 50 kV/m de uma nuvem de tempestade a 2 km de altitude. Portanto, definiu-se o topo do sistema com o potencial igual à -12,5 MV uma vez que o domínio de 250 m de altura apresenta menor requerimento computacional do que um domínio de 2 km. O solo, bem como todos os elementos que compõe o SPDA foram definidos com potencial 0 V simulando a conexão com o subsistema de aterramento.

3.3.4 Criação da malha

A quarta etapa é a criação da malha. Ela representa a união das subdivisões dos elementos, portanto, têm sua eficiência atrelada a adaptação do refinamento utilizado (GIL, 2015). O software utilizado proporciona duas maneiras de se construir uma malha, uma forma automática denominada *Physics-controlled mesh* que oferece diferentes qualidades de malha Figura 25, e a outra maneira denominada *User-controlled mesh*, em que os parâmetros a serem utilizados são customizados pelo usuário.

Conforme menor o tamanho dos elementos finitos, melhor a qualidade da malha. Entretanto, o aumento da quantidade de tais elementos demanda maior esforço computacional. Por conta disso, é necessário buscar o maior refinamento possível sem comprometer a capacidade de processamento da simulação. Caso os resultados obtidos com a malha construída não sejam

Figura 25 – Exemplo de construção de malha



Fonte: Comsol Multiphysics

satisfatórias, recomenda-se realizar o refinamento da malha, diminuindo o tamanho dos elementos para aumentar a qualidade dos resultados obtidos.

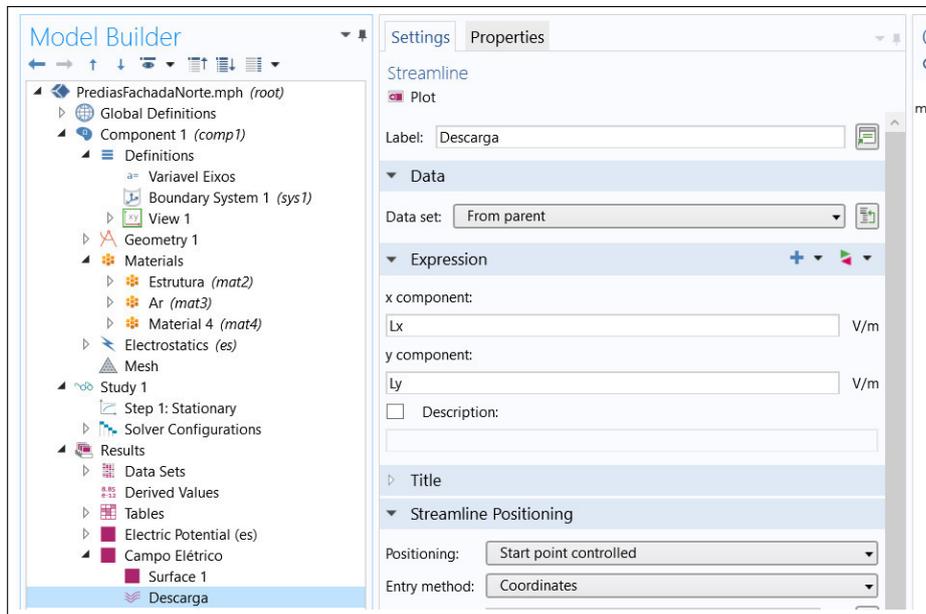
3.3.5 Simulação

Criado o projeto, as estruturas, a malha e definido as variáveis e parâmetros físicos, é possível realizar a simulação, última etapa do diagrama da Figura 16. Para isso, basta ir na seção *Study* e selecionar *Compute*. Após a simulação, os resultados serão exibidos, sendo o gráfico de potencial o primeiro a aparecer. Caso esteja utilizando a geometria tridimensional, é possível escolher diferentes planos que cortam o sistema e as estruturas para melhor visualização da variação de potencial em todos os elementos.

Para visualizar o campo elétrico, basta ir na seção *Results*, adicionar um novo grupo de plotagem (*2D Plot group* para geometrias bidimensionais ou *3D Plot group* para geometrias tridimensionais), adicionar uma nova *Surface*, e no campo *Expression* inserir $es.normE$. Assim como no caso do potencial elétrico para simulações realizadas em três dimensões, é possível plotar diferentes planos para facilitar a visualização.

Para visualizar a direção das descargas elétricas, basta adicionar no grupo de plotagem criado anteriormente uma nova *Streamline*, e nos campos de expressão adicionar para a componente no eixo x a expressão Lx , eixo y a expressão Ly e no caso de estar sendo utilizada a geometria tridimensional, no eixo z a expressão Lz . A Figura 26 apresenta um exemplo de plotagem de descargas atmosféricas em geometria bidimensional. A quantidade de linhas que representam descargas, bem como o espaçamento entre elas (passo) também pode ser customizado em *Streamline positioning*.

Figura 26 – Exemplo de plotagem de descargas atmosféricas em geometria bidimensional



Fonte: Comsol Multiphysics

Em todas as plotagens é possível modificar a escala de cores, qualidade, estilo e outros parâmetros.

Caso os resultados apresentem inconsistências como comportamento inesperado das descargas atmosféricas próximas à estrutura, principalmente em regiões de curvas ou intersecções, é necessário realizar o refinamento da malha e reconstruí-la.

O refinamento pode ser realizado de duas formas na seção *Mesh*. A primeira forma, utilizando *Physics-controlled mesh* é a seleção de tamanhos de elemento (*Element size*) menores. Quanto mais fino o refinamento, melhor a qualidade da malha. Outra maneira é utilizar *User-controlled mesh*. Com essa opção, o usuário pode customizar diversos parâmetros inerentes à malha, como o tamanho máximo e mínimo dos elementos, fatores de curvatura e outros. Nessa opção ainda é possível selecionar domínios, planos e objetos específicos para obterem um refinamento diferenciado dos demais elementos que compõe o sistema.

É necessário ter em mente que, malhas com elevado nível de detalhamento exigem maior processamento para realização da simulação. Outro fator que afeta o tempo de processamento da simulação é a plotagem de resultados, principalmente ao utilizar a geometria em três dimensões. O correto posicionamento dos planos, bem como das linhas de descargas atmosféricas é essencial para visualização dos resultados de forma satisfatória. A plotagem de diversos planos e/ou linhas pode aumentar o tempo de processamento.

4 RESULTADOS

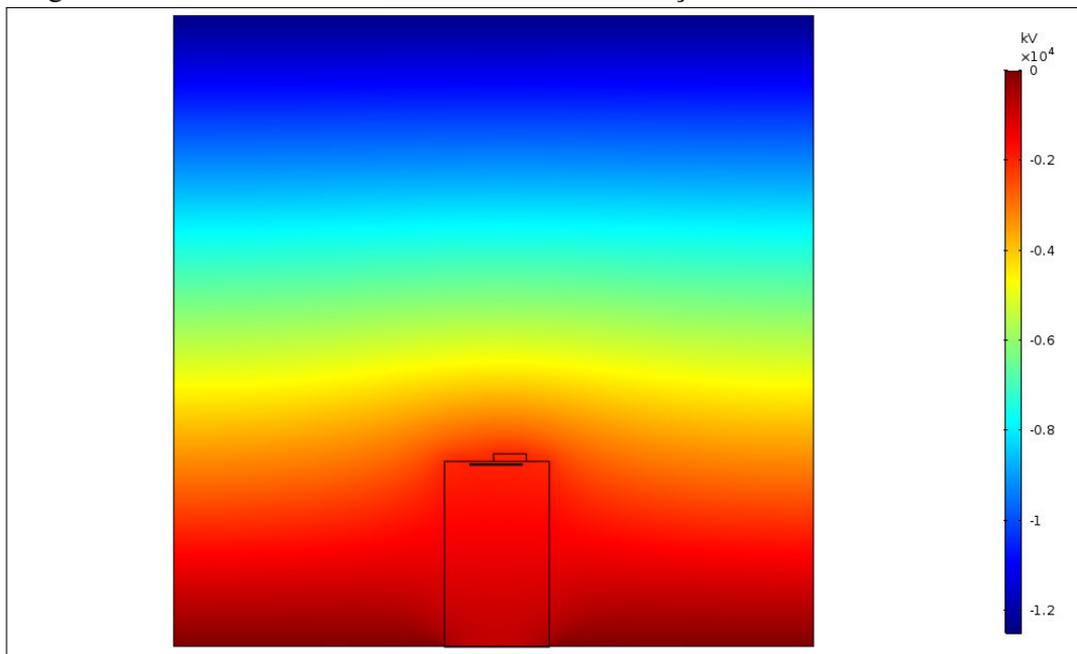
Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com as simulações dos modelos das edificações construídos bidimensionalmente e tridimensionalmente nos software COMSOL Multiphysics ®. Aplicou-se a metodologia descrita no Capítulo 3 e no Fluxograma da Figura 16 para plantas de edificações residencial e industrial comparando o método *EFD* com o *RSM* e o método das malhas. A Seção 4.1 apresenta os resultados referentes a edificação residencial e a Seção 4.2 apresenta os resultados referentes a edificação industrial.

4.1 Simulação em planta residencial

Foi reproduzido o projeto da edificação de cada uma das fachadas da instalação residencial em duas dimensões no COMSOL. Todas as simulações em 2D apresentadas nesta seção serão correspondentes a fachada norte. Os resultados obtidos das demais fachadas encontram-se no Apêndice C.

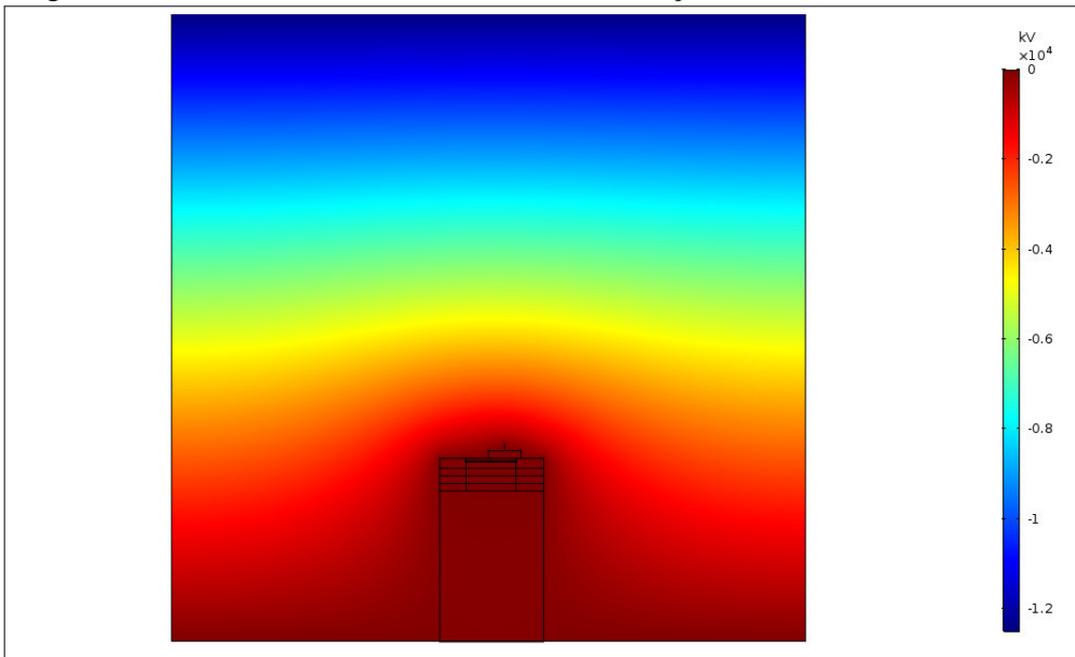
A Figura 27 e a Figura 28 apresentam o comportamento do potencial elétrico no sistema para os modelos sem e com SPDA, respectivamente. Foram aplicados os valores de potencial de acordo com o explicitado na metodologia, onde o solo foi definido como 0 V, a base das nuvens (representado pela parte superior do sistema) em -12,5 MV e os captore e malha que compõe o sistema de proteção tiveram potencial definido em 0 V.

Figura 27 – Potencial elétrico fachada norte instalação residencial sem SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 28 – Potencial elétrico fachada norte instalação residencial com SPDA



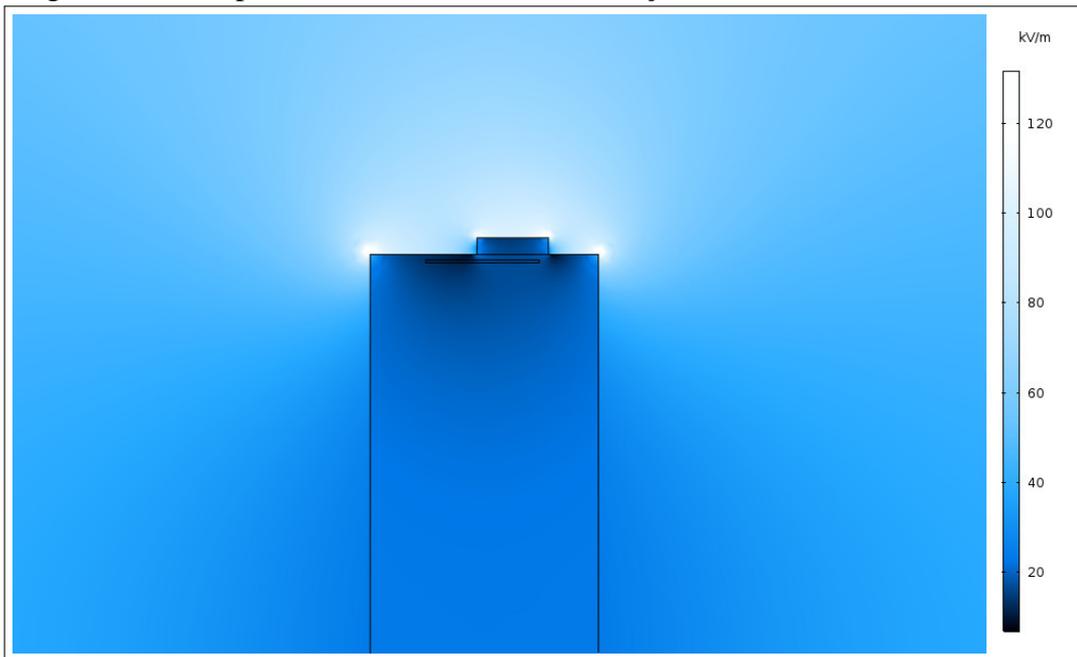
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Ao se comparar ambas as figuras, constata-se a alteração no gradiente de potencial elétrico sobre a estrutura com SPDA (Figura 28). Nela, as regiões de potencial zero não se limitam apenas ao solo, mas também são visíveis nos elementos de proteção.

Por meio da Figura 29, é possível verificar o campo elétrico na estrutura sem SPDA. Observa-se pela mudança da escala de cores apresentada na imagem que a densidade de carga elétrica nas regiões curvas e de pontas supera os 120 kV/m, suficiente para romper a rigidez dielétrica de acordo com Rodrigues (2019), que cita em *Analysis of the Incidence of Direct Lightning over a HVDC Transmission Line through EFD Model* que a rigidez dielétrica do ar apresenta valores entre 100 e 500 kV/m devido a umidade em condições de tempestade. Por conta disso, é esperado que tais regiões de ponta sejam mais propensas a incidência de descargas atmosféricas. A Figura 30 por sua vez apresenta o resultado da simulação do campo elétrico na estrutura com SPDA. As regiões de campo elétrico nulo agora se estendem também por considerável parte da edificação, resultado da presença do subsistema de captação que se encontra no mesmo potencial do solo. Ainda é observável nas regiões de pontas e saliências (nos captadores) a alta densidade de cargas elétricas destacado pela cor branca, fazendo dessas regiões as mais propensas a incidência de descargas atmosféricas.

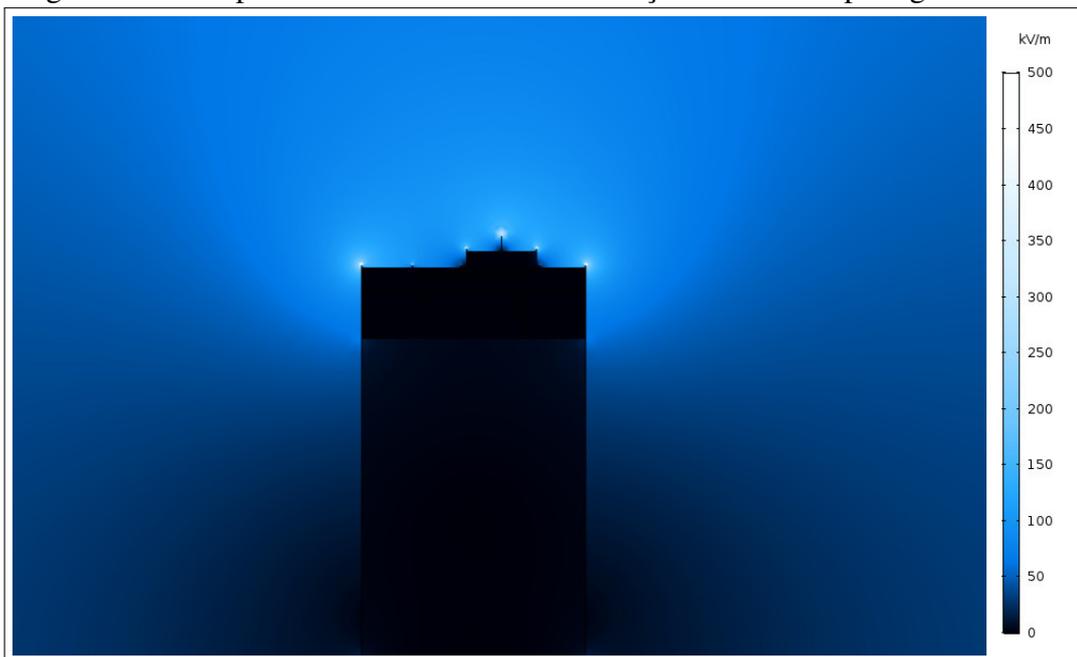
A direção natural do curso das descargas atmosféricas sobre a edificação sem SPDA e com SPDA, plotadas sobre o gráfico de variação do campo elétrico na estrutura podem ser observadas na Figura 31 e Figura 32, respectivamente. Para a plotagem das linhas de descargas

Figura 29 – Campo elétrico fachada norte instalação residencial sem SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 30 – Campo elétrico fachada norte instalação residencial protegida

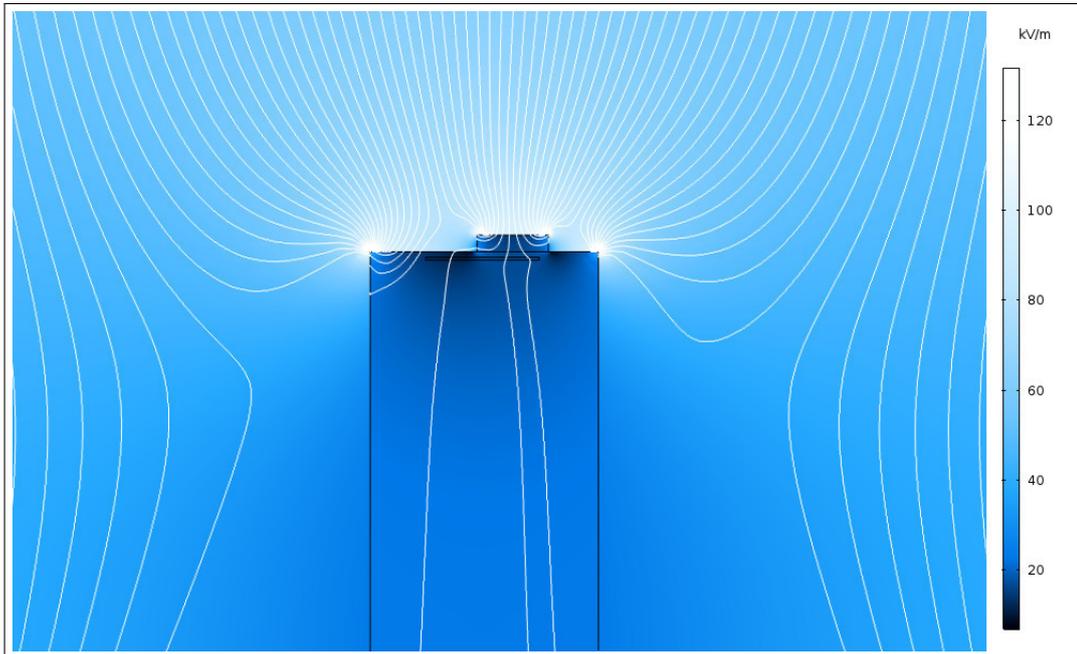


Fonte: elaborado pelo autor (2019).

atmosféricas foi utilizado a distância de 3 metros entre a origem dos raios no topo do sistema (passo igual a 3).

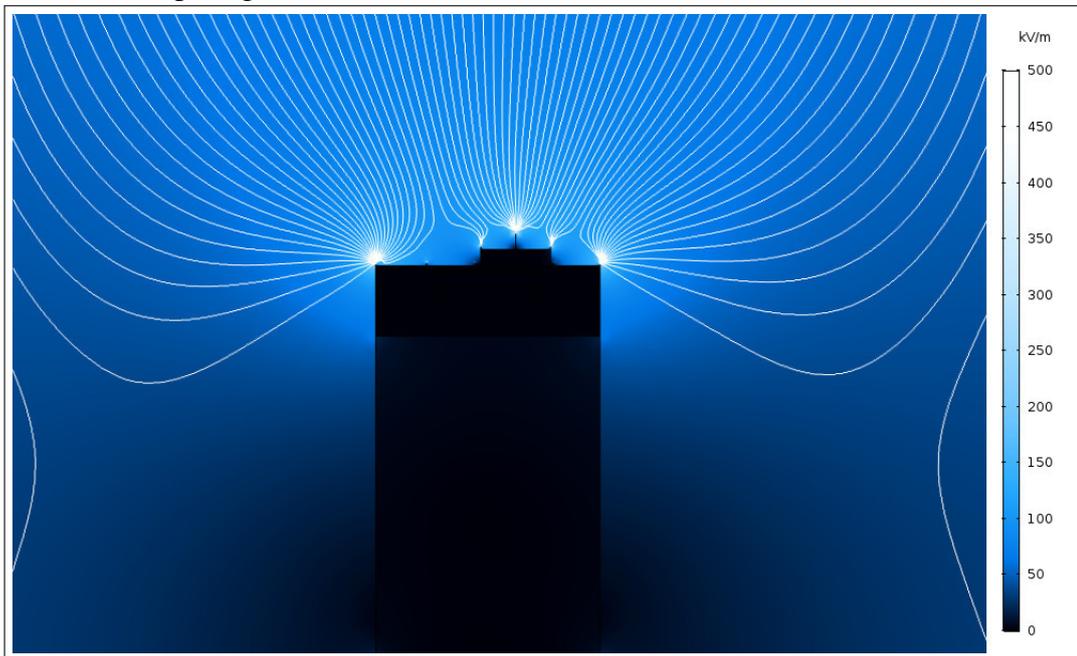
Constata-se que, em ambos os casos (estrutura sem e com SPDA), as regiões que apresentam o maior campo elétrico foram as mais propensas a receberem descargas atmosféricas. Analisando a Figura 31, observa-se que as descargas atingem diretamente a estrutura, o que, em uma situação real, resultaria em danos a instalação e aos ocupantes. Por sua vez, na Figura

Figura 31 – Descarga atmosférica sobre fachada norte instalação residencial sem SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 32 – Descarga atmosférica sobre fachada norte em instalação residencial protegida

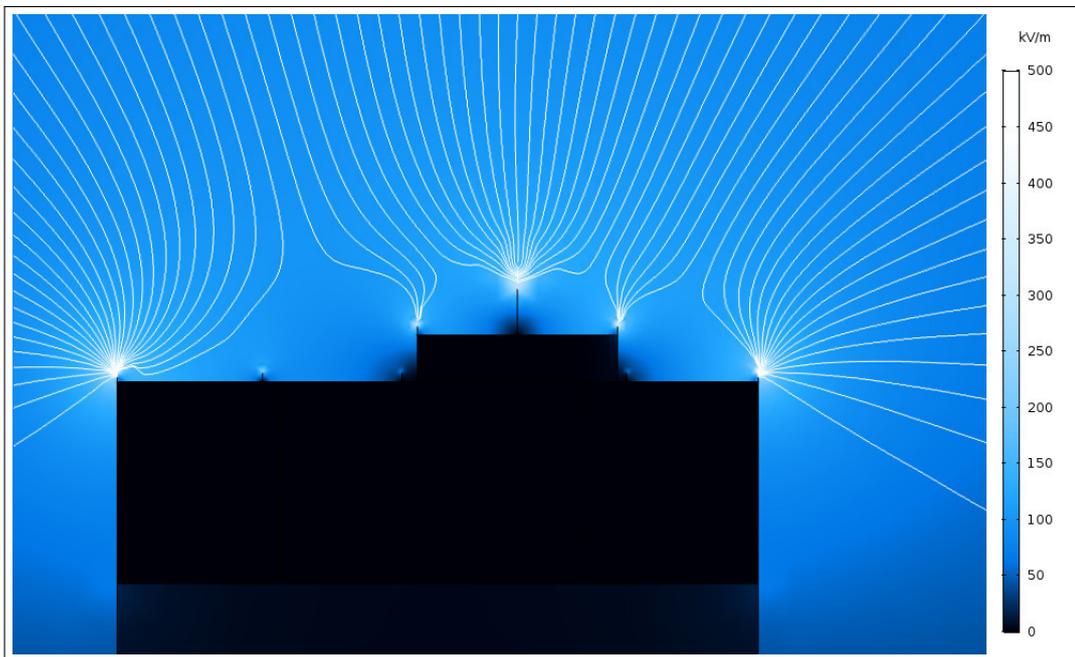


Fonte: elaborado pelo autor (2019).

32 (estrutura com SPDA), todas as descargas simuladas incidem sobre o sistema de proteção (captadores e malha), confirmando assim a eficácia do projeto de proteção segundo o *EFD*. A Figura 33 traz com maior detalhamento a região de incidência de descargas sobre o SPDA.

Durante o projeto do SPDA externo, considerou-se o método das malhas para o

Figura 33 – Descarga atmosférica sobre fachada norte em detalhe de instalação residencial com SPDA



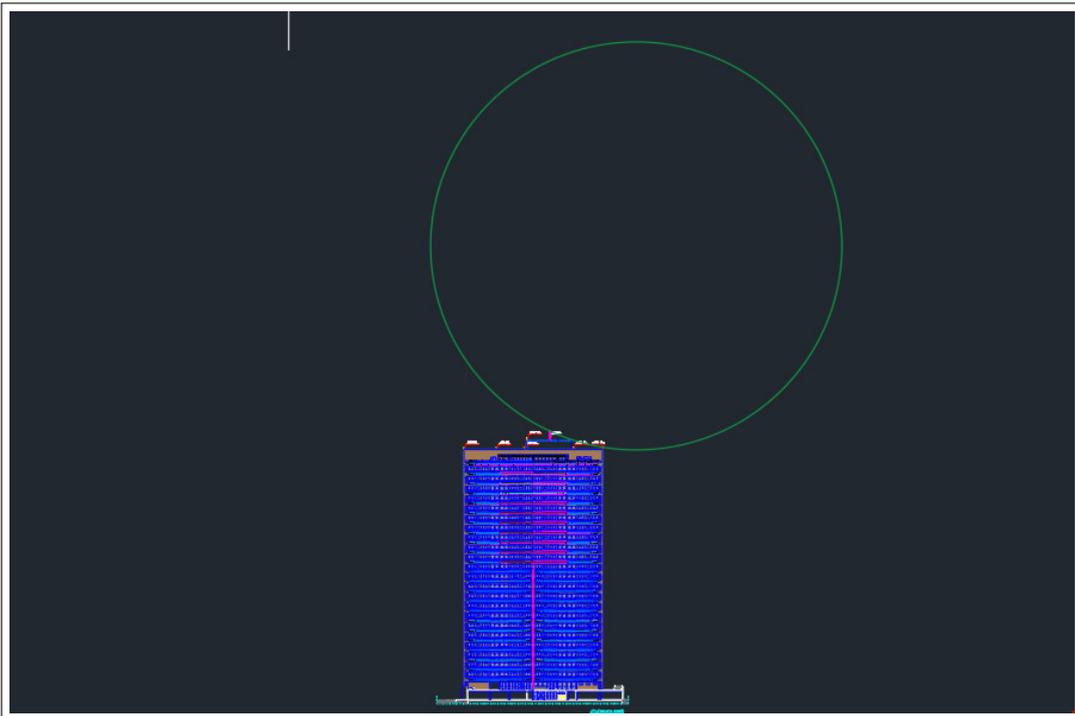
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

posicionamento do subsistema de captação de acordo com o Apêndice A e a Tabela 2 de (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015c). Com os resultados obtidos através de simulações em que foi aplicado o *EFD*, foi possível constatar a eficácia do sistema de proteção elaborado. Entretanto, foi realizado também uma comparação direta entre o *RSM* e o *EFD*.

Para isso, modificou-se parte do projeto realizado, retirando-se um dos captadores da região superior direita da estrutura, e lançou-se uma esfera de 60 metros de raio (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015c) sobre a estrutura. Para fins práticos, registrou-se somente uma das regiões de particular interesse, Figura 34, podendo ser vista com maior nível de detalhamento na Figura 35.

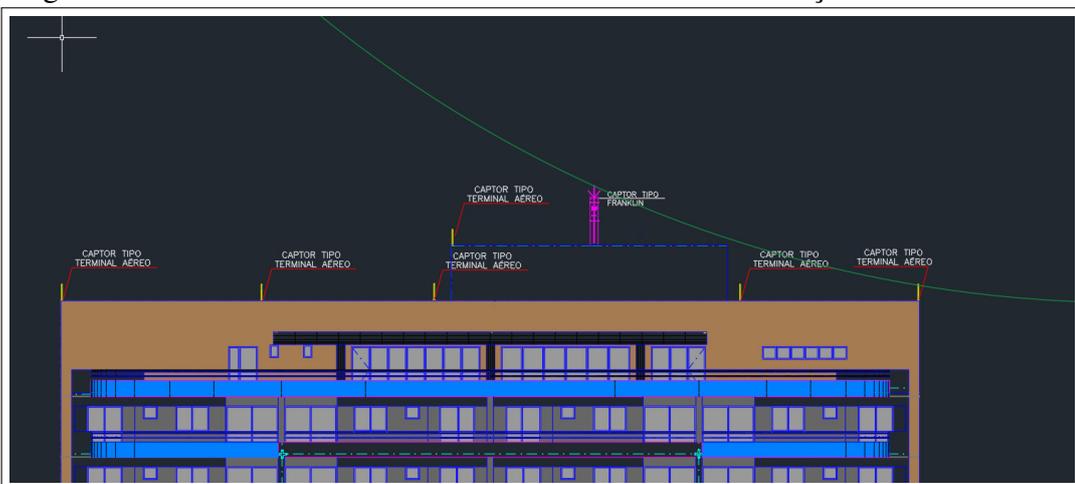
Ao observar a esfera rolante posicionada, verifica-se que a mesma não toca a região superior direita da edificação por conta do posicionamento dos captadores, configurando uma área segura pelo *RSM*. Entretanto, ao realizar a simulação de descargas atmosféricas pelo o *EFD* (Figura 36), observa-se que a região não está protegida, pois é alvo de descargas atmosféricas que, em uma situação real, poderiam colocar em risco a vida dos ocupantes da estrutura. Esse resultado observado é de particular interesse, pois demonstrou um caso em que o *RSM*, apesar de indicar o adequado posicionamento do subsistema de captação, deixou parte da estrutura vulnerável a incidência de descargas atmosféricas, como pode ser observado pelas linhas vermelhas que

Figura 34 – Esfera rolante sobre fachada norte instalação residencial



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 35 – Detalhe esfera rolante sobre fachada norte instalação residencial



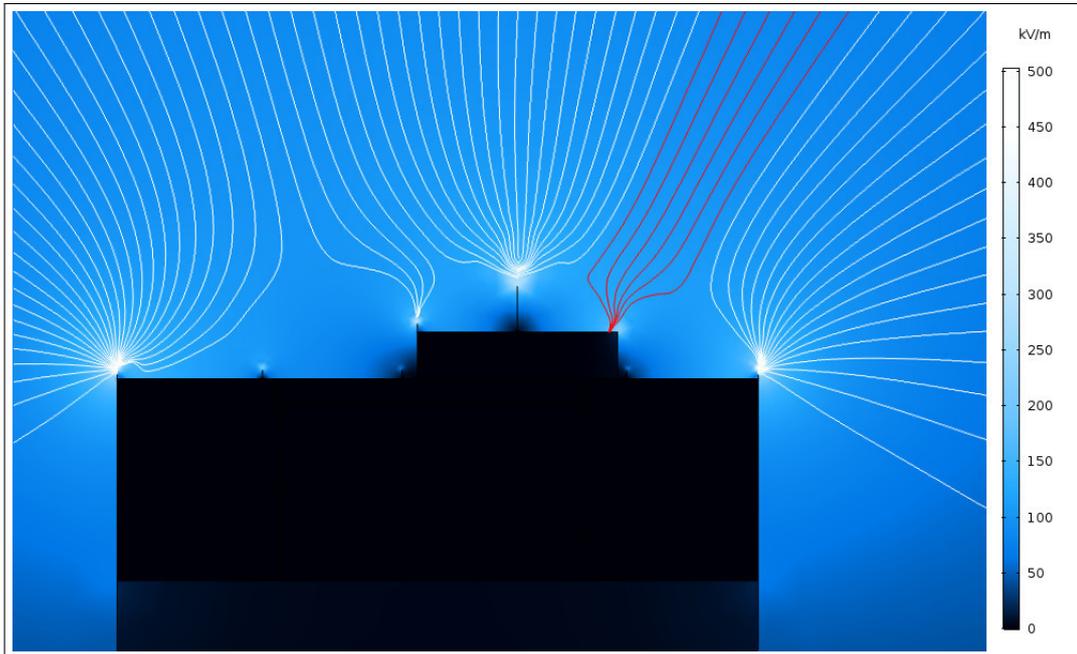
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

incidem sobre a edificação na Figura 36.

Após a simulação do *EFD* nos modelos bidimensionais, realizou-se então as simulações no projeto tridimensional da instalação residencial. O resultado obtido com a simulação do potencial elétrico pode ser visualizado na Figura 38. Optou-se para melhor visualização dos resultados a plotagem de 4 planos, sendo um plano no eixo x que toca a fachada sul, um plano no eixo y que toca a fachada leste, e dois planos no eixo z, um localizado no solo e outro no topo do sistema, que representa a base das nuvens.

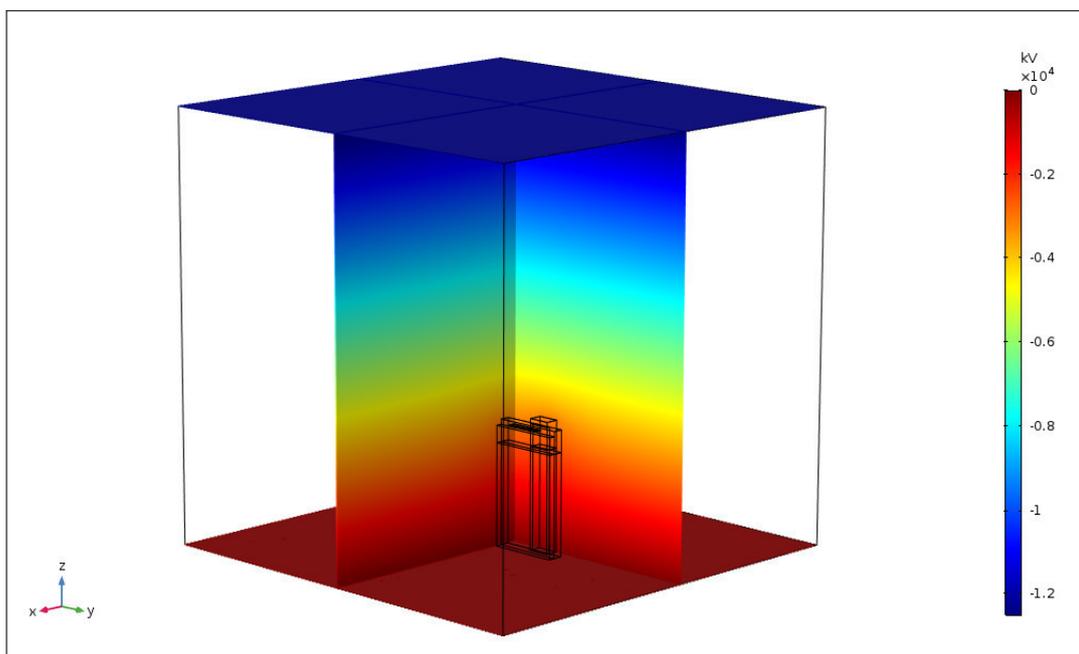
Ao observar os planos constata-se a coerência com os resultados obtidos bidimensio-

Figura 36 – Descarga atmosférica sobre fachada norte em instalação residencial com SPDA projetado de acordo com *RSM*



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

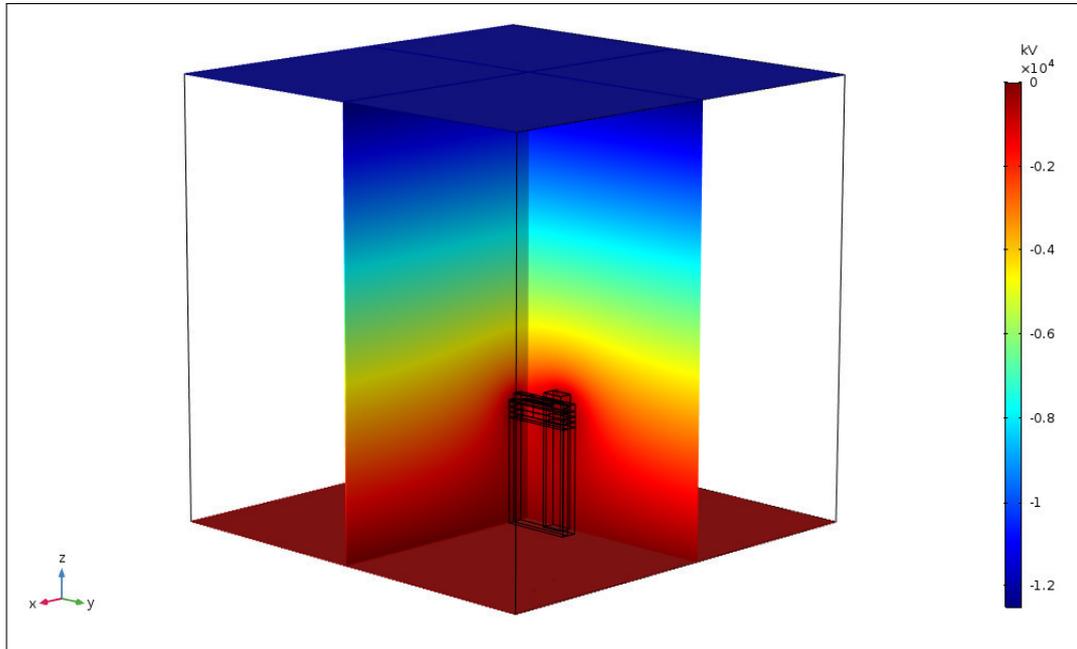
Figura 37 – Potencial elétrico modelo tridimensional instalação residencial sem SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

nalmente na gradação do potencial elétrico de acordo com os valores estabelecidos, tanto para o caso em que não existe o SPDA, quanto para o caso em que o SPDA é presente. Observa-se que, no caso da Figura 38, se verifica uma alteração no gradiente de potencial elétrico quando comparada com a Figura 37. Tal alteração ocorre devido ao potencial definido para o sistema de

Figura 38 – Potencial elétrico modelo tridimensional instalação residencial com SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

proteção de 0 V, o mesmo que o solo.

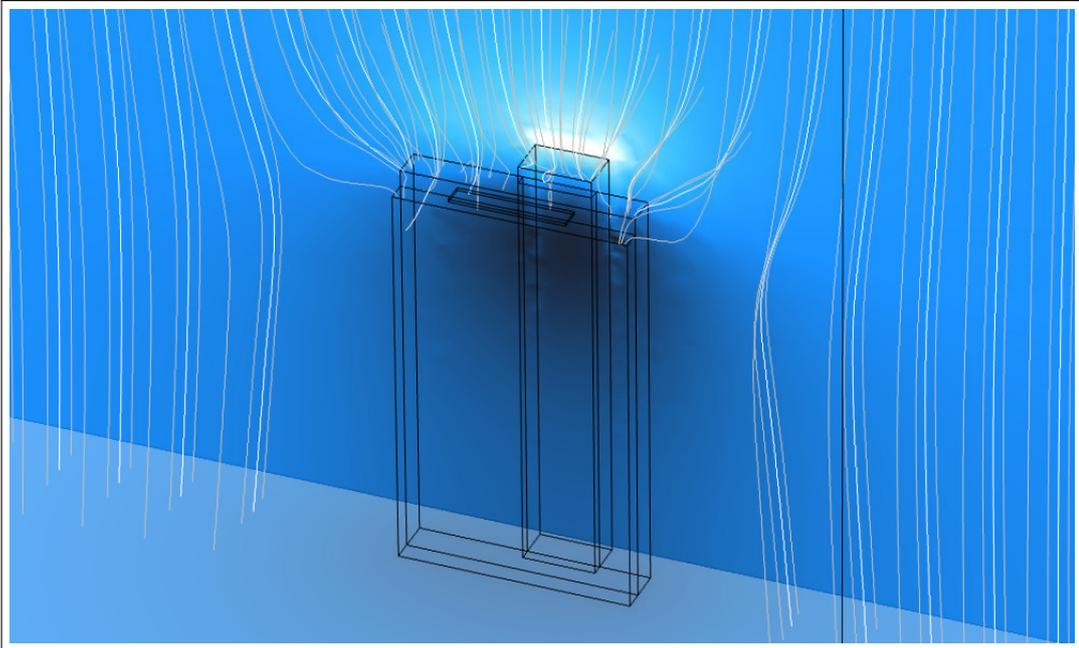
Plotou-se o campo elétrico e a direção natural do curso das descargas atmosféricas em ambas as situações (instalação sem e com SPDA) na Figura 39, Figura 40, Figura 41, e Figura 42.

Devido a simulação ter sido realizada em três dimensões, a observação dos valores para o campo elétrico em regiões distintas da estrutura só pode ser realizada com o correto posicionamento do plano que irá apresentar os resultados. Para melhor visualização, escolheu-se plotar 3 planos com valores referentes ao campo elétrico em regiões distintas. O plano no eixo x toca a fachada sul da edificação, o plano no eixo y toca o extremo do sistema e o plano no eixo z toca o solo. Em todos os planos é possível observar a variação do campo elétrico, entretanto o plano em que tal variação é mais relevante devido a proximidade à estrutura é o plano x. Observa-se que o resultado encontrado está de acordo com os resultados obtidos nas simulações realizadas em duas dimensões, onde as regiões de ponta e saliência apresentaram uma maior densidade de cargas elétricas destacadas pela cor branca. As descargas elétricas foram plotadas com cores variadas.

Na Figura 39, que representa a instalação desprotegida, é possível observar a incidência de descargas em toda a estrutura da edificação, independente da região possuir saliência ou ponta. Em um caso real, essas descargas que incidem sobre a instalação poderiam causar

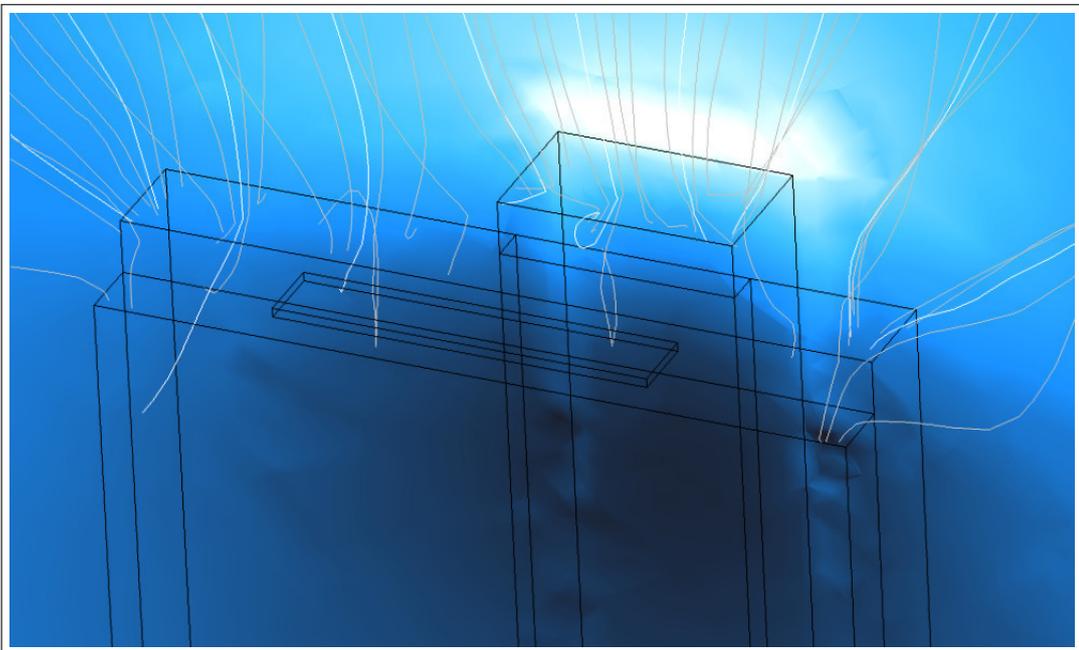
danos a estrutura e a seus ocupantes.

Figura 39 – Descargas atmosféricas sobre instalação residencial sem SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 40 – Detalhe descargas atmosféricas sobre instalação residencial sem SPDA

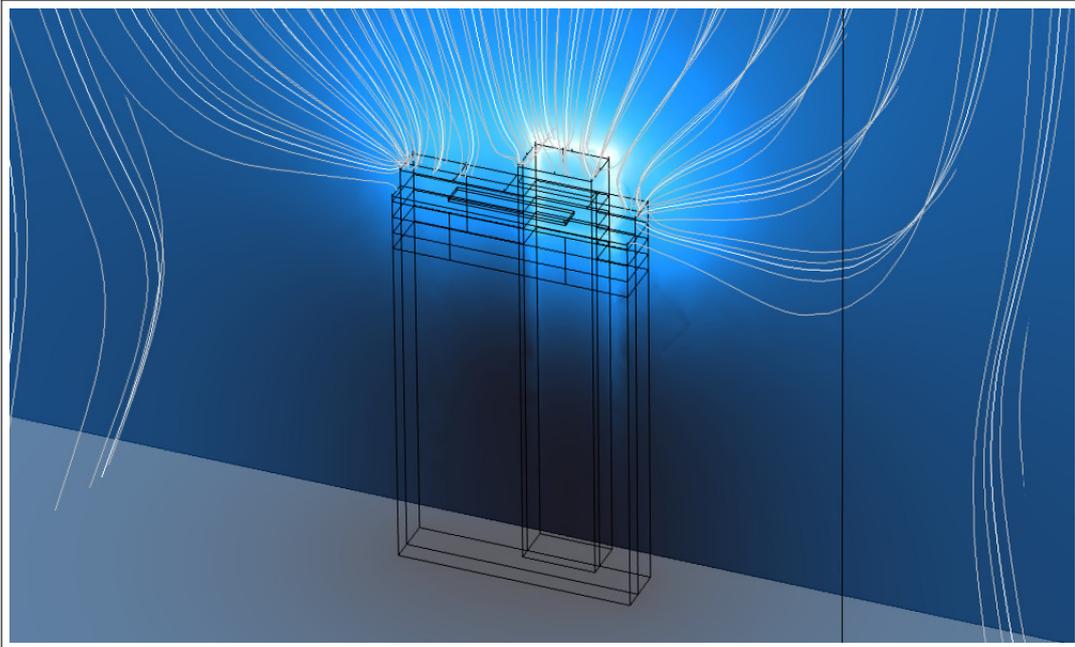


Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Na Figura 41, e Figura 42 é possível observar o comportamento das descargas atmosféricas sobre a edificação protegida. A primeira constatação a ser feita ao comparar a Figura 41 e a Figura 39 é a distinta variação do campo elétrico, comportamento esse também

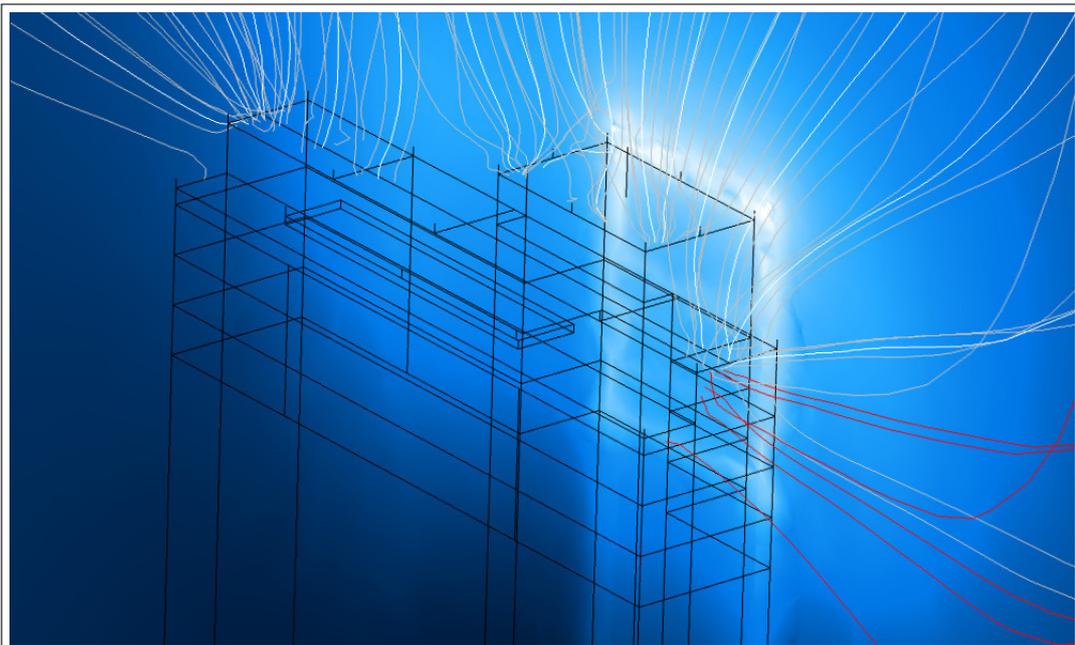
observado na construção dos modelos bidimensionais. Outro ponto de comparação é a quantidade de descargas que atingem a estrutura. Em quanto no modelo desprotegido todas as descargas atingem a estrutura, o que representaria um potencial dano a mesma e a seus ocupantes, no modelo que apresenta a devida proteção, as descargas fluem naturalmente para os pontos de menor potencial (captadores e malhas do subsistema de captação), como desejado.

Figura 41 – Descargas atmosféricas sobre instalação residencial com SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 42 – Detalhe descargas atmosféricas sobre instalação residencial com SPDA



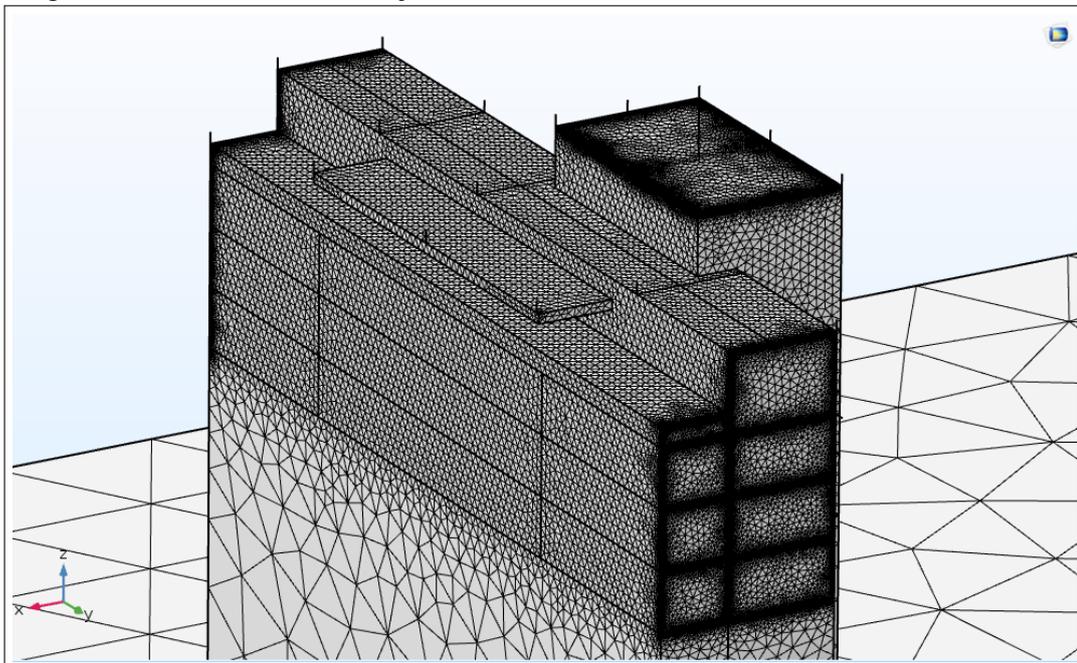
Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Apesar de todo o projeto de proteção ter sido realizado de acordo com (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015a), (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015b) e (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015c), ainda houve a incidência de descargas sobre a estrutura, como se pode observar na Figura 42 (descargas em vermelho). Investigou-se então a causa de tal fenômeno, sendo uma das premissas a serem consideradas a má qualidade da malha construída dos elementos finitos.

Segundo Muthukrishnan *et al.* (2000) conforme citado por Gil (2015), o refinamento de áreas específicas de superfícies complexas com maior importância que apresentam curvas, intersecções e descontinuidades deve ser realizado para obtenção de resultados mais fidedignos.

Refinou-se então a malha nas regiões de interesse, que estão próximas ao subsistema de captação de descargas atmosféricas, conforme pode ser observado na Figura 43. Para isso, utilizou-se a opção *User-controlled mesh* disponível no software, onde elementos unidimensionais foram utilizados para construção de elementos ainda mais precisos e de menor tamanho. Com o maior número de elementos finitos compondo cada seção, é esperado uma maior fidelidade dos resultados obtidos por meio das simulações.

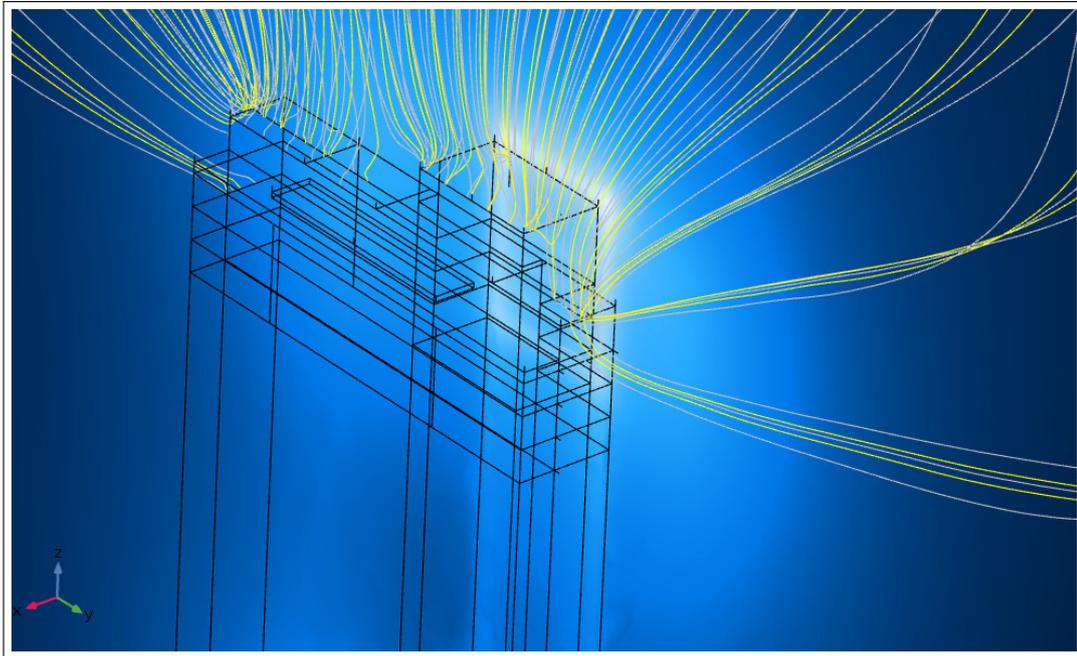
Figura 43 – Malha da instalação residencial com SPDA refinada



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Realizada a reconstrução da malha e refeita a simulação, os resultados obtidos encontram-se muito mais próximos do esperado. Conforme a figura 44, as descargas que incidem sobre a estrutura protegida atingem somente o sistema de proteção, garantindo a segurança dos

Figura 44 – Detalhe descargas atmosféricas sobre instalação residencial com SPDA com malha refinada



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

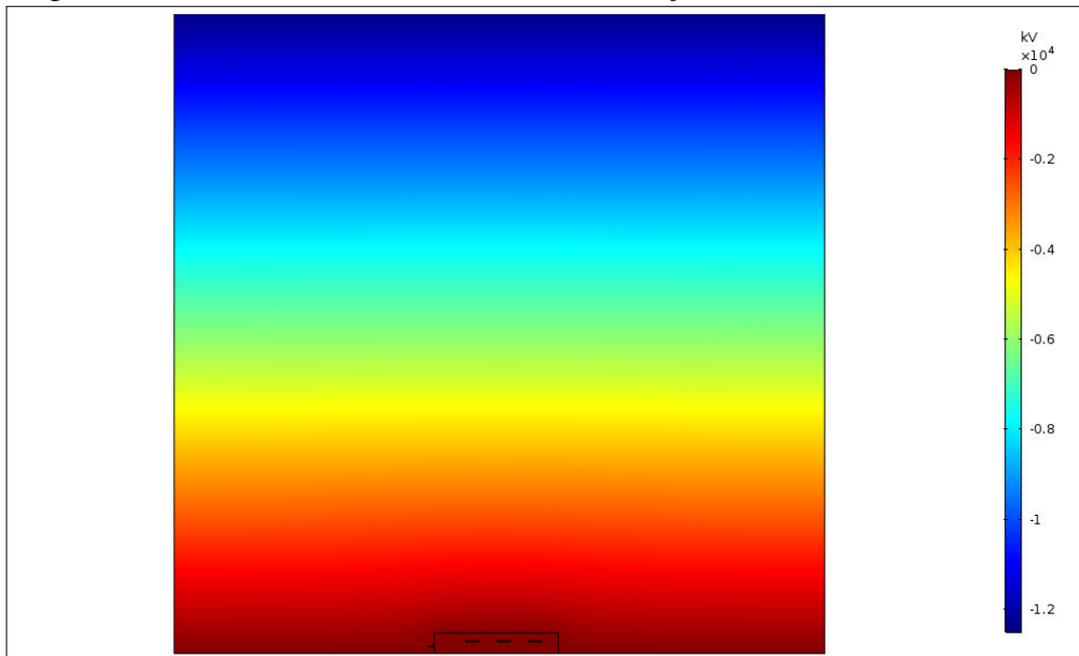
ocupantes e da edificação, constatando a eficácia do projeto realizado de acordo com o *EFD*.

Segundo Gil (2015), com o aumento do refinamento da malha obtém-se maior quantidade de dados para a realização da análise, resultando assim em uma convergência para a solução mais próxima da exata. Os resultados obtidos com o refinamento da malha realizado, passo esse demonstrado pelo símbolo de decisão no Fluxograma Figura 16, ressaltam a importância da existência de uma malha de qualidade nas simulações que utilizam o *EFD*.

4.2 Simulação em planta industrial

O projeto da edificação industrial foi reproduzido bidimensionalmente no software COMSOL. As simulações 2D apresentadas nesta seção serão correspondentes a fachada leste. Os resultados obtidos para as demais fachadas encontram-se no Apêndice C. A Figura 45 e Figura 46 apresentam os resultados obtidos com a simulação do potencial elétrico sobre a estrutura sem e com SPDA respectivamente.

Figura 45 – Potencial elétrico fachada leste instalação industrial sem SPDA

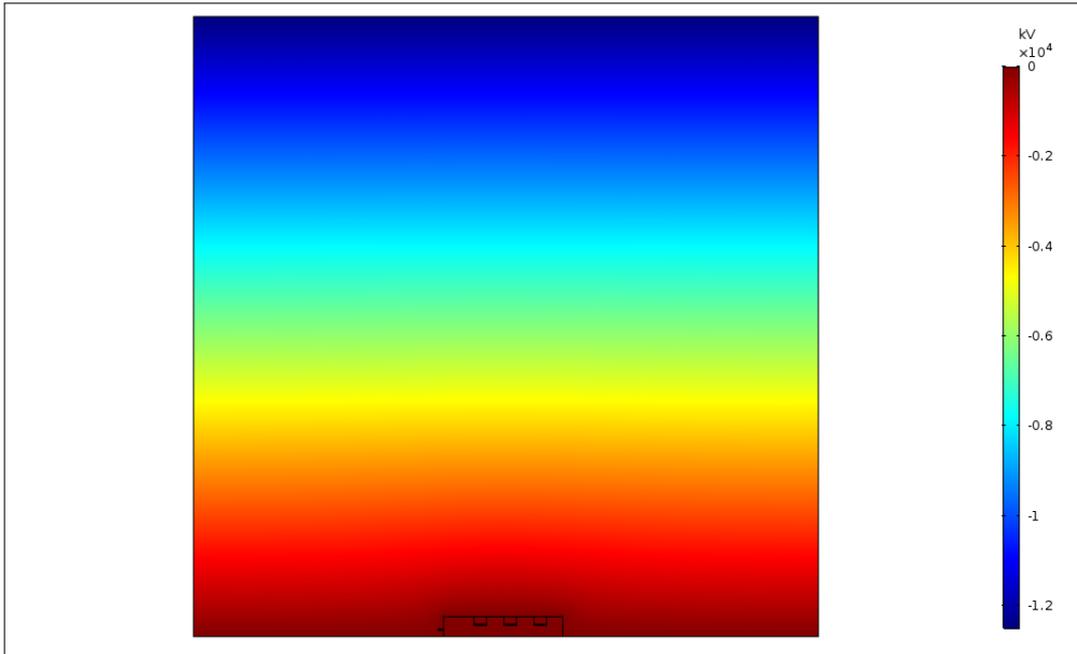


Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Ao comparar a Figura 45 com a Figura 46, verifica-se que a presença do subsistema de captação não alterou consideravelmente o potencial de todo o sistema, diferente do que se pode observar ao realizar a comparação entre os resultados obtidos das simulações da edificação predial, Figura 28 e Figura 27. Isso se deve a diferença de altura entre as estruturas. Como a edificação residencial é mais alta e o seu subsistema de captação (com potencial definido em 0 V) se encontra em nível mais elevado do solo, o potencial de todo o sistema apresenta maiores variações do que da estrutura industrial.

Foi realizada a plotagem do campo elétrico para a edificação industrial também em ambos os casos (Figura 47 e Figura 48). Observa-se em ambas as figuras que a densidade de cargas elétricas nas regiões curvas e de pontas é bem maior do que nas regiões planas e de maior área, configurando regiões mais suscetíveis a incidência de descargas atmosféricas. No caso da Figura 48 referente a estrutura protegida, verifica-se um campo elétrico nulo na estrutura, por

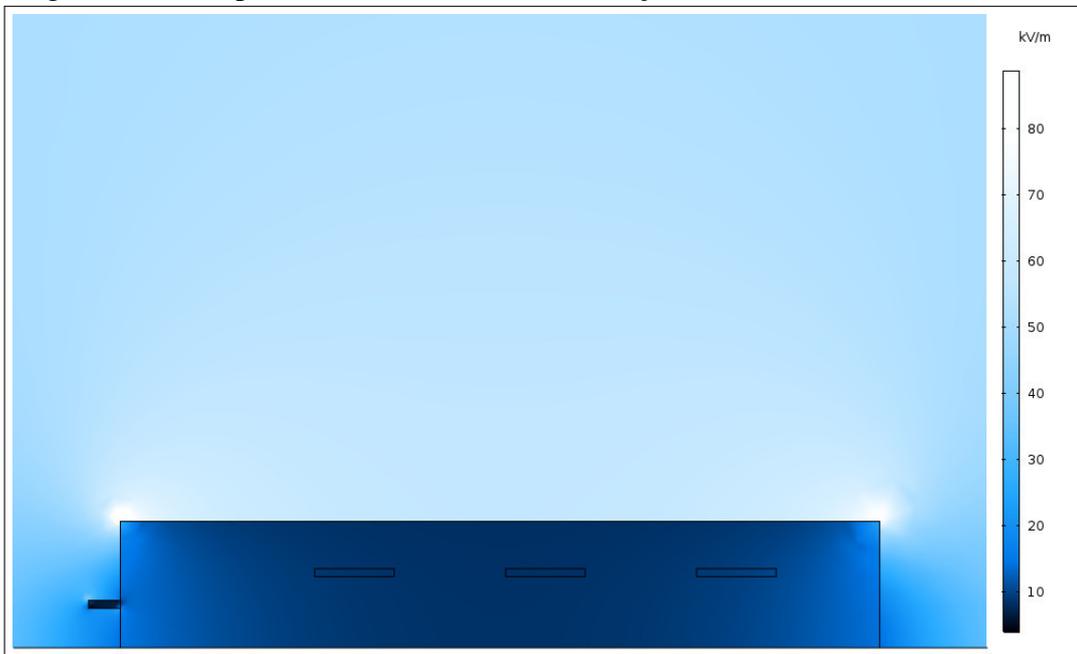
Figura 46 – Potencial elétrico fachada leste instalação industrial com SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

conta da presença do SPDA.

Figura 47 – Campo elétrico fachada leste instalação industrial sem SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Para atestar a eficiência do projeto de proteção realizado para a edificação industrial, simulou-se uma tempestade de raios sobre a estrutura sem e com SPDA. Na Figura 49 encontra-se o resultado obtido para estrutura desprotegida. Observa-se que as descargas atingem toda a estrutura, configurando um potencial risco de danos a seus componentes e ocupantes, enquanto

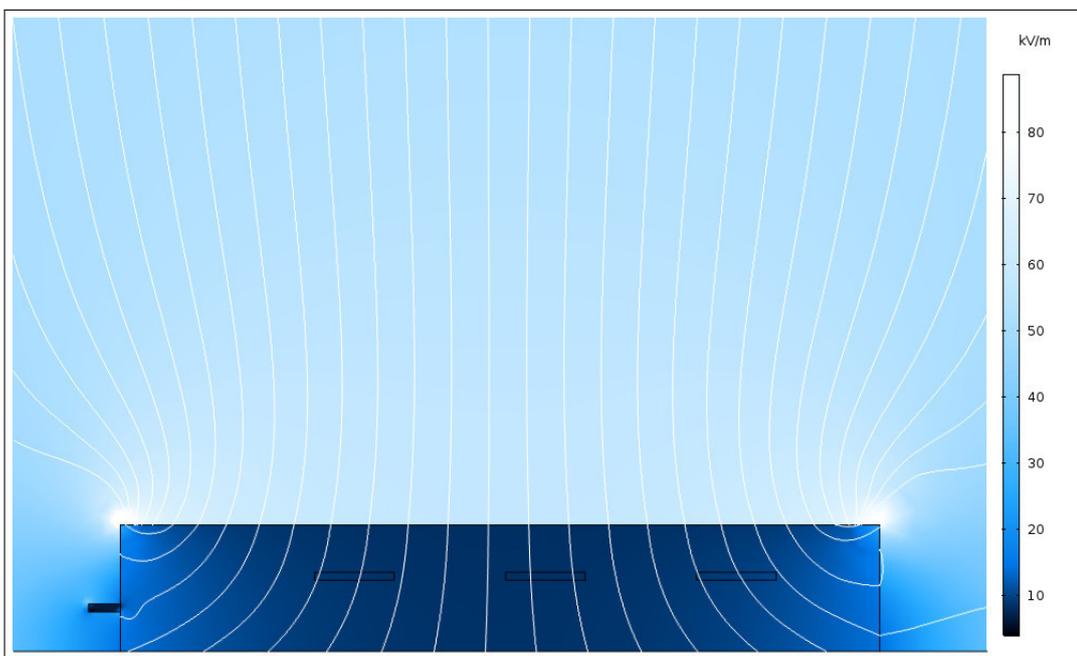
Figura 48 – Campo elétrico fachada leste instalação industrial com SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

que na Figura 50 que representa a estrutura protegida, as descargas atingem somente o subsistema de captação projetado, confirmando a eficiência do projeto realizado e garantindo maior nível de segurança.

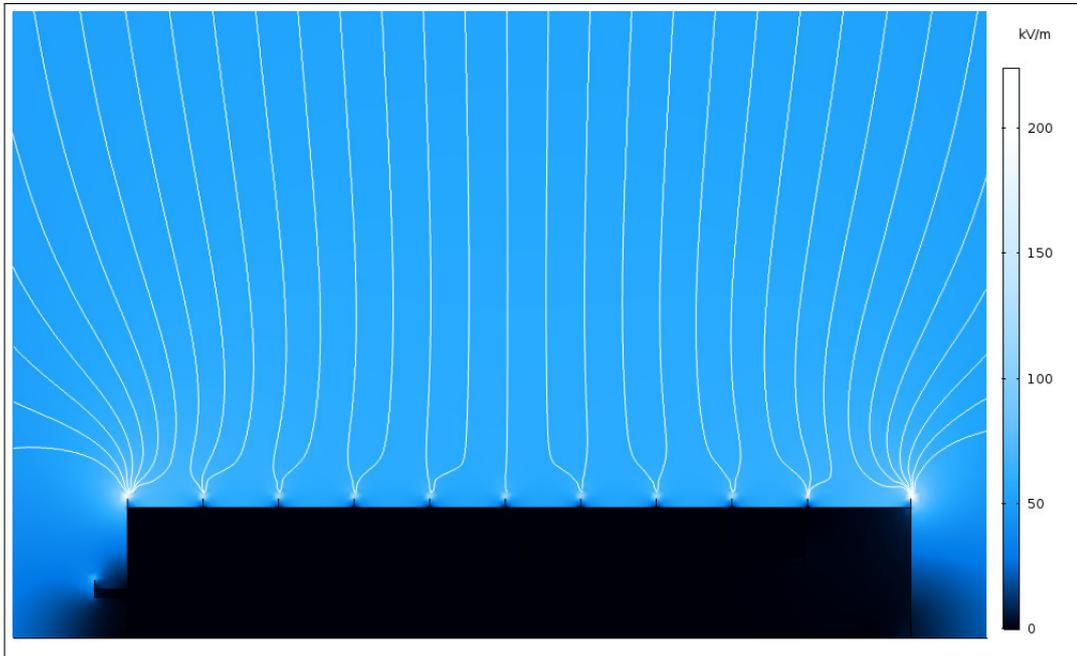
Figura 49 – Descarga atmosférica sobre fachada leste em instalação industrial sem SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Com o intuito de realizar a comparação entre *EFD* e *RSM*, lançou-se sobre a estrutura

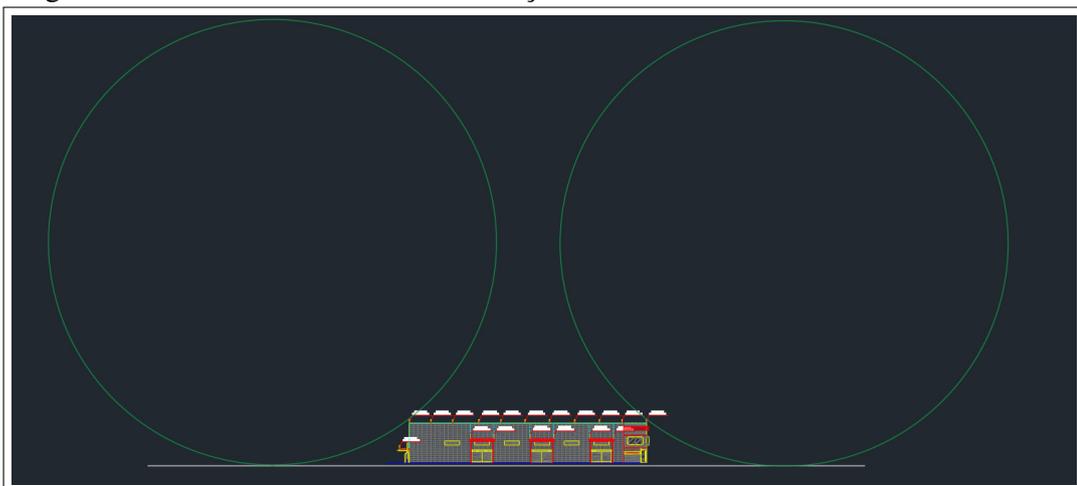
Figura 50 – Descarga atmosférica sobre fachada leste em instalação industrial com SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

analisada esferas rolantes de raio igual à 45 metros de acordo com a classe de proteção III adotada para a edificação, conforme estabelecido em (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015c), Tabela 2. Como pode ser observado na Figura 51 e na Figura 52, a estrutura também encontra-se protegida de acordo com o *RSM*, pois as esferas rolantes não tocam nenhum ponto da edificação, somente no sistema de proteção da mesma.

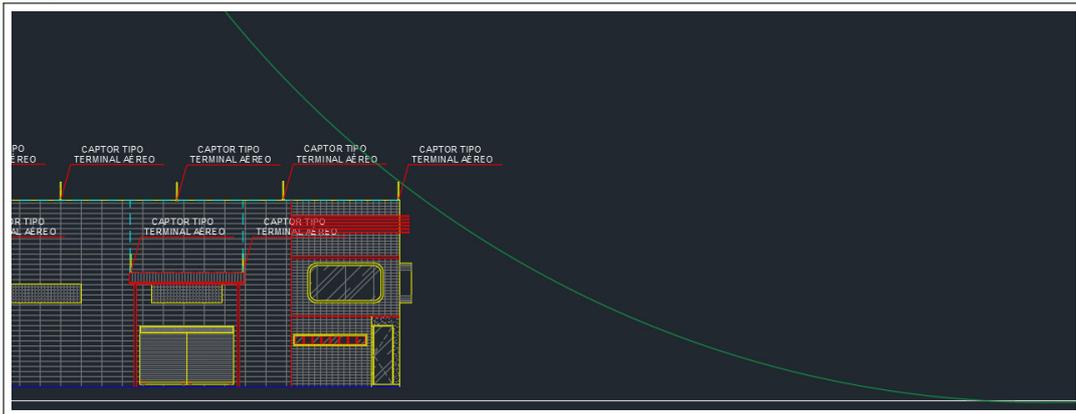
Figura 51 – Esfera rolante sobre edificação industrial com SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

O resultado obtido com o *RSM*, no caso do SPDA projetado para a edificação industrial está de acordo com o obtido via simulação pelo *EFD*.

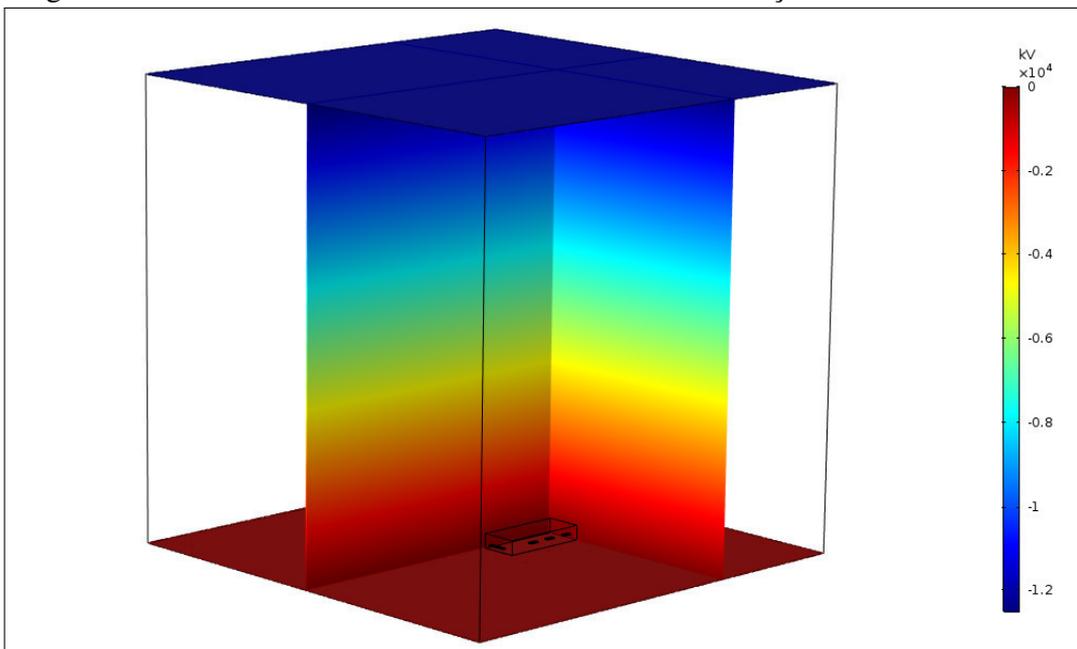
Figura 52 – Detalhe esfera rolante sobre edificação industrial com SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

O projeto da edificação industrial também foi realizado utilizando a geometria tridimensional no software COMSOL. Na simulação referente ao potencial elétrico, optou-se para melhor visualização de resultados a plotagem de 4 campos, tal qual utilizado na simulação da edificação residencial, sendo dois planos localizados no eixo z posicionados na parte inferior e superior do sistema, um plano no eixo y e um plano no eixo x, posicionados de forma a se obter uma visualização adequada da estrutura e do sistema. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 53, que representa o potencial elétrico para instalação industrial sem SPDA e Figura 54, com o potencial elétrico para instalação industrial com SPDA.

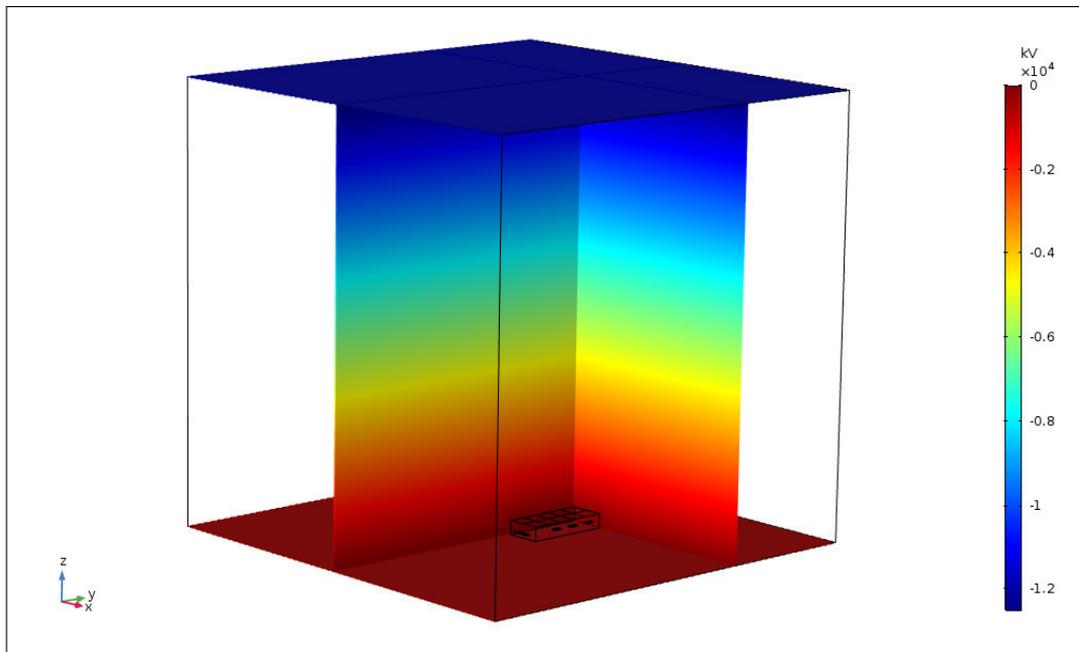
Figura 53 – Potencial elétrico modelo tridimensional instalação industrial sem SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Conforme observado anteriormente nos resultados da simulação bidimensional,

Figura 54 – Potencial elétrico modelo tridimensional instalação industrial com SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

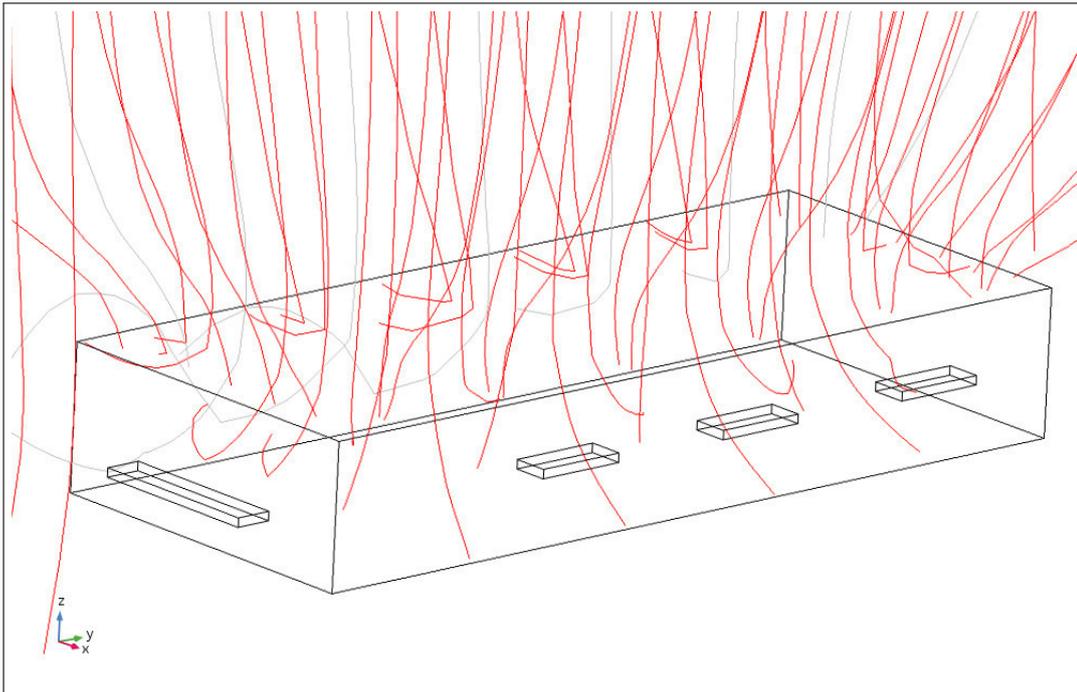
no caso da planta industrial, a presença do sistema de proteção contra descargas não afetou significativamente a variação do potencial elétrico no sistema, devido a altura não tão elevada da estrutura se comparada com as dimensões do sistema.

Plotou-se a direção natural do curso das descargas atmosféricas sobre ambas as estruturas para atestar a eficiência do projeto realizado de acordo com o *EFD*. Os resultados podem ser observados na Figura 55 e Figura 56.

Como se pode observar comparando ambas, constata-se que na estrutura desprotegida, a incidência de descargas ocorre ao longo de toda sua extensão, enquanto que na estrutura protegida, somente no subsistema de captação projetado para receber tais descargas e manter a estrutura e seus ocupantes em segurança, atestando, de acordo com o *EFD*, a eficácia do projeto de proteção contra descargas atmosféricas da instalação industrial.

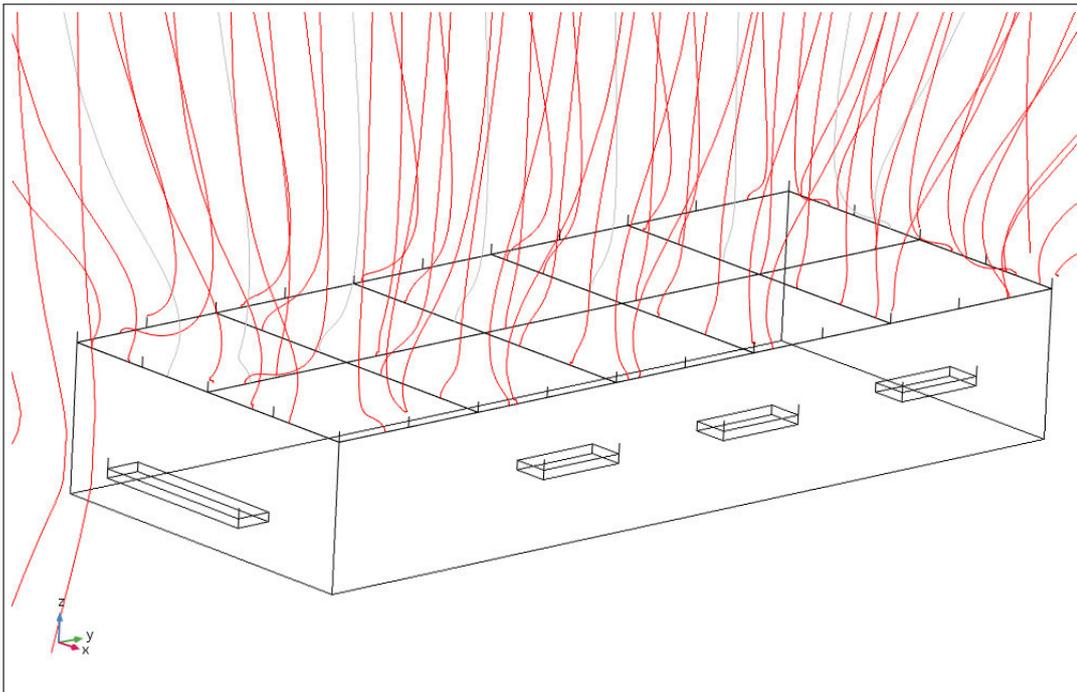
Ao longo desta seção, foram apresentados os resultados das simulações realizadas de acordo com o Fluxograma apresentado na Figura 16 para visualização do potencial elétrico, campo elétrico e a direção natural do curso das descargas atmosféricas segundo *EFD*, em uma planta residencial e em uma planta industrial, com e sem SPDA. O sistema de proteção de ambas as plantas foi projetado seguindo as diretrizes estabelecidas em ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015a), ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015b) e ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015c), maiores detalhes

Figura 55 – Descargas atmosféricas sobre instalação industrial sem SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

Figura 56 – Descargas atmosféricas sobre instalação industrial com SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019).

referentes a seu projeto podem ser encontrados no Capítulo 3. O objetivo das simulações realizadas utilizando o *FEM* foi apresentar o *EFD* como um método eficaz para descrever o comportamento de descargas atmosféricas e como uma alternativa aos métodos de determinação de zonas de proteção como o *RSM* e o método das malhas. Para isso realizou-se uma comparação

direta entre o *EFD*, o *RSM* e o método das malhas para as estruturas que tiveram seu projeto de SPDA realizado em duas dimensões, como pode ser observado nas Figuras 34, 35, 36, 51, 52 e 50. Observou-se que, no caso da instalação predial, a aplicação do *RSM*, apesar de indicar a proteção da estrutura, não garantiu a segurança da edificação segundo o *EFD*, enquanto que o método das malhas provou-se ser eficaz.

Observando os resultados obtidos com *EFD* apresentados ao longo deste capítulo, constata-se que a implementação do método através do uso de *FEM* entrega visualizações de grande interesse, pois ilustram o comportamento que descargas atmosféricas poderiam apresentar dado os parâmetros físicos estabelecidos.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A implementação do *EFD* no software utilizado foi de baixa complexidade, colocando o modelo do Desvio do Campo Elétrico como uma opção alternativa para simulação do comportamento de descargas atmosféricas e comprovação da eficácia dos métodos de determinação de zonas de proteção propiciadas por um SPDA projetado de acordo com a ABNT NBR 5419. A utilização do *EFD* para tal fim é de grande interesse, pois entrega resultados visuais que ilustram o comportamento de descargas atmosféricas e como as mesmas interagem com as estruturas estudadas, dado os parâmetros físicos estabelecidos.

Com a realização desse trabalho, foi possível produzir um tutorial completo de como implementar o *EFD* no software de simulação escolhido, o COMSOL, com todas as etapas documentadas no fluxograma da Figura 16 e com os passos detalhados na Subseção 3.3.

Durante as simulações realizadas, o único empecilho encontrado não fora com a implementação do método do Desvio do Campo Elétrico, mas sim com uma particularidade relacionada a utilização do *FEM*, a criação da malha que é composta pelos nós e pelos elementos finitos. Conforme explicitado na Seção 4.1, foi preciso realizar o refinamento da mesma para que o comportamento dos raios estivessem mais próximos da realidade. Realizado o refinamento, as simulações apresentaram melhor qualidade.

Ao observar os resultados obtidos, onde aplicou-se o *EFD* para simular a trajetória de descargas atmosféricas e como elas se comportavam em estruturas com e sem um SPDA, verifica-se a importância da existência de tais sistemas de proteção. Nos casos em que as estruturas estavam desprotegidas, a incidência de relâmpagos sobre as mesmas aconteceu de forma indiscriminatória, o que configuraria, em uma situação real, perigo para as vidas e bens materiais abrigados no interior e ao redor da estrutura.

O método das malhas, utilizado para determinação de zonas de proteção propiciadas por um SPDA, mostrou-se eficaz de acordo com o modelo *EFD* que descreve a trajetória de descargas atmosféricas em ambos os projetos realizados, para estrutura residencial e a industrial. Entretanto, o *RSM* não apresentou os mesmos resultados no projeto da edificação residencial, como se pode observar na Figura 36. Apesar do método das esferas rolantes descrito pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015c) diminuir a probabilidade de incidência de descargas atmosféricas diretamente sobre a estrutura, é possível visualizar a incidência de descargas atmosféricas diretamente sobre a edificação em uma zona considerada segura pelo método.

Verificou-se com as simulações que a presença de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas causa variações no potencial e no campo elétrico ao redor do sistema e da estrutura que o comporta.

Este trabalho motiva o desenvolvimento da aplicação do *EFD* em outros estudos de caso. Por ser um método que apresenta baixa complexidade de implementação e torna possível a visualização do comportamento de descargas atmosféricas no meio em que estão presentes, modelos mais complexos abrangendo mais estruturas e outros elementos podem ser facilmente elaborados. Este trabalho também motiva o aprofundamento no estudo do *EFD* e sua comparação com os demais métodos empregados na determinação de zonas de proteção propiciadas por um SPDA, dado os resultados apresentados ao longo desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- ASSAN, A. **Método dos elementos finitos: Primeiros passos**. [S.l.]: Editora da Unicamp, 2003. v. 2.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-1. Proteção contra descargas atmosféricas**: Parte 1: Princípios gerais. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-2. Proteção contra descargas atmosféricas**: Parte 3: Gerenciamento de risco. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419-3. Proteção contra descargas atmosféricas**: Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigo à vida. Rio de Janeiro, 2015.
- BASTOS, J.; SADOWSKI, N. **Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods**. [S.l.]: Marcel Dekker, 2003.
- BREBBIA, C.; FERRANTE, A. **The Finite Element Technique; an introduction for engineers**. [S.l.]: Editora da URGs, 1975.
- COMSOL. **Linha de produtos COMSOL**. 2019. Disponível em: <<https://br.comsol.com/products>>. Acesso em: 05 out. 2019.
- ELAT. **Vítimas de raios - Infográfico**. 2019. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/noticias/vitimas.de.raios.-.infografico.php>>. Acesso em: 03 nov. 2019.
- FLORES, A. **Cálculo Variacional: aspectos teóricos e aplicações**. Dissertação (Dissertação Mestrado Profissional em Matemática) — Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Fortaleza, 2011.
- GARCIA, F. **Análise dos potenciais elétricos e avaliação dos riscos relacionados às tensões de toque e de passo devidos à incidência de uma descarga atmosférica em uma edificação**. Dissertação (Trabalho Final de Curso) — Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- GIL, F. **ANÁLISE DA QUALIDADE DE MALHA DE ELEMENTOS FINITOS E VALIDAÇÃO DE SITUAÇÃO DE CASO REAL DE VIGA BIAPOIADA**. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) — Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica do Paraná, 2015.
- HAYT, W.; BUCK, J. **Eletromagnetismo**. [S.l.]: LTC Editora, 2003. v. 6.
- MAXWELL, J. C. A dynamical theory of the electromagnetic field. **Phil. Trans. R. Soc. Lond.**, v. 155, p. 459, 1865.
- MCGRAW, D. The measurement of the dielectric constant of three different shapes of concrete blocks. **IJRRAS**, 2015.
- MUTHUKRISHNAN, S.; NAMBIAR, R.; LAWRENCE, K. Refinement of 3d meshes at surface intersections. **Computer Aided Design**, 2000.
- OGUNSOLA, A.; REGGIANI, U.; SANDROLINI, L. Shielding effectiveness of concrete buildings. In: . [S.l.: s.n.], 2005. p. 65 – 68. ISBN 0-7803-9374-0.

OLIVEIRA, D.; FERREIRA, G.; PONTES, R. Método dos elementos finitos como ferramenta didática para o ensino de eletrostática e magnetoestática. COBENGE, 2010.

PEREIRA, L. **PPGEE - Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Eletromagnetismo**. 2012. Disponível em: <http://www.ece.ufrgs.br/~lapereira/fem2000/FEM2D_Eletromagnetismo.pdf>. Acesso em: 07 out. 2019.

POLYANIN, A. **HANDBOOK OF LINEAR PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS for ENGINEERS and SCIENTISTS**. [S.l.]: Chapman and Hall/CRC, 2002.

POTIER, G.; GAZZANA, D.; DIAS, G.; SILVA, L.; TELLÓ, M. **Física dos raios e engenharia de proteção**. [S.l.]: EDIPUCRS - Editora Universitária da PUCRS, 2010. v. 2.

RAKOV, V.; UMAN, M. **Lightning: physics and effects**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1993.

REDDY, J. **An Introduction to the Finite Element Method**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2006. v. 3.

RODRIGUES, E. Analysis of the incidence of direct lightning over a hvdc transmission line through efd model. Energies, 2019.

ROMERO, F. **Avaliação do comportamento dos campos eletromagnéticos gerados por descargas atmosféricas nuvem-terra**. Dissertação (Dissertação Mestrado) — Curso de Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SHADIKU, M. **Elementos do eletromagnetismo**. [S.l.]: Bookman, 2012. v. 5.

SUETA, H. **Uso de componentes naturais de edificações como parte integrante do sistema de proteção contra descarga atmosférica - Uma visão relativa aos danos físicos**. Tese (Doutorado em Engenharia) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

VISACRO, S. **Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem De Engenharia**. [S.l.]: Artliber, 2005.

WARD, A. **Dielectric materials for advanced applications**. [S.l.: s.n.], 2016.

ZIENKIEWICZ, O.; TAYLOR, R.; ZHU, J. **The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals**. [S.l.]: Editora da UFGS, 2005. v. 6.

APÊNDICE A – MEMORIAL CÁLCULO DO RISCO

Esse apêndice apresenta o memorial de cálculo utilizado para realização do cálculo do risco segundo a ABNT NBR 5419 das edificações apresentadas nesse estudo de caso. Ele será dividido em duas seções, uma para a edificação residencial e outra para a edificação industrial. Ambas as seções serão divididas em duas subseções, com os cálculos realizados considerando os riscos aos quais as estruturas estão expostas sem um sistema de proteção contra descargas atmosféricas e com um SPDA instalado.

A.1 Cálculo do risco edificação residencial

A.1.1 Edificação predial sem SPDA

O risco considerado para realização do gerenciamento de riscos para essa edificação foi o R_1 , definido como "Risco de perdas ou danos permanentes em vidas humanas" (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015b). Abaixo encontram-se as variáveis e suas respectivas definições e valores de acordo com as premissas adotadas.

Definição da equação que determina o valor de R_1 de acordo com a Seção 4.3 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015b):

$$R_1 = R_A + R_B + R_U + R_V = 4,89 \times 10^{-6} \quad (\text{A.1})$$

Componentes da equação que determina o valor de R_1 , definidas na Seção 6 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015b): Componente relacionado a ferimentos a seres vivos por choque elétrico:

$$R_A = N_D \times P_A \times L_A = 4,79 \times 10^{-6} \quad (\text{A.2})$$

Componente relacionado a danos físico:

$$R_B = N_D \times P_B \times L_B = 9,57 \times 10^{-8} \quad (\text{A.3})$$

Componente relacionado a ferimentos a seres vivos por choque elétrico:

$$R_U = (N_L + N_{DJ}) \times P_U \times L_U = 0 \quad (\text{A.4})$$

Componente relacionado a danos físicos:

$$R_V = (N_L + N_{DJ}) \times P_V \times L_V = 3,6 \times 10^{-12} \quad (\text{A.5})$$

Número médio anual de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas à estrutura:

$$N_D = N_G \times A_D \times C_D \times 10^{-6} = 4,78 \times 10^{-2} \quad (\text{A.6})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica na estrutura causar ferimentos a seres vivos por choque elétrico:

$$P_A = P_{TA} \times P_B = 1 \quad (\text{A.7})$$

Perda devido a ferimentos em seres vivos por choque elétrico:

$$L_A = r_t \times L_t \times \frac{n_z}{n_t} \times \frac{t_z}{8760} = 10^{-4} \quad (\text{A.8})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica na estrutura causar danos físicos:

$$P_B = 1 \quad (\text{A.9})$$

Perda devido a danos físicos:

$$L_B = r_p \times r_f \times h_z \times L_F \times \frac{n_z}{n_t} \times \frac{t_z}{8760} = 2 \times 10^{-6} \quad (\text{A.10})$$

Número médio anual de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas em uma linha conectada a estrutura:

$$N_L = N_G \times A_L \times C_I \times C_E \times C_T \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-4} \quad (\text{A.11})$$

Número médio anual de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas a uma estrutura adjacente:

$$N_{DJ} = 0 \quad (\text{A.12})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha causar ferimentos a seres vivos por choque:

$$P_U = P_{TU} \times P_{EB} \times P_{LD} \times C_{LD} = 0 \quad (\text{A.13})$$

Perda devido a ferimentos de seres vivos por choque elétrico:

$$L_U = L_A = 10^{-4} \quad (\text{A.14})$$

Probabilidade de descarga atmosférica em linha causar danos físicos:

$$P_V = P_{EB} \times P_{LD} \times C_{LD} = 9 \times 10^{-3} \quad (\text{A.15})$$

Perda devido a danos físicos:

$$L_V = L_B = 2 \times 10^{-6} \quad (\text{A.16})$$

Índice de descargas atmosféricas:

$$N_G = 0,5 \quad (\text{A.17})$$

Área de exposição da estrutura:

$$A_D = L \times W + 2 \times (3 \times H) \times (L + W) + \pi \times (3 \times H)^2 = 191596,24 \quad (\text{A.18})$$

Fator de localização da estrutura:

$$C_D = 0,5 \quad (\text{A.19})$$

Largura da estrutura:

$$L = 13,5 \quad (\text{A.20})$$

Comprimento da estrutura:

$$W = 41 \quad (\text{A.21})$$

Altura da estrutura:

$$H = 76,62 \quad (\text{A.22})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar choque a seres vivos devido a tensões de passo perigosas:

$$P_{TA} = 1 \quad (\text{A.23})$$

Fator de redução da perda de vida humana dependendo do tipo do solo ou piso:

$$r_t = 10^{-2} \quad (\text{A.24})$$

Número relativo médio típico de vítimas feridas por choque elétrico (D1) devido a um evento perigoso:

$$L_T = 10^{-2} \quad (\text{A.25})$$

Número de pessoas na zona:

$$n_z = 352 \quad (\text{A.26})$$

Número total de pessoas na zona:

$$n_t = 352 \quad (\text{A.27})$$

Tempo, durante o qual as pessoas estão presentes na zona, expresso em horas por ano:

$$t_z = 8760 \quad (\text{A.28})$$

Fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo das providências tomadas para reduzir as consequências do incêndio:

$$r_p = 0,2 \quad (\text{A.29})$$

Fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo do risco de incêndio ou do risco de explosão da estrutura :

$$r_f = 10^{-3} \quad (\text{A.30})$$

Fator de aumento da perda devido a danos físicos quando um perigo especial estiver presente :

$$h_z = 1 \quad (\text{A.31})$$

Número relativo médio típico de vítimas por danos físicos devido a um evento perigoso:

$$L_F = 0,01 \quad (\text{A.32})$$

Área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem a linha, expressa em metro quadrado:

$$A_L = 40 \times L_L = 40000 \quad (\text{A.33})$$

Fator de instalação da linha:

$$C_I = 1 \quad (\text{A.34})$$

Fator ambiental:

$$C_E = 0,01 \quad (\text{A.35})$$

Fator do tipo de linha:

$$C_T = 1 \quad (\text{A.36})$$

Comprimento da seção da linha em metros:

$$L_L = 1000 \quad (\text{A.37})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha adentre a estrutura e cause choque a seres vivos devido à tensões de toque perigosas:

$$P_{TU} = 0 \quad (\text{A.38})$$

Probabilidade dependente das ligações equipotencias para descargas atmosféricas:

$$P_{EB} = 0,01 \quad (\text{A.39})$$

Probabilidade de falha de sistemas internos devido a uma descarga atmosférica na linha conectada dependendo das características da linha:

$$P_{LD} = 0,9 \quad (\text{A.40})$$

Fator dependente da blindade, do aterramento e das condições da isolação da linha:

$$C_{LD} = 1 \quad (\text{A.41})$$

A.1.2 Edificação residencial com SPDA

$$R_1 = R_A + R_B + R_U + R_U = 1,92 \times 10^{-8} \quad (\text{A.42})$$

Componentes da equação que determina o valor de R_1 , definidas na Seção 6 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015b): Componente relacionado a ferimentos a seres vivos por choque elétrico:

$$R_A = N_D \times P_A \times L_A = 0 \quad (\text{A.43})$$

Componente relacionado a danos físico:

$$R_B = N_D \times P_B \times L_B = 1,91 \times 10^{-8} \quad (\text{A.44})$$

Componente relacionado a ferimentos a seres vivos por choque elétrico:

$$R_U = (N_L + N_{DJ}) \times P_U \times L_U = 0 \quad (\text{A.45})$$

Componente relacionado a danos físicos:

$$R_V = (N_L + N_{DJ}) \times P_V \times L_V = 3,6 \times 10^{-12} \quad (\text{A.46})$$

Número médio anual de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas à estrutura:

$$N_D = N_G \times A_D \times C_D \times 10^{-6} = 4,78 \times 10^{-2} \quad (\text{A.47})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica na estrutura causar ferimentos a seres vivos por choque elétrico:

$$P_A = P_{TA} \times P_B = 0 \quad (\text{A.48})$$

Perda devido a ferimentos em seres vivos por choque elétrico:

$$L_A = r_t \times L_t \times \frac{n_z}{n_t} \times \frac{t_z}{8760} = 10^{-4} \quad (\text{A.49})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica na estrutura causar danos físicos:

$$P_B = 0,2 \quad (\text{A.50})$$

Perda devido a danos físicos:

$$L_B = r_p \times r_f \times h_z \times L_F \times \frac{n_z}{n_t} \times \frac{t_z}{8760} = 2 \times 10^{-6} \quad (\text{A.51})$$

Número médio anual de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas em uma linha conectada a estrutura:

$$N_L = N_G \times A_L \times C_I \times C_E \times C_T \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-4} \quad (\text{A.52})$$

Número médio anual de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas a uma estrutura adjacente:

$$N_{DJ} = 0 \quad (\text{A.53})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha causar ferimentos a seres vivos por choque:

$$P_U = P_{TU} \times P_{EB} \times P_{LD} \times C_{LD} = 0 \quad (\text{A.54})$$

Perda devido a ferimentos de seres vivos por choque elétrico:

$$L_U = L_A = 10^{-4} \quad (\text{A.55})$$

Probabilidade de descarga atmosférica em linha causar danos físicos:

$$P_V = P_{EB} \times P_{LD} \times C_{LD} = 9 \times 10^{-3} \quad (\text{A.56})$$

Perda devido a danos físicos:

$$L_V = L_B = 2 \times 10^{-6} \quad (\text{A.57})$$

Índice de descargas atmosféricas:

$$N_G = 0,5 \quad (\text{A.58})$$

Área de exposição da estrutura:

$$A_D = L \times W + 2 \times (3 \times H) \times (L + W) + \pi \times (3 \times H)^2 = 191596,24 \quad (\text{A.59})$$

Fator de localização da estrutura:

$$C_D = 0,5 \quad (\text{A.60})$$

Largura da estrutura:

$$L = 13,5 \quad (\text{A.61})$$

Comprimento da estrutura:

$$W = 41 \quad (\text{A.62})$$

Altura da estrutura:

$$H = 76,62 \quad (\text{A.63})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar choque a seres vivos devido a tensões de passo perigosas:

$$P_{TA} = 0 \quad (\text{A.64})$$

Fator de redução da perda de vida humana dependendo do tipo do solo ou piso:

$$r_t = 10^{-2} \quad (\text{A.65})$$

Número relativo médio típico de vítimas feridas por choque elétrico (D1) devido a um evento perigoso:

$$L_T = 10^{-2} \quad (\text{A.66})$$

Número de pessoas na zona:

$$n_z = 352 \quad (\text{A.67})$$

Número total de pessoas na zona:

$$n_t = 352 \quad (\text{A.68})$$

Tempo, durante o qual as pessoas estão presentes na zona, expresso em horas por ano:

$$t_z = 8760 \quad (\text{A.69})$$

Fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo das providências tomadas para reduzir as consequências do incêndio:

$$r_p = 0,2 \quad (\text{A.70})$$

Fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo do risco de incêndio ou do risco de explosão da estrutura :

$$r_f = 10^{-3} \quad (\text{A.71})$$

Fator de aumento da perda devido a danos físicos quando um perigo especial estiver presente :

$$h_z = 1 \quad (\text{A.72})$$

Número relativo médio típico de vítimas por danos físicos devido a um evento perigoso:

$$L_F = 0,01 \quad (\text{A.73})$$

Área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem a linha, expressa em metro quadrado:

$$A_L = 40 \times L_L = 40000 \quad (\text{A.74})$$

Fator de instalação da linha:

$$C_I = 1 \quad (\text{A.75})$$

Fator ambiental:

$$C_E = 0,01 \quad (\text{A.76})$$

Fator do tipo de linha:

$$C_T = 1 \quad (\text{A.77})$$

Comprimento da seção da linha em metros:

$$L_L = 1000 \quad (\text{A.78})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha adentre a estrutura e cause choque a seres vivos devido à tensões de toque perigosas:

$$P_{TU} = 0 \quad (\text{A.79})$$

Probabilidade dependente das ligações equipotencias para descargas atmosféricas:

$$P_{EB} = 0,01 \quad (\text{A.80})$$

Probabilidade de falha de sistemas internos devido a uma descarga atmosférica na linha conectada dependendo das características da linha:

$$P_{LD} = 0,9 \quad (\text{A.81})$$

Fator dependente da blindade, do aterramento e das condições da isolação da linha:

$$C_{LD} = 1 \quad (\text{A.82})$$

A.2 Cálculo do risco edificação industrial

A.2.1 Edificação industrial sem SPDA

Risco a ser avaliado:

$$R_1 = R_A + R_B + R_U + R_U + R_W + R_Z + R_M = 2,75 \times 10^{-5} \quad (\text{A.83})$$

Componentes da equação que determinam o valor de R_1 , definidas na Seção 6 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015b): Componente relacionado a ferimentos a seres vivos por choque elétrico:

$$R_A = N_D \times P_A \times L_A = 5,01 \times 10^{-8} \quad (\text{A.84})$$

Componente relacionado a danos físico:

$$R_B = N_D \times P_B \times L_B = 2 \times 10^{-5} \quad (\text{A.85})$$

Risco relacionado a danos físicos causados por centelhamentos perigosos:

$$R_C = N_D \times P_C \times L_C = 5,01 \times 10^{-7} \quad (\text{A.86})$$

Componente de risco para falha dos sistemas internos ocasionados por descarga atmosférica perto da estrutura

$$R_M = N_M \times P_M \times L_M = 1,42 \times 10^{-28} \quad (\text{A.87})$$

Componente relacionado a ferimentos a seres vivos por choque elétrico:

$$R_U = (N_L + N_{DJ}) \times P_U \times L_U = 0 \quad (\text{A.88})$$

Componente relacionado a danos físicos:

$$R_V = (N_L + N_{DJ}) \times P_V \times L_V = 2,4 \times 10^{-8} \quad (\text{A.89})$$

Componente de risco para falha dos sistemas internos por descarga atmosférica na linha conectada

$$R_W = (N_L + N_{DJ}) \times P_W \times L_W = 6 \times 10^{-8} \quad (\text{A.90})$$

Componente de risco para falha dos sistemas internos ocasionados por descarga atmosférica perto da linha

$$R_Z = N_I \times P_Z \times L_Z = 6,67 \times 10^{-6} \quad (\text{A.91})$$

Número médio anual de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas à estrutura:

$$N_D = N_G \times A_D \times C_D \times 10^{-6} = 1,5 \times 10^{-3} \quad (\text{A.92})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica na estrutura causar ferimentos a seres vivos por choque elétrico:

$$P_A = P_{TA} \times P_B = 1 \quad (\text{A.93})$$

Perda devido a ferimentos em seres vivos por choque elétrico:

$$L_A = r_t \times L_t \times \frac{n_z}{n_t} \times \frac{t_z}{8760} = 3,33 \times 10^{-5} \quad (\text{A.94})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica na estrutura causar danos físicos:

$$P_B = 1 \quad (\text{A.95})$$

Perda devido a danos físicos:

$$L_B = r_p \times r_f \times h_z \times L_F \times \frac{n_z}{n_t} \times \frac{t_z}{8760} = 1,33 \times 10^{-6} \quad (\text{A.96})$$

Número médio anual de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas em uma linha conectada a estrutura:

$$N_L = N_G \times A_L \times C_I \times C_E \times C_T \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-4} \quad (\text{A.97})$$

Número médio anual de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas a uma estrutura adjacente:

$$N_{DJ} = 0 \quad (\text{A.98})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha causar ferimentos a seres vivos por choque:

$$P_U = P_{TU} \times P_{EB} \times P_{LD} \times C_{LD} = 0 \quad (\text{A.99})$$

Perda devido a ferimentos de seres vivos por choque elétrico:

$$L_U = L_A = 3,33 \times 10^{-5} \quad (\text{A.100})$$

Probabilidade de descarga atmosférica em linha causar danos físicos:

$$P_V = P_{EB} \times P_{LD} \times C_{LD} = 9 \times 10^{-3} \quad (\text{A.101})$$

Perda devido a danos físicos:

$$L_V = L_B = 1,33 \times 10^{-2} \quad (\text{A.102})$$

Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas à estrutura):

$$P_C = P_{SPD} \times C_{LD} = 10^{-2} \quad (\text{A.103})$$

Perda relacionada à falha dos sistemas internos (descargas atmosféricas à estrutura):

$$L_C = L_O \times \frac{n_z}{n_z} \times \frac{t_z}{8760} = 3,33 \times 10^{-2} \quad (\text{A.104})$$

Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas perto de uma estrutura:

$$N_M = N_G \times A_M \times 10^{-6} = 4,27 \times 10^{-1} \quad (\text{A.105})$$

Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da linha conectada):

$$P_M = P_{SPD} \times P_{MS} = 10^{-26} \quad (\text{A.106})$$

Perda relacionada à falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da estrutura):

$$L_M = L_C = 3,33 \times 10^{-2} \quad (\text{A.107})$$

Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas na linha conectada):

$$P_W = P_{SPD} \times P_{LD} \times C_{LD} = 9 \times 10^{-3} \quad (\text{A.108})$$

Perda devido à falha de sistemas internos (descargas atmosféricas na linha):

$$L_W = L_C = 3,33 \times 10^{-2} \quad (\text{A.109})$$

Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas perto de uma linha:

$$N_I = N_G \times A_I \times C_I \times C_E \times C_T \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-2} \quad (\text{A.110})$$

Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da linha conectada):

$$P_Z = P_{SPD} \times P_{LI} \times C_{LI} = 10^{-2} \quad (\text{A.111})$$

Perda relacionada à falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da linha):

$$L_Z = L_C = 3,33 \times 10^{-2} \quad (\text{A.112})$$

Índice de descargas atmosféricas:

$$N_G = 0,5 \quad (\text{A.113})$$

Área de exposição da estrutura:

$$A_D = L \times W + 2 \times (3 \times H) \times (L + W) + \pi \times (3 \times H)^2 = 6013,16 \quad (\text{A.114})$$

Fator de localização da estrutura:

$$C_D = 0,5 \quad (\text{A.115})$$

Largura da estrutura:

$$L = 47,7 \quad (\text{A.116})$$

Comprimento da estrutura:

$$W = 20 \quad (\text{A.117})$$

Altura da estrutura:

$$H = 8 \quad (\text{A.118})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar choque a seres vivos devido a tensões de passo perigosas:

$$P_{TA} = 1 \quad (\text{A.119})$$

Fator de redução da perda de vida humana dependendo do tipo do solo ou piso:

$$r_t = 10^{-2} \quad (\text{A.120})$$

Número relativo médio típico de vítimas feridas por choque elétrico (D1) devido a um evento perigoso:

$$L_T = 10^{-2} \quad (\text{A.121})$$

Número de pessoas na zona:

$$n_z = 99 \quad (\text{A.122})$$

Número total de pessoas na zona:

$$n_t = 99 \quad (\text{A.123})$$

Tempo, durante o qual as pessoas estão presentes na zona, expresso em horas por ano:

$$t_z = 2920 \quad (\text{A.124})$$

Fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo das providências tomadas para reduzir as consequências do incêndio:

$$r_p = 0,2 \quad (\text{A.125})$$

Fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo do risco de incêndio ou do risco de explosão da estrutura :

$$r_f = 1 \quad (\text{A.126})$$

Fator de aumento da perda devido a danos físicos quando um perigo especial estiver presente :

$$h_z = 2 \quad (\text{A.127})$$

Número relativo médio típico de vítimas por danos físicos devido a um evento perigoso:

$$L_F = 0,1 \quad (\text{A.128})$$

Área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem a linha, expressa em metro quadrado:

$$A_L = 40 \times L_L = 40000 \quad (\text{A.129})$$

Fator de instalação da linha:

$$C_I = 1 \quad (\text{A.130})$$

Fator ambiental:

$$C_E = 0,01 \quad (\text{A.131})$$

Fator do tipo de linha:

$$C_T = 1 \quad (\text{A.132})$$

Comprimento da seção da linha em metros:

$$L_L = 1000 \quad (\text{A.133})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha adentre a estrutura e cause choque a seres vivos devido à tensões de toque perigosas:

$$P_{TU} = 0 \quad (\text{A.134})$$

Probabilidade dependente das ligações equipotencias para descargas atmosféricas:

$$P_{EB} = 0,01 \quad (\text{A.135})$$

Probabilidade de falha de sistemas internos devido a uma descarga atmosférica na linha conectada dependendo das características da linha:

$$P_{LD} = 0,9 \quad (\text{A.136})$$

Fator dependente da blindagem, do aterramento e das condições da isolação da linha:

$$C_{LD} = 1 \quad (\text{A.137})$$

Probabilidade de reduzir P_C, P_M, P_W e P_Z quando um sistema coordenado de DPS está instalado:

$$P_{SPD} = 10^{-2} \quad (\text{A.138})$$

Perda em uma estrutura devido à falha de sistemas internos

$$L_O = 0,1 \quad (\text{A.139})$$

Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas perto de uma estrutura:

$$A_M = 2 \times 500 \times (L + W) + \pi \times 500^2 = 8,53 \times 10^5 \quad (\text{A.140})$$

Probabilidade de reduzir P_M dependendo da blindagem, cabeamento e da tensão suportável do equipamento:

$$P_{MS} = (K_{S1} \times K_{S2} \times K_{S3} \times K_{S4})^2 = 10^{-24} \quad (\text{A.141})$$

Fator relevante à efetividade da blindagem por malha de uma estrutura:

$$K_{S1} = 10^{-4} \quad (\text{A.142})$$

Fator relevante à efetividade da blindagem por malha dos campos internos de uma estrutura:

$$K_{S2} = 10^{-4} \quad (\text{A.143})$$

Fator relevante às características do cabeamento interno:

$$K_{S3} = 10^{-4} \quad (\text{A.144})$$

Fator relevante à tensão suportável de impulso de um sistema:

$$K_{S4} = 1 \quad (\text{A.145})$$

Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas perto de uma linha:

$$A_I = 4000 \times L_I = 4 \times 10^6 \quad (\text{A.146})$$

Probabilidade de reduzir P_Z dependendo das características da linha e da tensão suportável do equipamento (descargas atmosféricas perto da linha conectada):

$$P_{LI} = 1 \quad (\text{A.147})$$

Fator dependente da blindagem, aterramento e condições de isolamento da linha para descargas atmosféricas perto da linha:

$$C_{LI} = 1 \quad (\text{A.148})$$

A.2.2 *Edificação industrial com SPDA*

Risco a ser avaliado:

$$R_1 = R_A + R_B + R_U + R_U + R_W + R_Z + R_M = 9,26 \times 10^{-6} \quad (\text{A.149})$$

Componentes da equação que determinam o valor de R_1 , definidas na Seção 6 da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2015b): Componente relacionado a ferimentos a seres vivos por choque elétrico:

$$R_A = N_D \times P_A \times L_A = 0 \quad (\text{A.150})$$

Componente relacionado a danos físico:

$$R_B = N_D \times P_B \times L_B = 2 \times 10^{-6} \quad (\text{A.151})$$

Risco relacionado a danos físicos causados por centelhamentos perigosos:

$$R_C = N_D \times P_C \times L_C = 5,01 \times 10^{-7} \quad (\text{A.152})$$

Componente de risco para falha dos sistemas internos ocasionados por descarga atmosférica perto da estrutura

$$R_M = N_M \times P_M \times L_M = 1,42 \times 10^{-28} \quad (\text{A.153})$$

Componente relacionado a ferimentos a seres vivos por choque elétrico:

$$R_U = (N_L + N_{DJ}) \times P_U \times L_U = 0 \quad (\text{A.154})$$

Componente relacionado a danos físicos:

$$R_V = (N_L + N_{DJ}) \times P_V \times L_V = 2,4 \times 10^{-8} \quad (\text{A.155})$$

Componente de risco para falha dos sistemas internos por descarga atmosférica na linha conectada

$$R_W = (N_L + N_{DJ}) \times P_W \times L_W = 6 \times 10^{-8} \quad (\text{A.156})$$

Componente de risco para falha dos sistemas internos ocasionados por descarga atmosférica perto da linha

$$R_Z = N_I \times P_Z \times L_Z = 6,67 \times 10^{-6} \quad (\text{A.157})$$

Número médio anual de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas à estrutura:

$$N_D = N_G \times A_D \times C_D \times 10^{-6} = 1,5 \times 10^{-3} \quad (\text{A.158})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica na estrutura causar ferimentos a seres vivos por choque elétrico:

$$P_A = P_{TA} \times P_B = 0 \quad (\text{A.159})$$

Perda devido a ferimentos em seres vivos por choque elétrico:

$$L_A = r_t \times L_t \times \frac{n_z}{n_t} \times \frac{t_z}{8760} = 3,33 \times 10^{-5} \quad (\text{A.160})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica na estrutura causar danos físicos:

$$P_B = 0,1 \quad (\text{A.161})$$

Perda devido a danos físicos:

$$L_B = r_p \times r_f \times h_z \times L_F \times \frac{n_z}{n_t} \times \frac{t_z}{8760} = 1,33 \times 10^{-2} \quad (\text{A.162})$$

Número médio anual de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas em uma linha conectada a estrutura:

$$N_L = N_G \times A_L \times C_I \times C_E \times C_T \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-4} \quad (\text{A.163})$$

Número médio anual de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas a uma estrutura adjacente:

$$N_{DJ} = 0 \quad (\text{A.164})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha causar ferimentos a seres vivos por choque:

$$P_U = P_{TU} \times P_{EB} \times P_{LD} \times C_{LD} = 0 \quad (\text{A.165})$$

Perda devido a ferimentos de seres vivos por choque elétrico:

$$L_U = L_A = 3,33 \times 10^{-5} \quad (\text{A.166})$$

Probabilidade de descarga atmosférica em linha causar danos físicos:

$$P_V = P_{EB} \times P_{LD} \times C_{LD} = 9 \times 10^{-3} \quad (\text{A.167})$$

Perda devido a danos físicos:

$$L_V = L_B = 1,33 \times 10^{-2} \quad (\text{A.168})$$

Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas à estrutura):

$$P_C = P_{SPD} \times C_{LD} = 10^{-2} \quad (\text{A.169})$$

Perda relacionada à falha dos sistemas internos (descargas atmosféricas à estrutura):

$$L_C = L_O \times \frac{n_z}{n_z} \times \frac{t_z}{8760} = 3,33 \times 10^{-2} \quad (\text{A.170})$$

Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas perto de uma estrutura:

$$N_M = N_G \times A_M \times 10^{-6} = 4,27 \times 10^{-1} \quad (\text{A.171})$$

Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da linha conectada):

$$P_M = P_{SPD} \times P_{MS} = 10^{-26} \quad (\text{A.172})$$

Perda relacionada à falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da estrutura):

$$L_M = L_C = 3,33 \times 10^{-2} \quad (\text{A.173})$$

Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas na linha conectada):

$$P_W = P_{SPD} \times P_{LD} \times C_{LD} = 9 \times 10^{-3} \quad (\text{A.174})$$

Perda devido à falha de sistemas internos (descargas atmosféricas na linha):

$$L_W = L_C = 3,33 \times 10^{-2} \quad (\text{A.175})$$

Número de eventos perigosos devido às descargas atmosféricas perto de uma linha:

$$N_I = N_G \times A_I \times C_I \times C_E \times C_T \times 10^{-6} = 2 \times 10^{-2} \quad (\text{A.176})$$

Probabilidade de falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da linha conectada):

$$P_Z = P_{SPD} \times P_{LI} \times C_{LI} = 10^{-2} \quad (\text{A.177})$$

Perda relacionada à falha de sistemas internos (descargas atmosféricas perto da linha):

$$L_Z = L_C = 3,33 \times 10^{-2} \quad (\text{A.178})$$

Índice de descargas atmosféricas:

$$N_G = 0,5 \quad (\text{A.179})$$

Área de exposição da estrutura:

$$A_D = L \times W + 2 \times (3 \times H) \times (L + W) + \pi \times (3 \times H)^2 = 6013,16 \quad (\text{A.180})$$

Fator de localização da estrutura:

$$C_D = 0,5 \quad (\text{A.181})$$

Largura da estrutura:

$$L = 47,7 \quad (\text{A.182})$$

Comprimento da estrutura:

$$W = 20 \quad (\text{A.183})$$

Altura da estrutura:

$$H = 8 \quad (\text{A.184})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma estrutura causar choque a seres vivos devido a tensões de passo perigosas:

$$P_{TA} = 0 \quad (\text{A.185})$$

Fator de redução da perda de vida humana dependendo do tipo do solo ou piso:

$$r_t = 10^{-2} \quad (\text{A.186})$$

Número relativo médio típico de vítimas feridas por choque elétrico (D1) devido a um evento perigoso:

$$L_T = 10^{-2} \quad (\text{A.187})$$

Número de pessoas na zona:

$$n_z = 99 \quad (\text{A.188})$$

Número total de pessoas na zona:

$$n_t = 99 \quad (\text{A.189})$$

Tempo, durante o qual as pessoas estão presentes na zona, expresso em horas por ano:

$$t_z = 2920 \quad (\text{A.190})$$

Fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo das providências tomadas para reduzir as consequências do incêndio:

$$r_p = 0,2 \quad (\text{A.191})$$

Fator de redução da perda devido a danos físicos dependendo do risco de incêndio ou do risco de explosão da estrutura :

$$r_f = 1 \quad (\text{A.192})$$

Fator de aumento da perda devido a danos físicos quando um perigo especial estiver presente :

$$h_z = 2 \quad (\text{A.193})$$

Número relativo médio típico de vítimas por danos físicos devido a um evento perigoso:

$$L_F = 0,1 \quad (\text{A.194})$$

Área de exposição equivalente de descargas atmosféricas que atingem a linha, expressa em metro quadrado:

$$A_L = 40 \times L_L = 40000 \quad (\text{A.195})$$

Fator de instalação da linha:

$$C_I = 1 \quad (\text{A.196})$$

Fator ambiental:

$$C_E = 0,01 \quad (\text{A.197})$$

Fator do tipo de linha:

$$C_T = 1 \quad (\text{A.198})$$

Comprimento da seção da linha em metros:

$$L_L = 1000 \quad (\text{A.199})$$

Probabilidade de uma descarga atmosférica em uma linha adentre a estrutura e cause choque a seres vivos devido à tensões de toque perigosas:

$$P_{TU} = 0 \quad (\text{A.200})$$

Probabilidade dependente das ligações equipotencias para descargas atmosféricas:

$$P_{EB} = 0,01 \quad (\text{A.201})$$

Probabilidade de falha de sistemas internos devido a uma descarga atmosférica na linha conectada dependendo das características da linha:

$$P_{LD} = 0,9 \quad (\text{A.202})$$

Fator dependente da blindade, do aterramento e das condições da isolação da linha:

$$C_{LD} = 1 \quad (\text{A.203})$$

Probabilidade de reduzir $P_C, P_M, P_W e P_Z$ quando um sistema coordenado de DPS está instalado:

$$P_{SPD} = 10^{-2} \quad (\text{A.204})$$

Perda em uma estrutura devido à falha de sistemas internos

$$L_O = 0,1 \quad (\text{A.205})$$

Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas perto de uma estrutura:

$$A_M = 2 \times 500 \times (L + W) + \pi \times 500^2 = 8,53 \times 10^5 \quad (\text{A.206})$$

Probabilidade de reduzir P_M dependendo da blindagem, cabeamento e da tensão suportável do equipamento:

$$P_{MS} = (K_{S1} \times K_{S2} \times K_{S3} \times K_{S4})^2 = 10^{-24} \quad (\text{A.207})$$

Fator relevante à efetividade da blindagem por malha de uma estrutura:

$$K_{S1} = 10^{-4} \quad (\text{A.208})$$

Fator relevante à efetividade da blindagem por malha dos campos internos de uma estrutura:

$$K_{S2} = 10^{-4} \quad (\text{A.209})$$

Fator relevante às características do cabeamento interno:

$$K_{S3} = 10^{-4} \quad (\text{A.210})$$

Fator relevante à tensão suportável de impulso de um sistema:

$$K_{S4} = 1 \quad (\text{A.211})$$

Área de exposição equivalente para descargas atmosféricas perto de uma linha:

$$A_I = 4000 \times L_I = 4 \times 10^6 \quad (\text{A.212})$$

Probabilidade de reduzir P_Z dependendo das características da linha e da tensão suportável do equipamento (descargas atmosféricas perto da linha conectada):

$$P_{LI} = 1 \quad (\text{A.213})$$

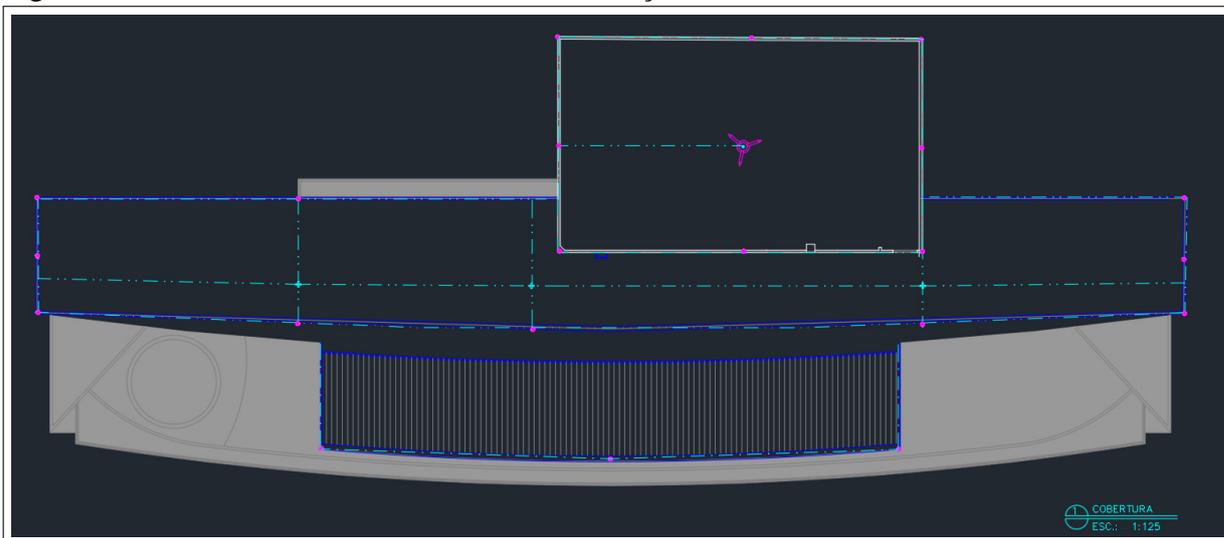
Fator dependente da blindagem, aterramento e condições de isolamento da linha para descargas atmosféricas perto da linha:

$$C_{LI} = 1 \quad (\text{A.214})$$

APÊNDICE B – PROJETO DO SPDA EXTERNO DA EDIFICAÇÕES

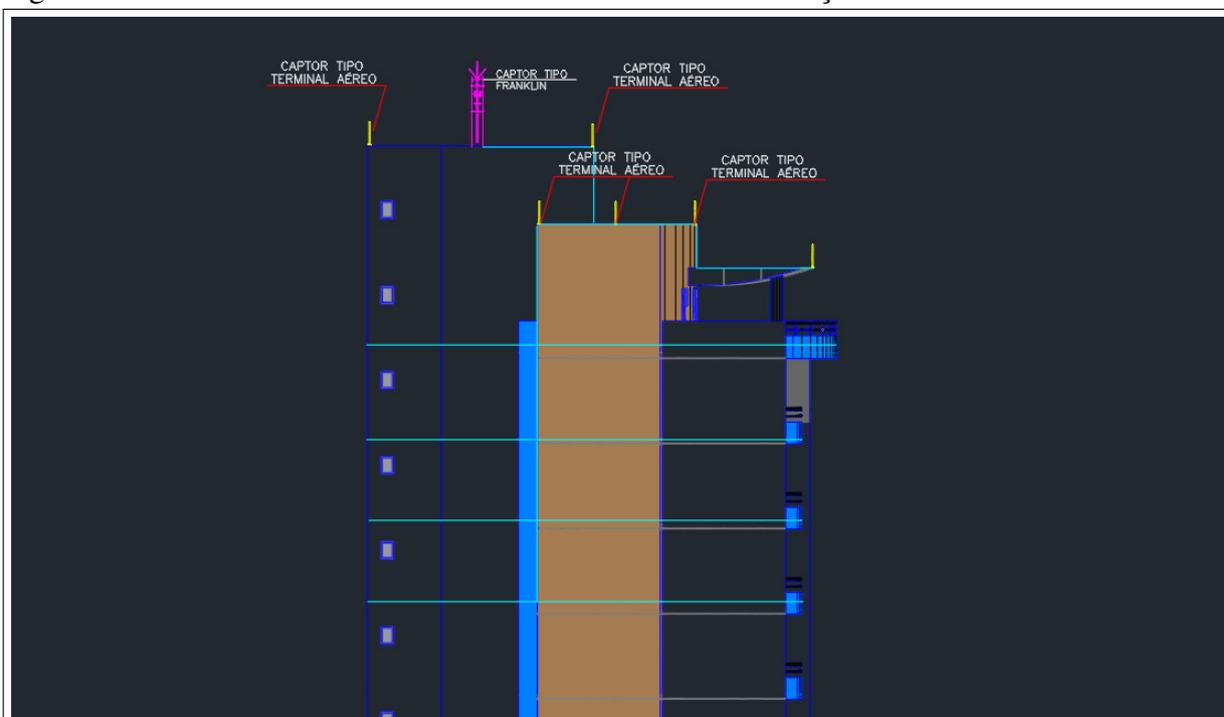
Esse apêndice apresenta o projeto do sistema de proteção contra descargas atmosféricas desenvolvido para edificação residencial e edificação industrial.

Figura 57 – SPDA externo da cobertura da edificação residencial



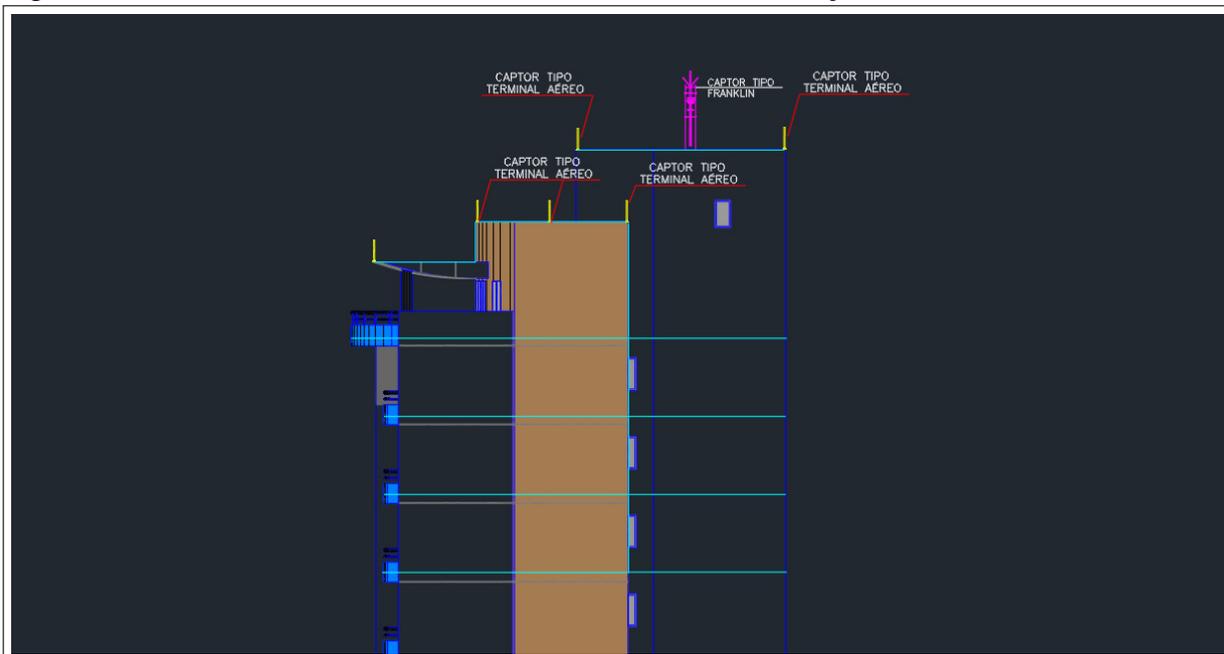
Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

Figura 58 – Detalhe fachada leste com SPDA externo da edificação residencial



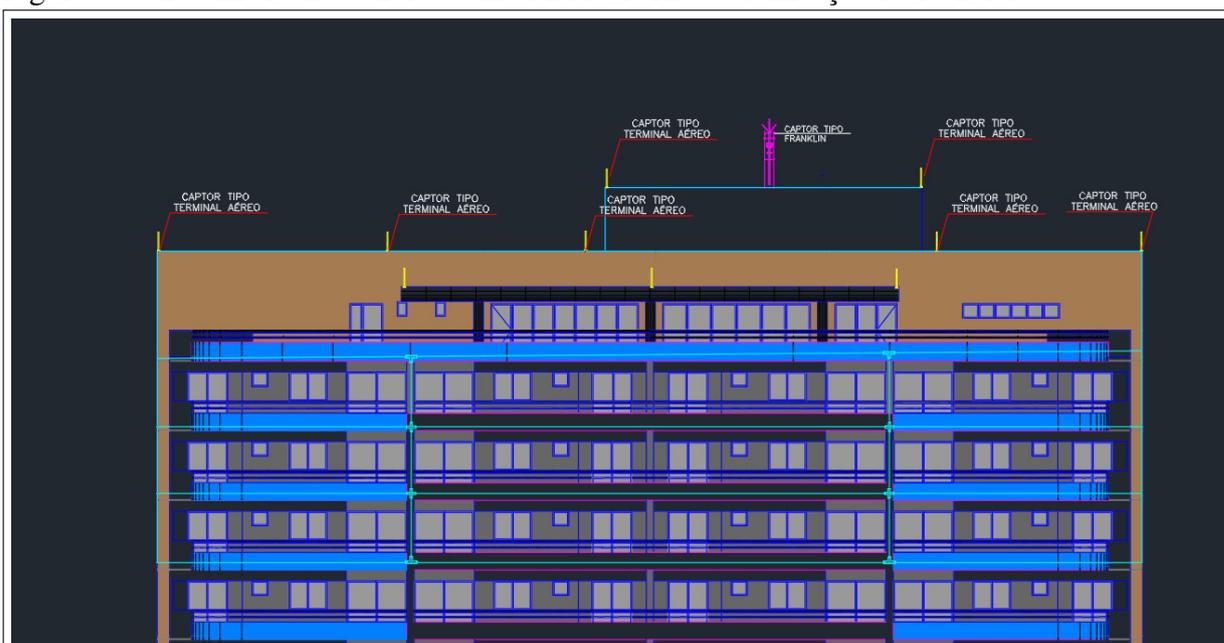
Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

Figura 59 – Detalhe fachada oeste com SPDA externo da edificação residencial



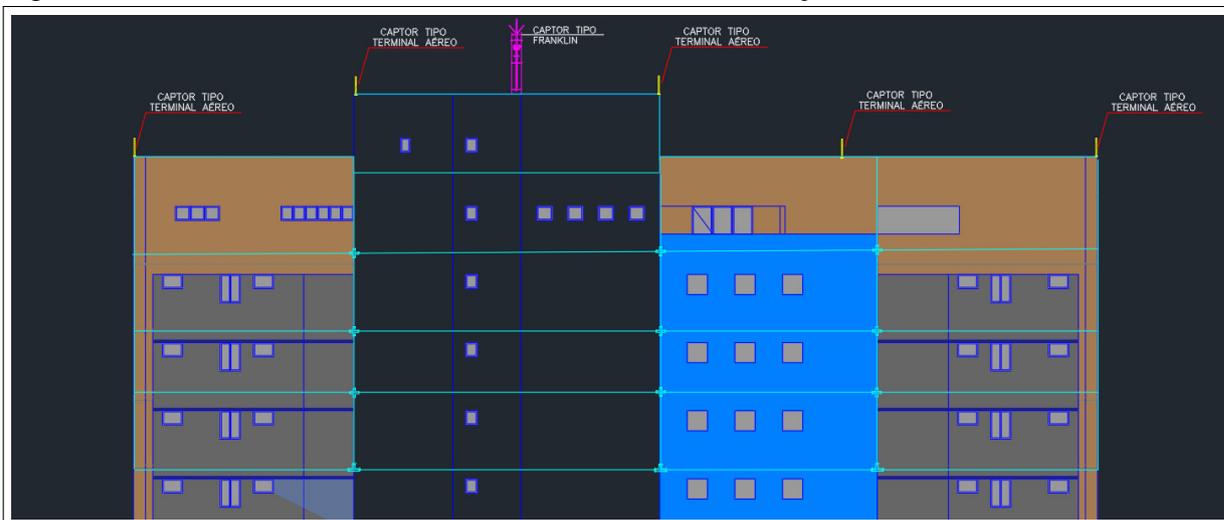
Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

Figura 60 – Detalhe fachada norte com SPDA externo da edificação residencial



Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

Figura 61 – Detalhe fachada sul com SPDA externo da edificação residencial



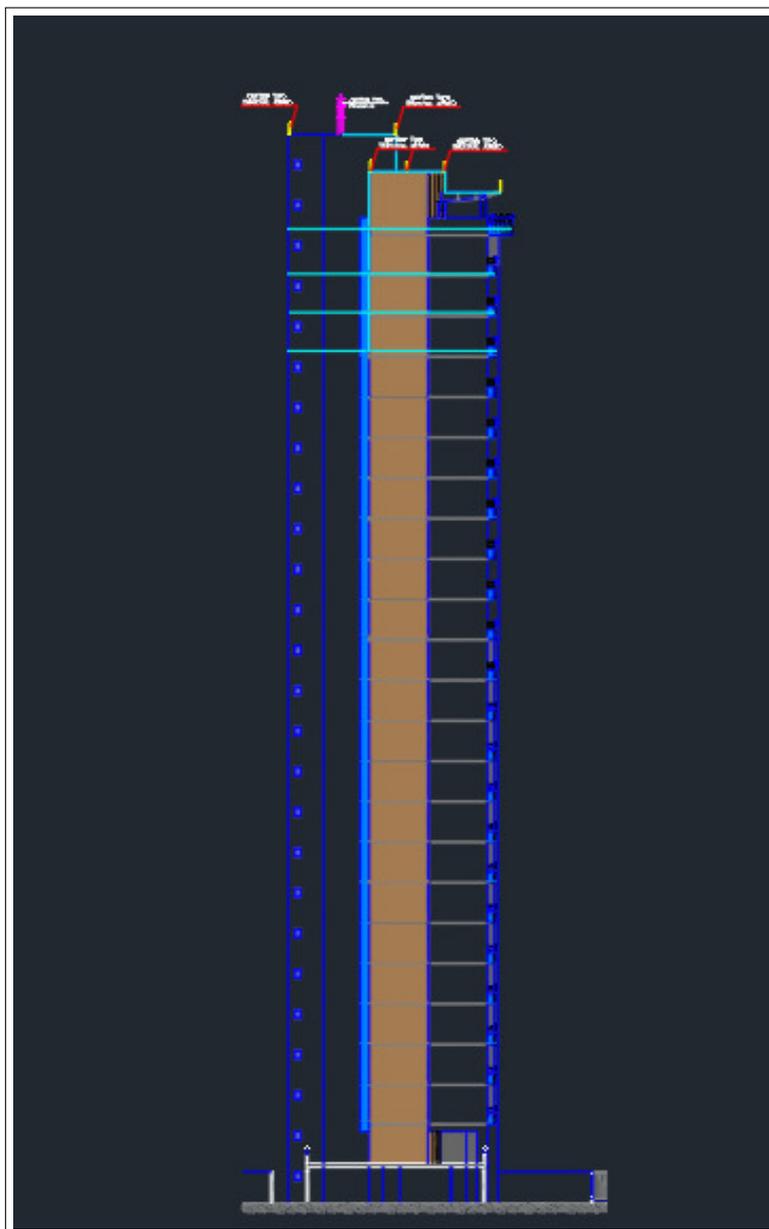
Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

Figura 62 – Legenda de símbolos utilizados no projeto do SPDA externo da edificação residencial

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
	CAPTOR TIPO FRANKLIN AEREO EM LATÃO CROMADO 2 Altura = 3,00m
	TERMINAL AÉREO EM AÇO GALVANIZADO A FOGO Ø 3/8" x 700 mm
	SOLDA EXOTÉRMICA TIPO L; CONEXÃO DE CABO DE COBRE NÚ DE 35mm ²
	SOLDA EXOTÉRMICA TIPO T; CONEXÃO DE CABO DE COBRE NÚ DE 35mm ²
	SOLDA EXOTÉRMICA TIPO X; CONEXÃO DE CABO DE COBRE NÚ DE 35mm ²
	CABO DE COBRE NU ENCORDADO de 35mm ² ; CADA FIO DA CORDOADA COM DIÂMETRO DE 2,5 mm; USADO NA MALHA SUPERIOR.

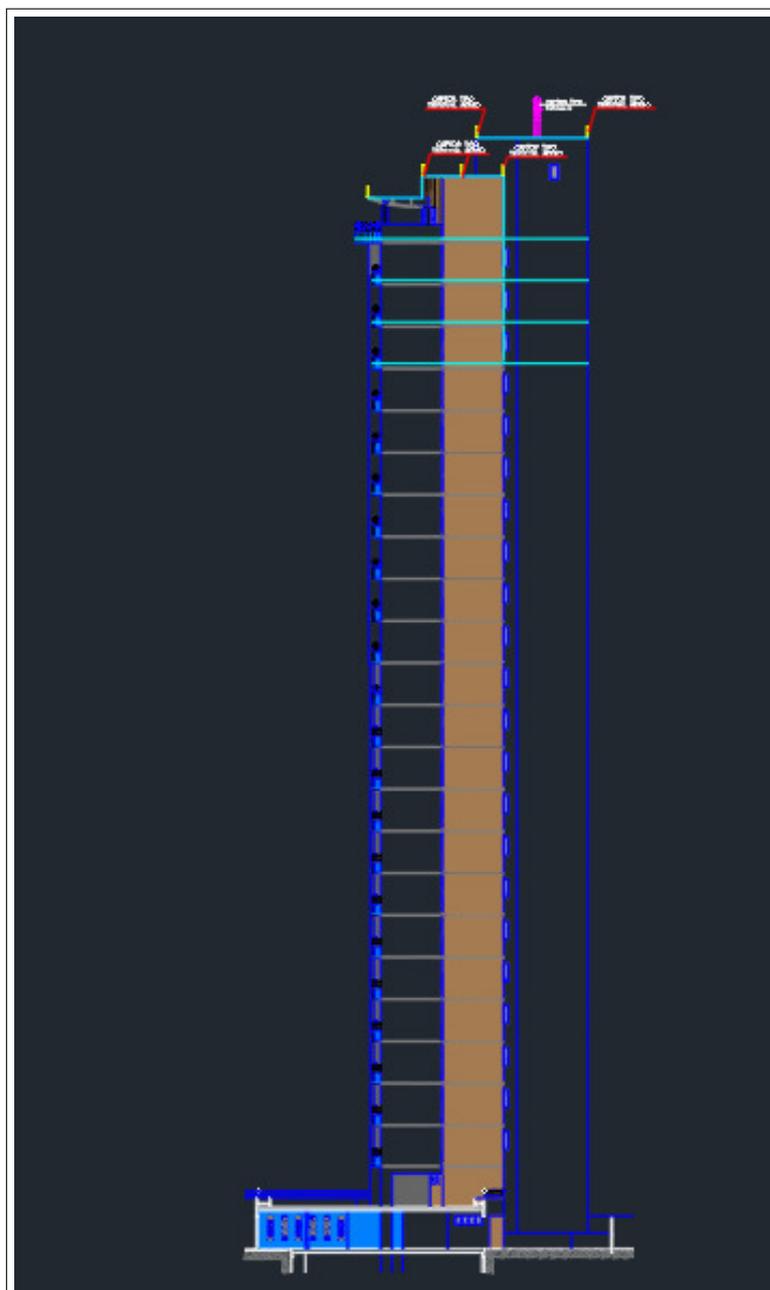
Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

Figura 63 – Fachada leste com SPDA externo da edificação residencial



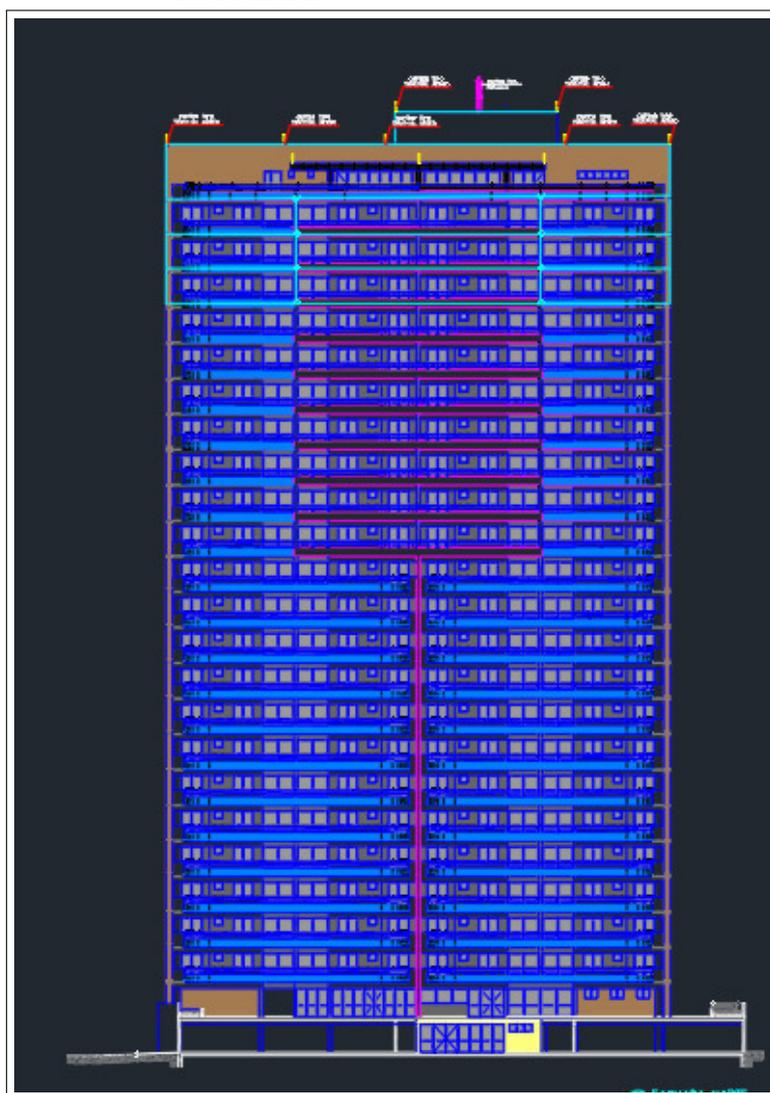
Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

Figura 64 – Fachada oeste com SPDA externo da edificação residencial



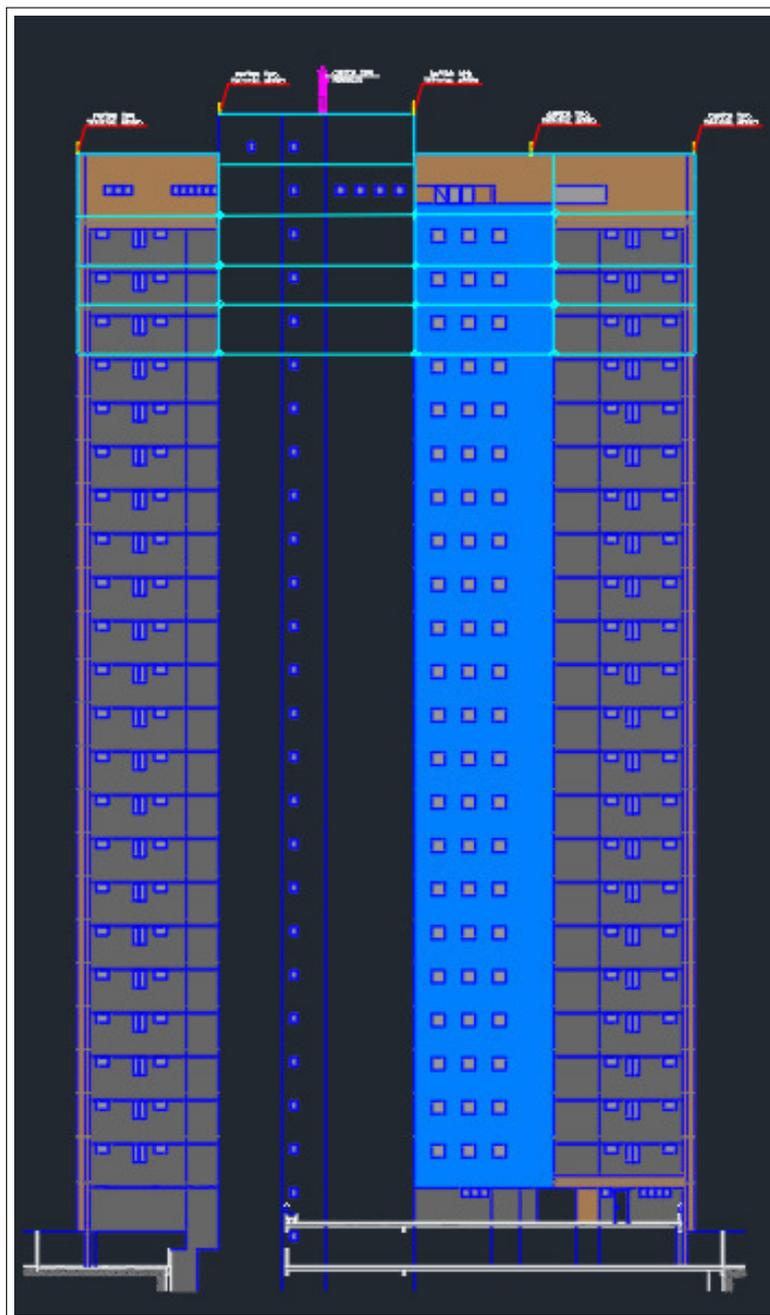
Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

Figura 65 – Fachada norte com SPDA externo da edificação residencial



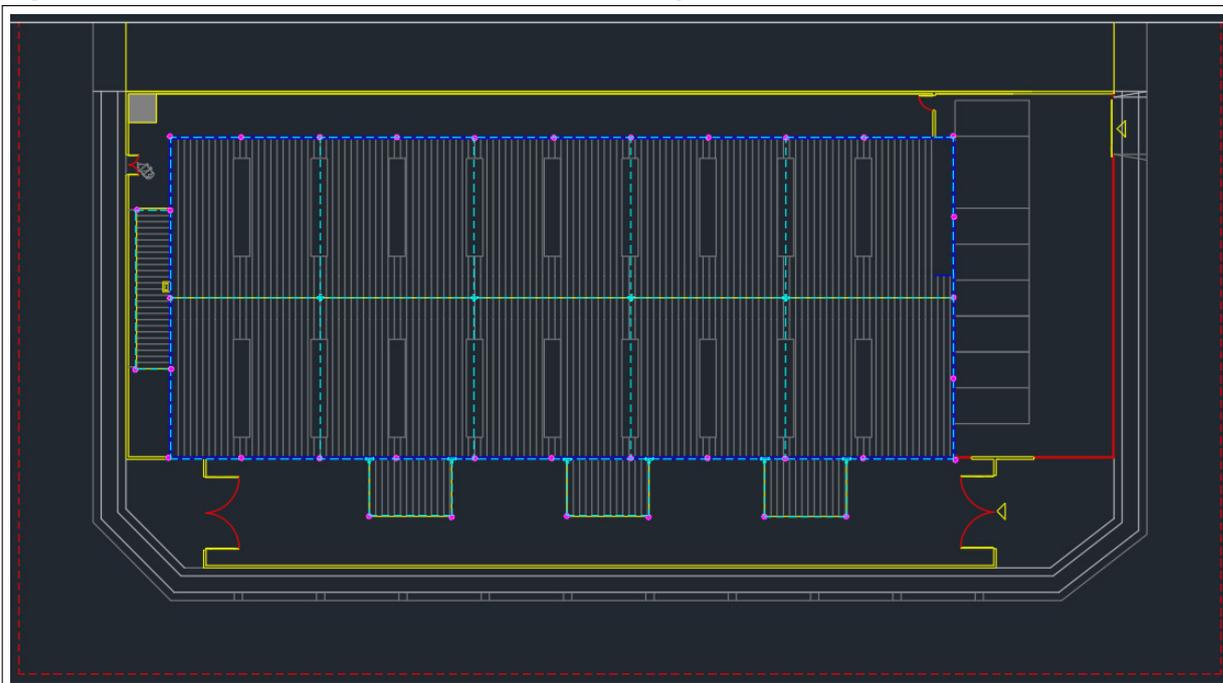
Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

Figura 66 – Fachada sul com SPDA externo da edificação residencial



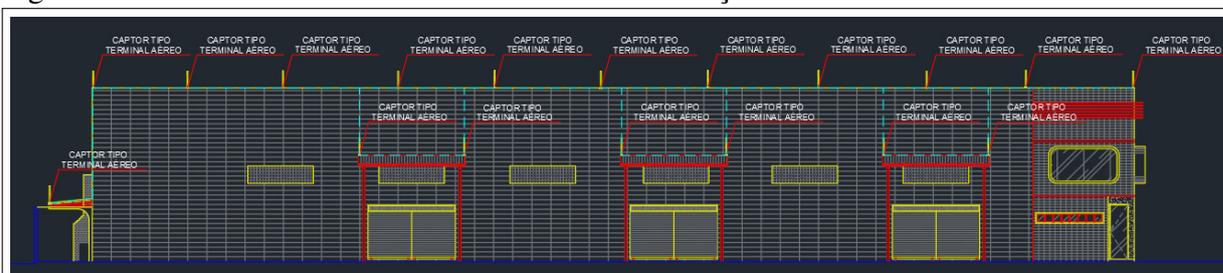
Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

Figura 67 – Cobertura com SPDA externo da edificação industrial



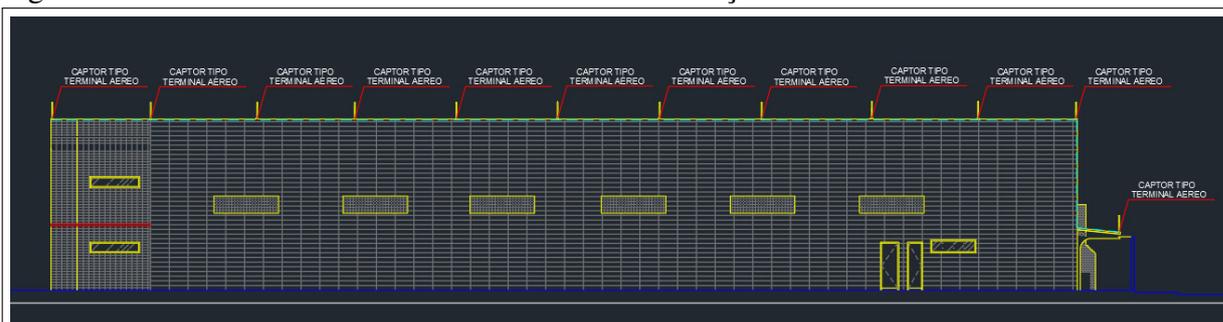
Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

Figura 68 – Fachada leste com SPDA externo da edificação industrial



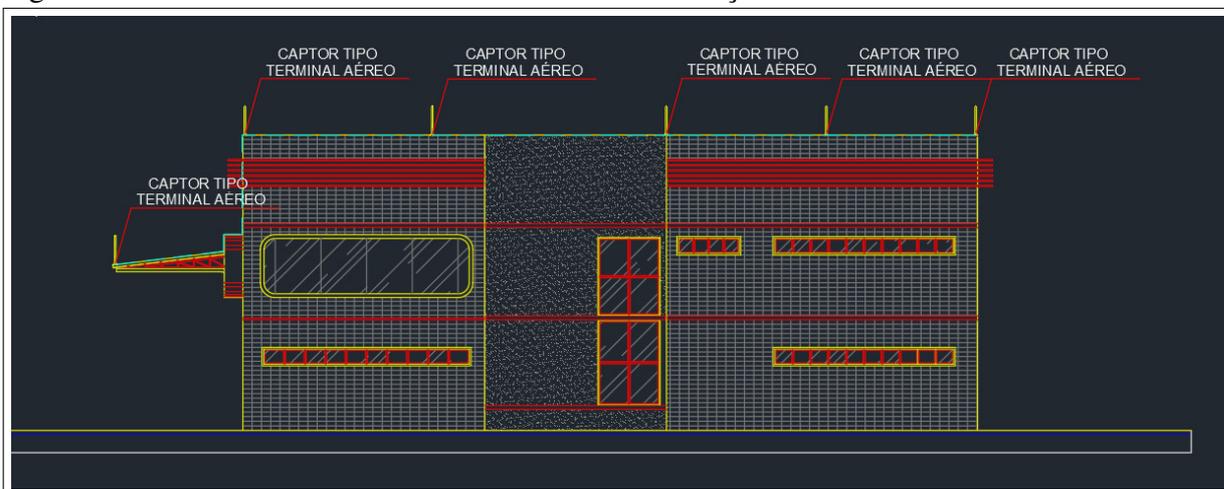
Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

Figura 69 – Fachada oeste com SPDA externo da edificação industrial



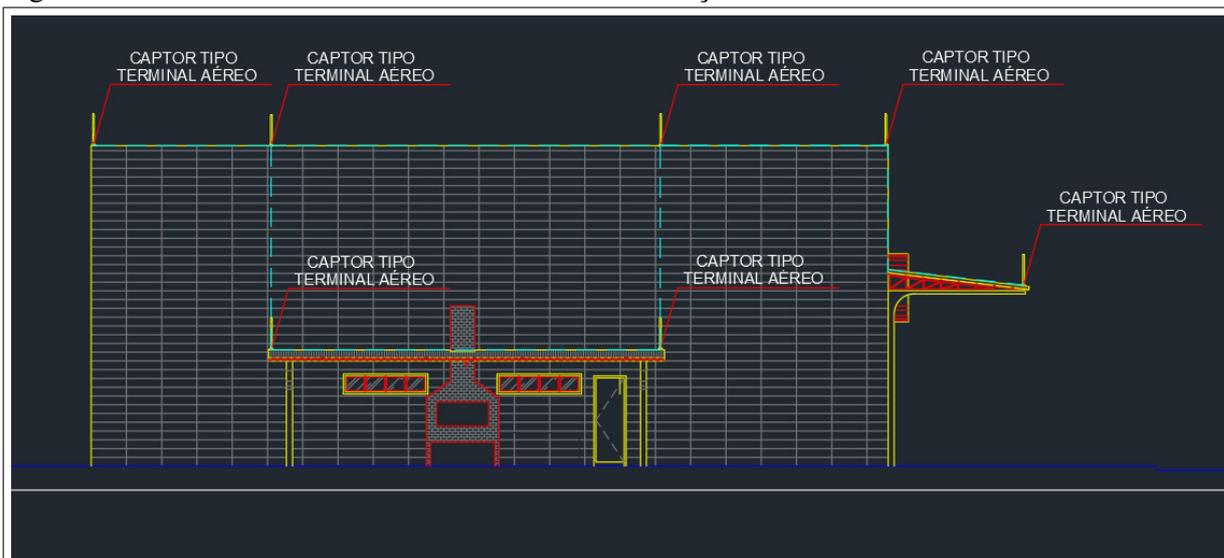
Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

Figura 70 – Fachada norte com SPDA externo da edificação industrial



Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

Figura 71 – Fachada sul com SPDA externo da edificação industrial



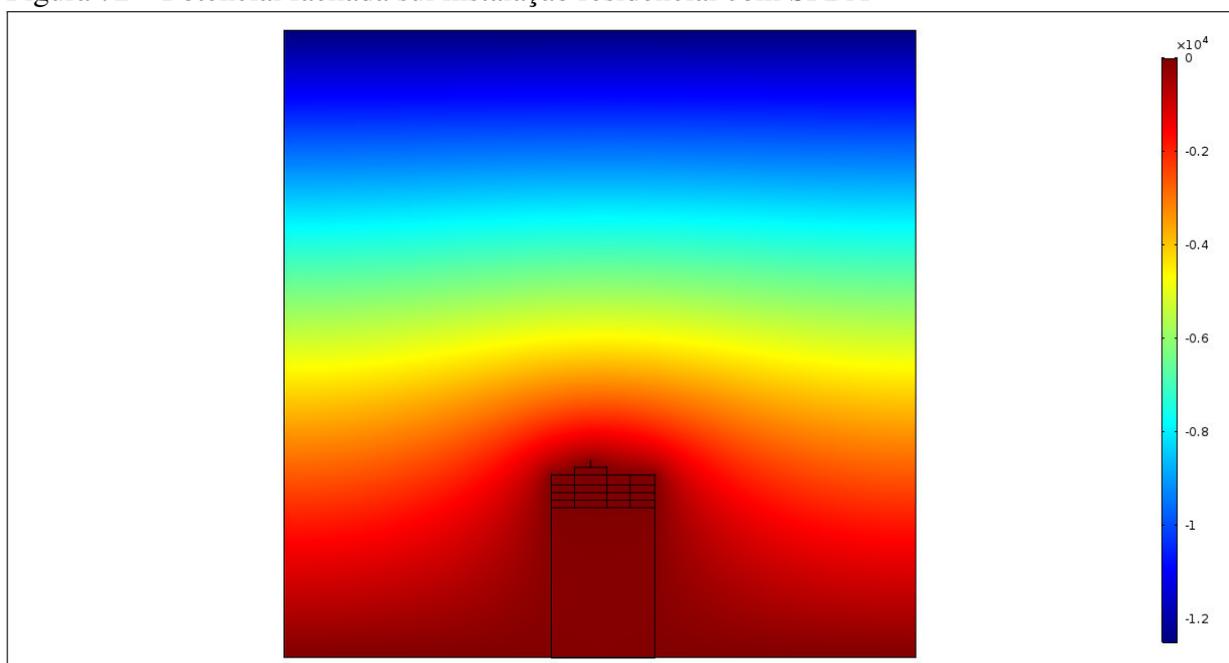
Fonte: Adaptado de Notas de aula disciplina Instalações Elétricas Industriais (2018)

APÊNDICE C – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

C.1 Resultado das simulações bidimensionais das estruturas com sistema de proteção contra descargas atmosféricas implementado

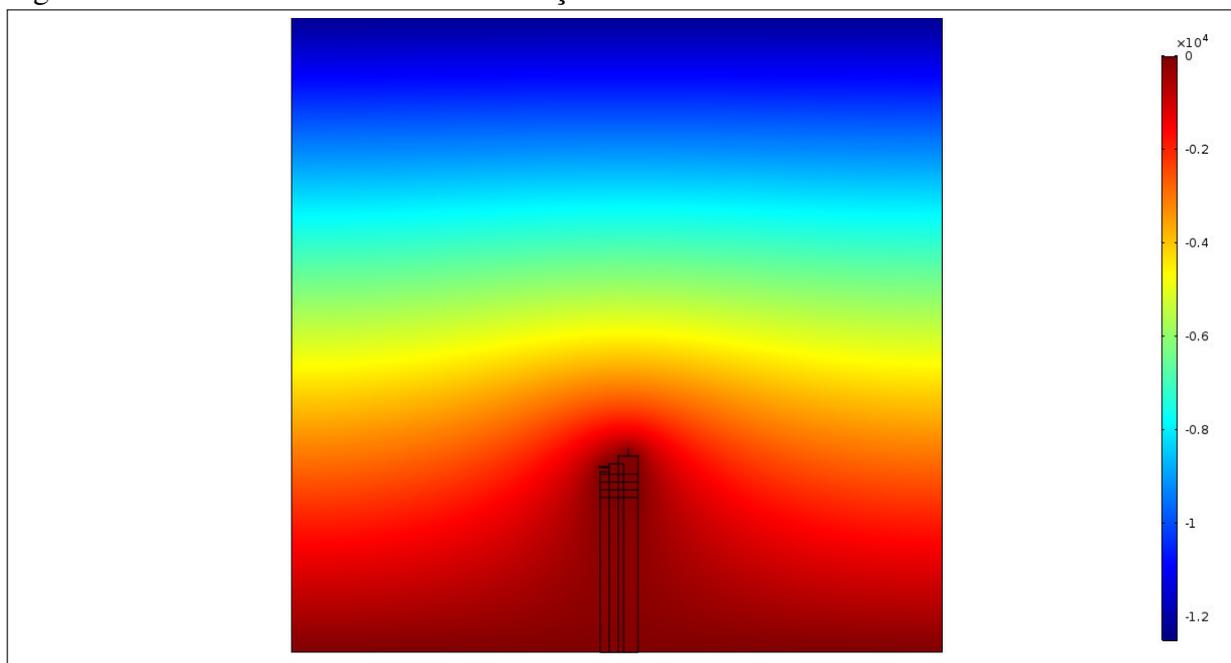
Esse apêndice apresenta todos os resultados das simulações bidimensionais das estruturas com sistema de proteção contra descargas atmosféricas. A escala das simulações de potencial são em kV e as de campo elétrico e descargas atmosféricas em kV/m.

Figura 72 – Potencial fachada sul instalação residencial com SPDA



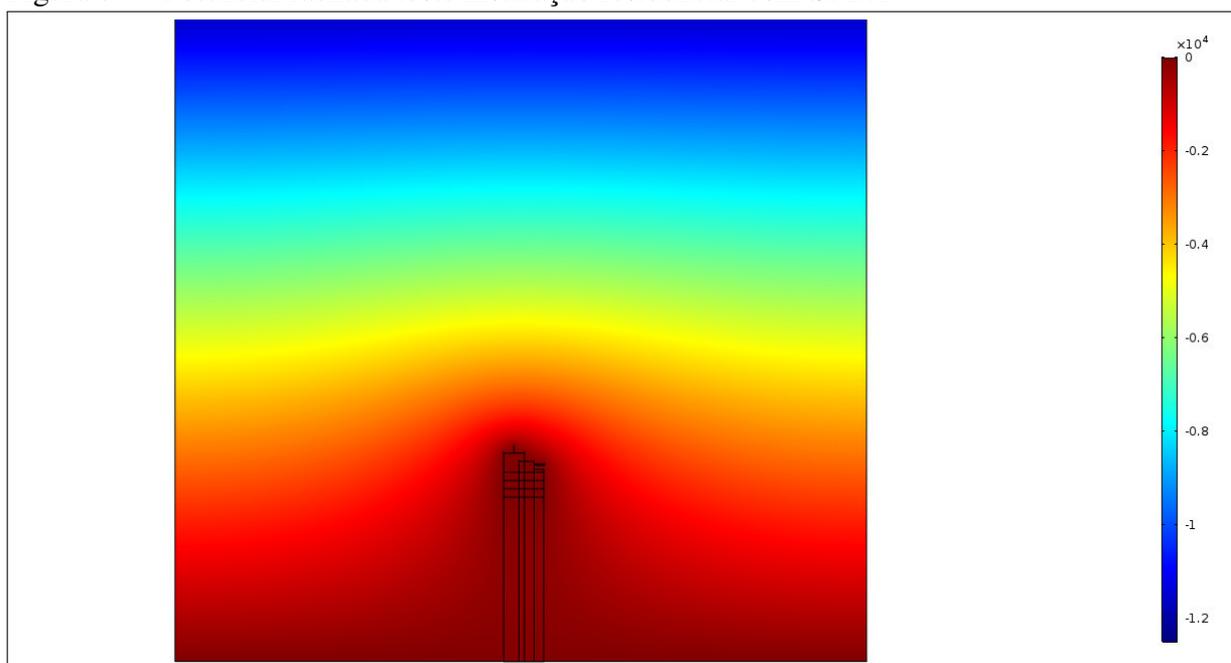
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 73 – Potencial fachada oeste instalação residencial com SPDA



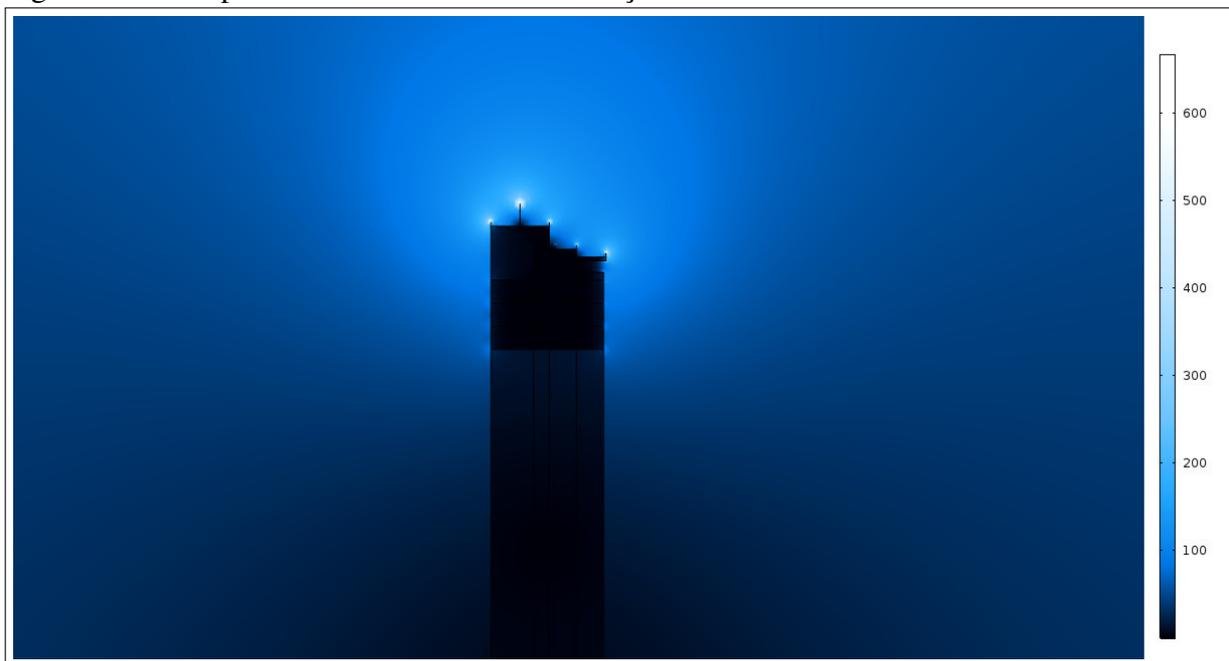
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 74 – Potencial fachada leste instalação residencial com SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 75 – Campo elétrico fachada leste instalação residencial com SPDA



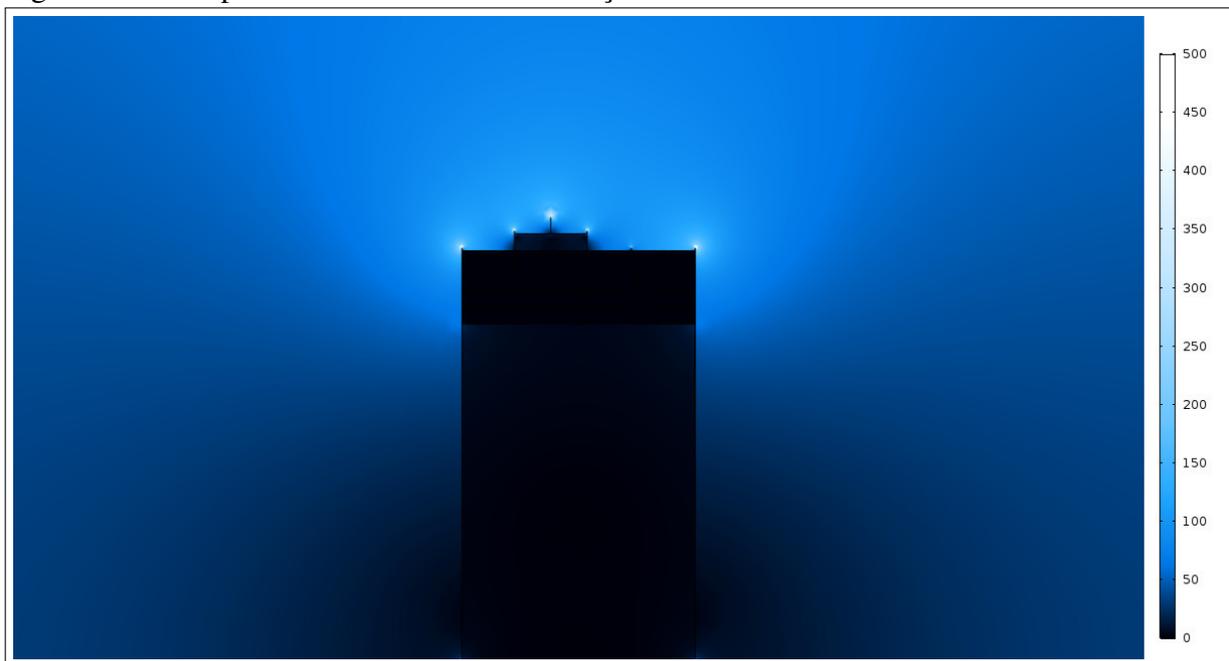
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 76 – Campo elétrico fachada oeste instalação residencial com SPDA



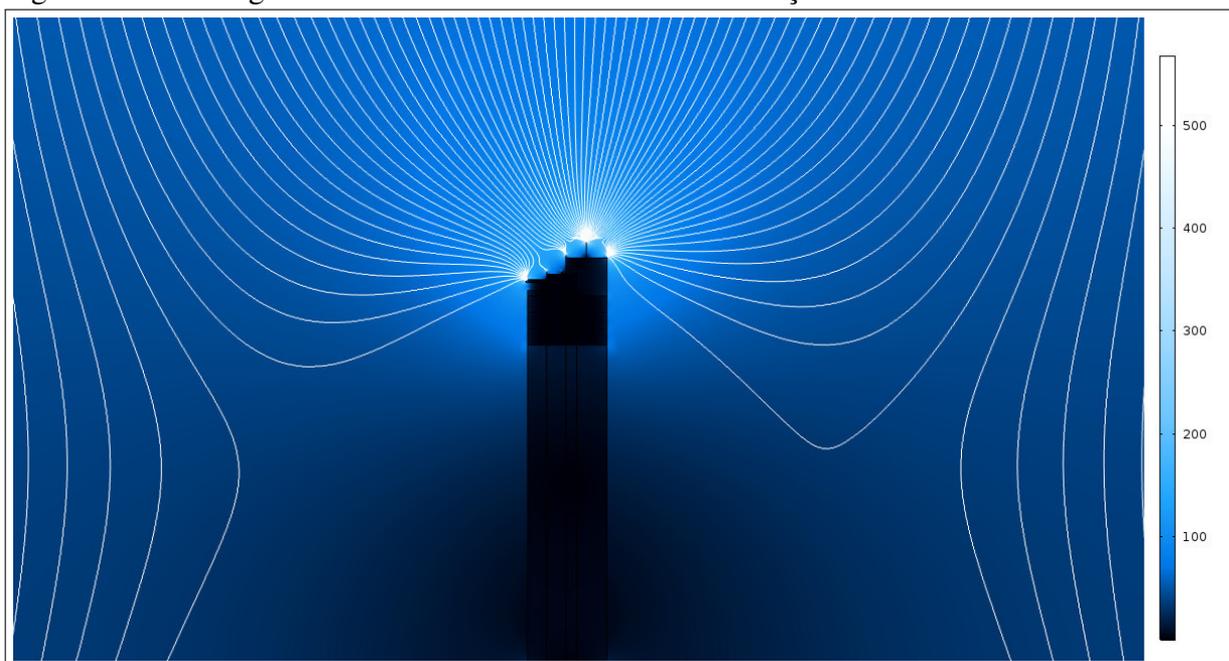
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 77 – Campo elétrico fachada sul instalação residencial com SPDA



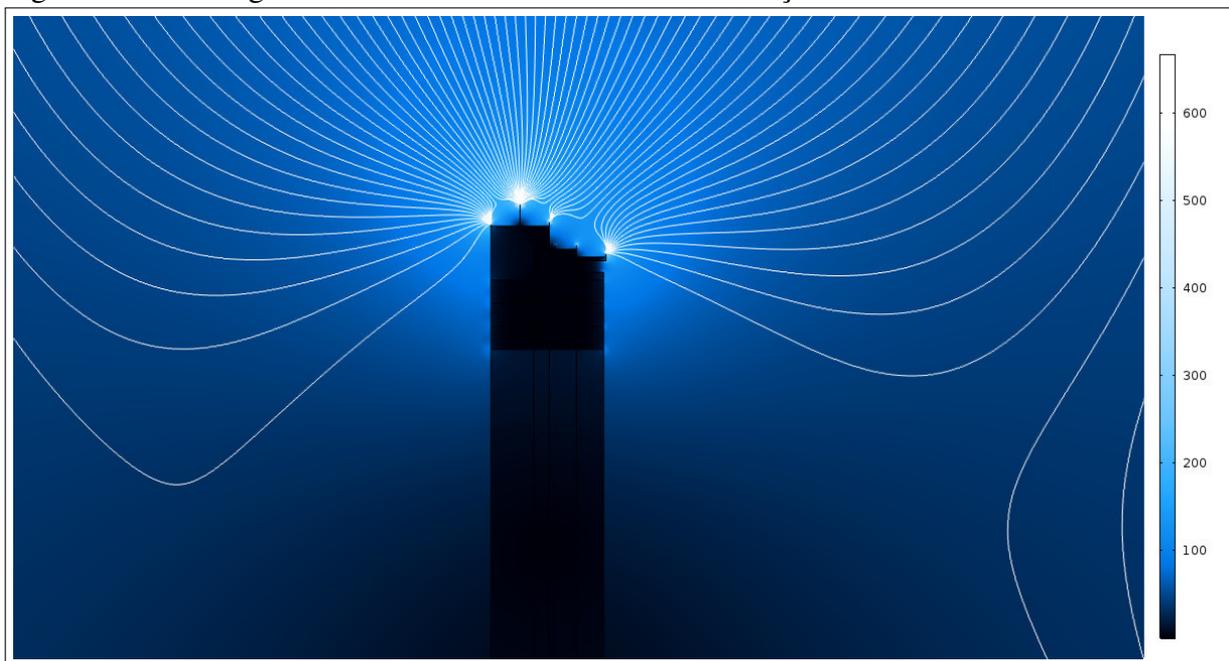
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 78 – Descarga atmosférica sobre fachada oeste instalação residencial com SPDA



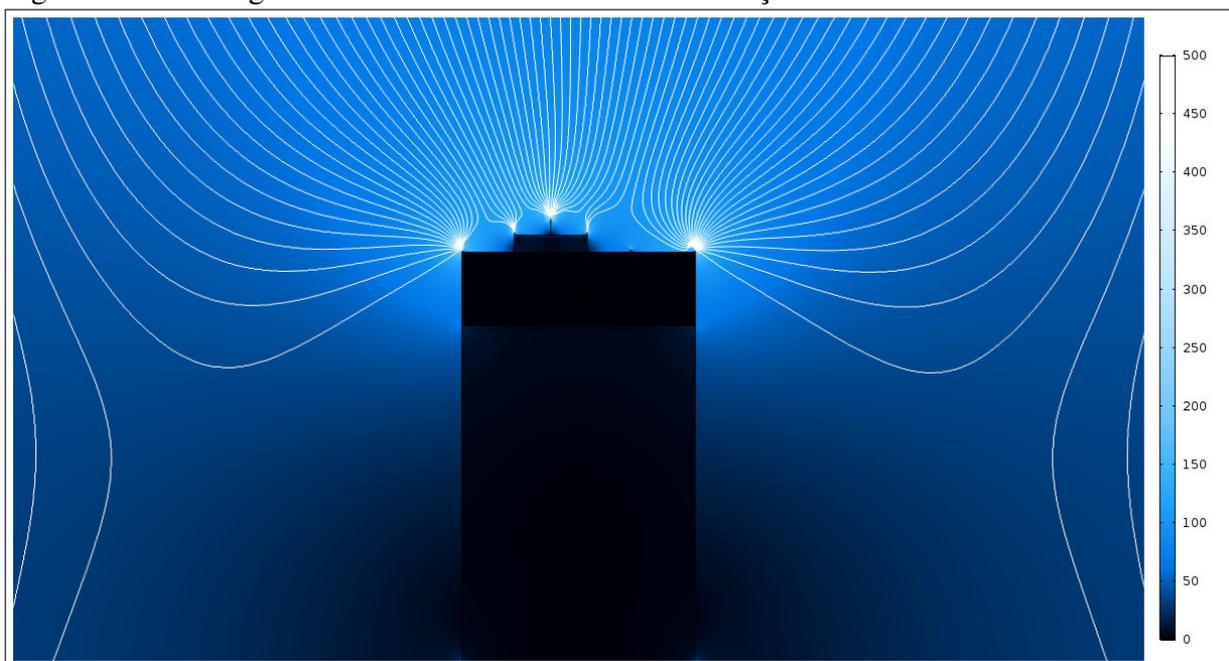
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 79 – Descarga atmosférica sobre fachada leste instalação residencial com SPDA



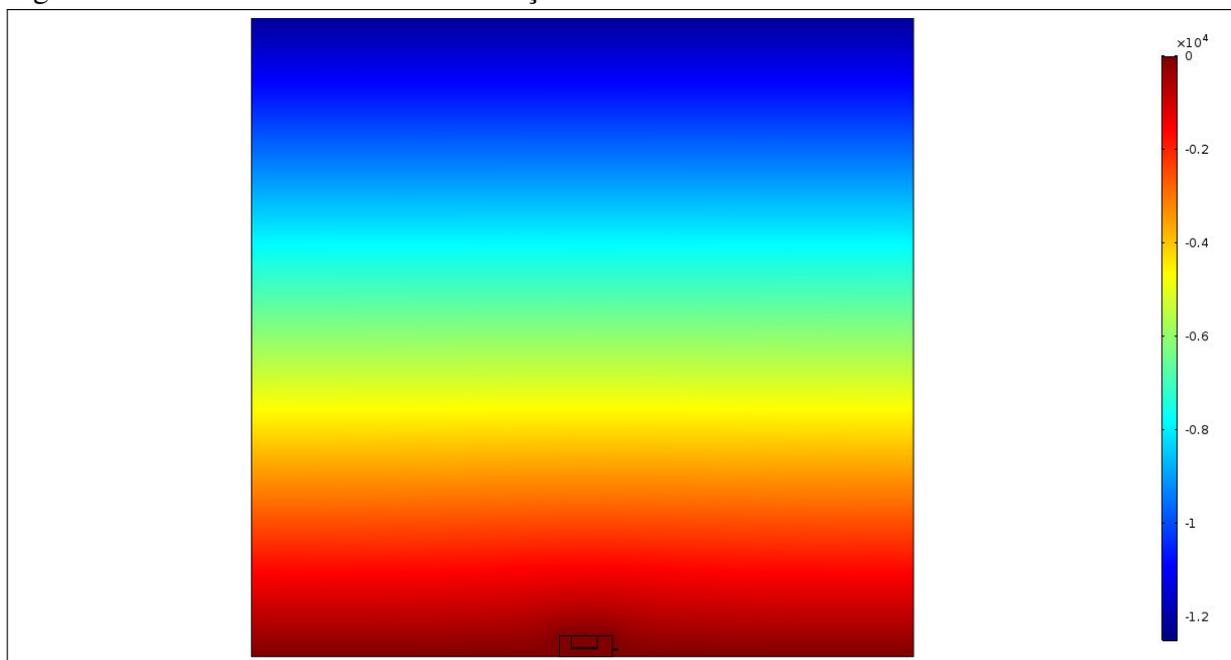
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 80 – Descarga atmosférica sobre fachada sul instalação residencial com SPDA



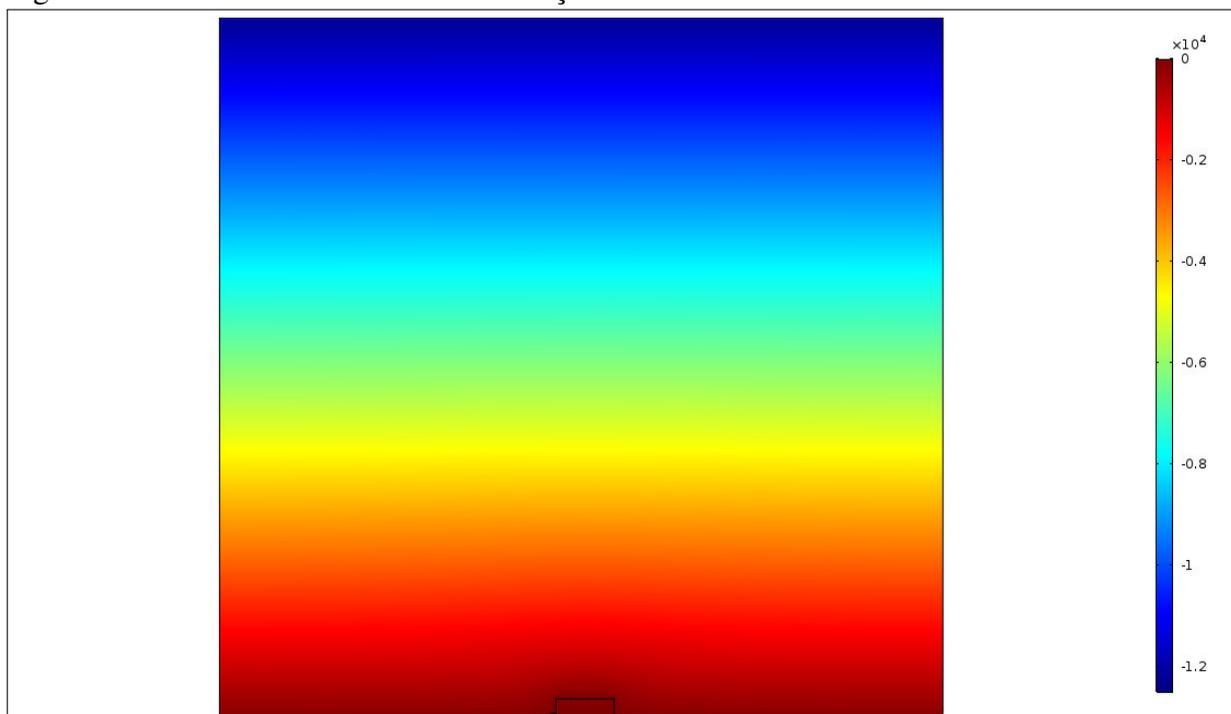
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 81 – Potencial fachada sul instalação industrial com SPDA



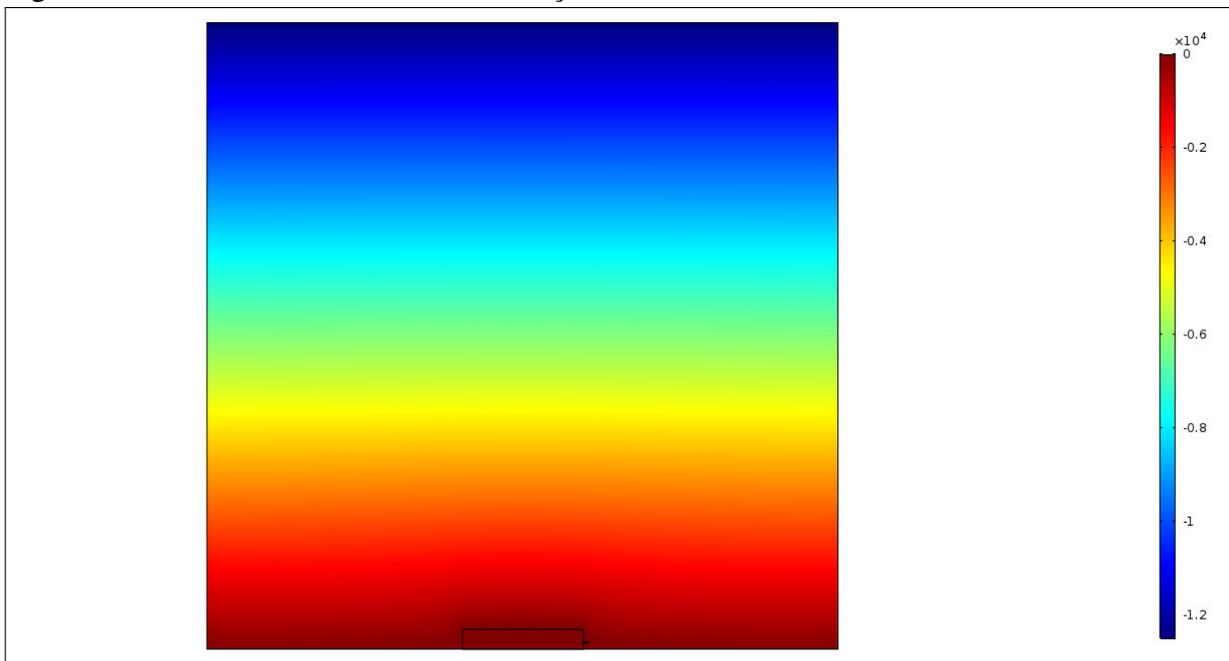
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 82 – Potencial fachada norte instalação industrial com SPDA



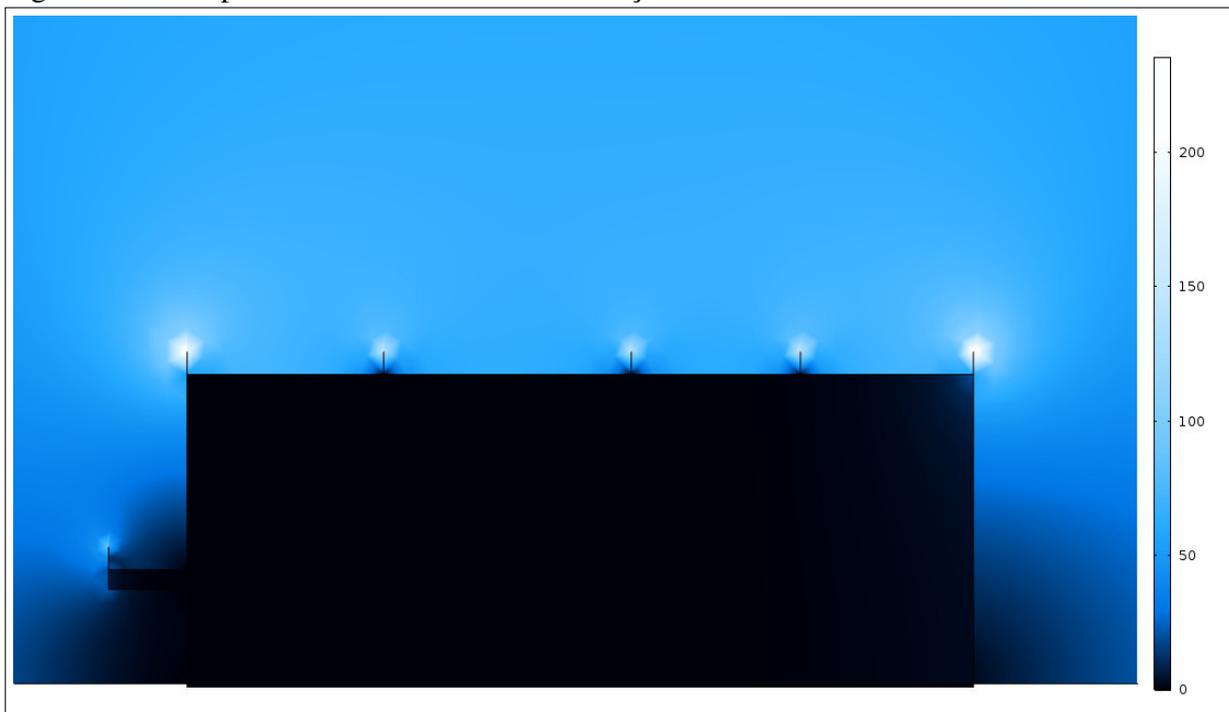
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 83 – Potencial fachada oeste instalação industrial com SPDA



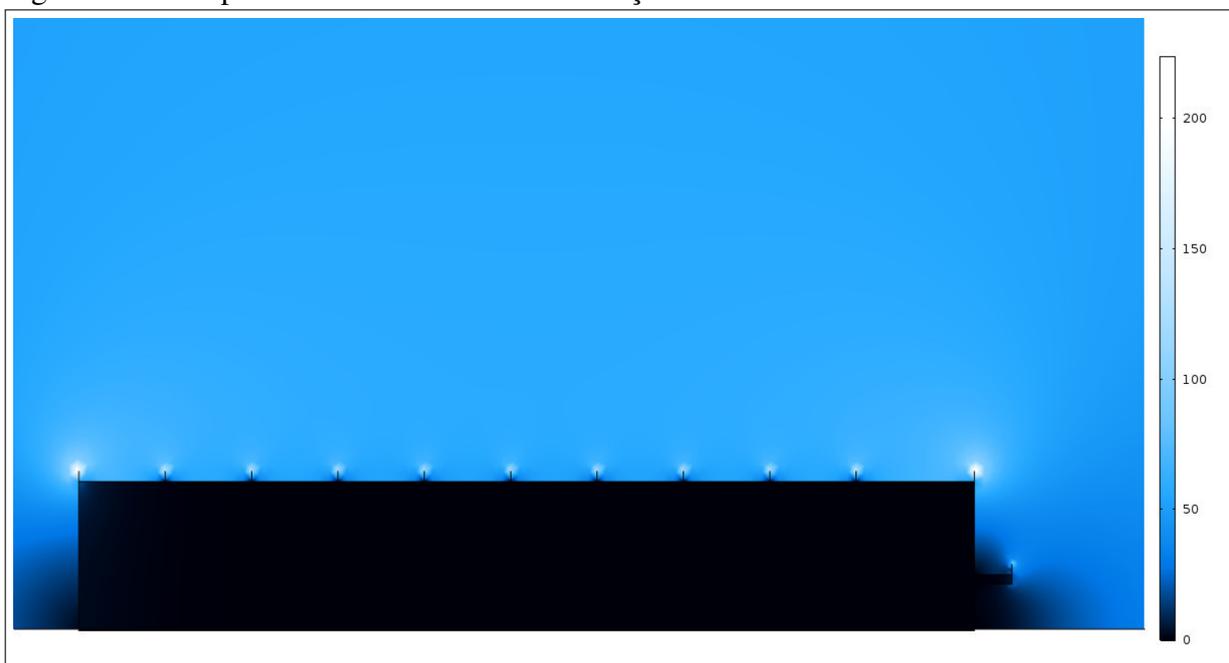
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 84 – Campo elétrico fachada norte instalação industrial com SPDA



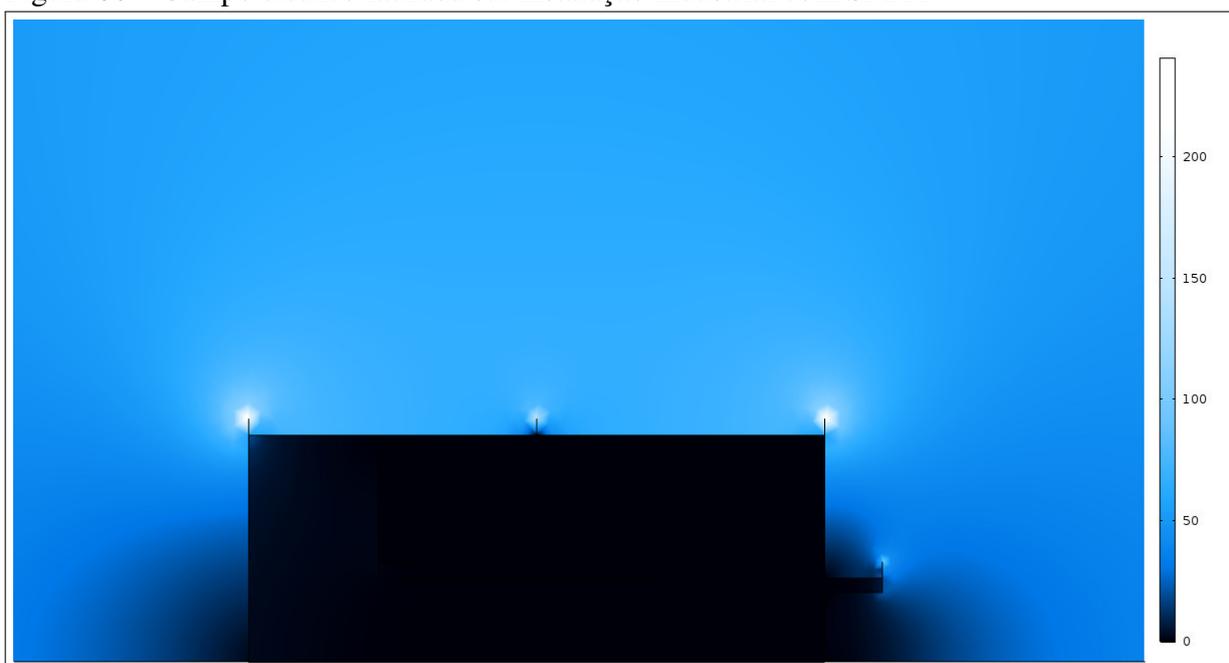
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 85 – Campo elétrico fachada oeste instalação industrial com SPDA



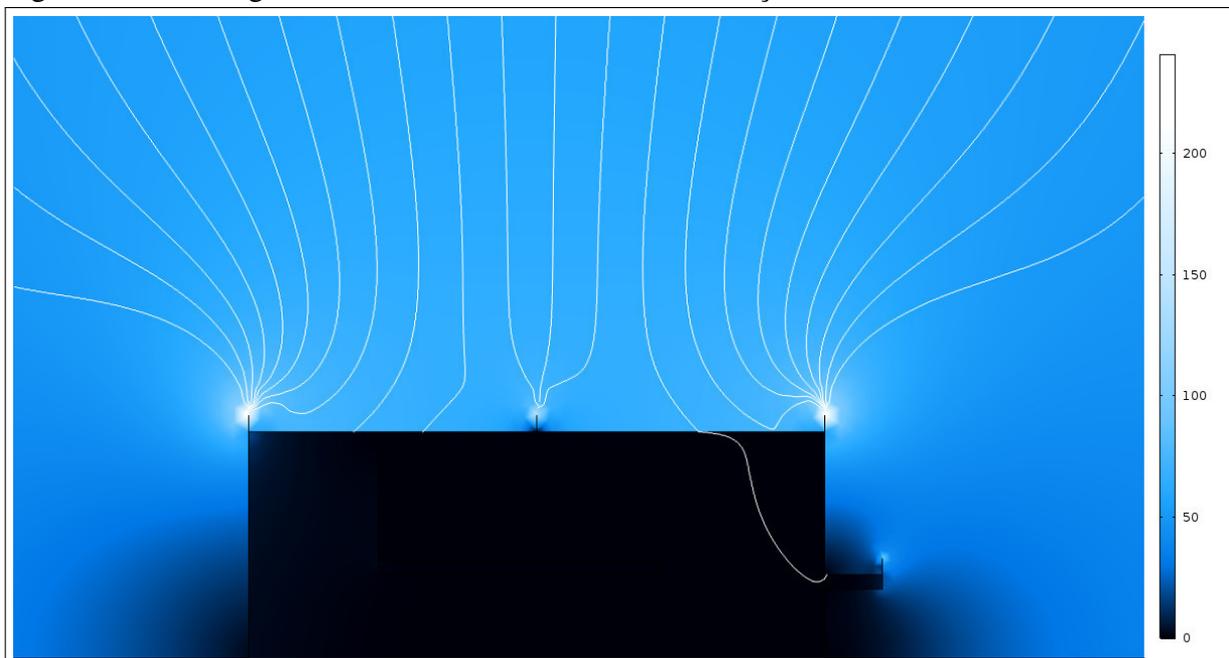
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 86 – Campo elétrico fachada sul instalação industrial com SPDA



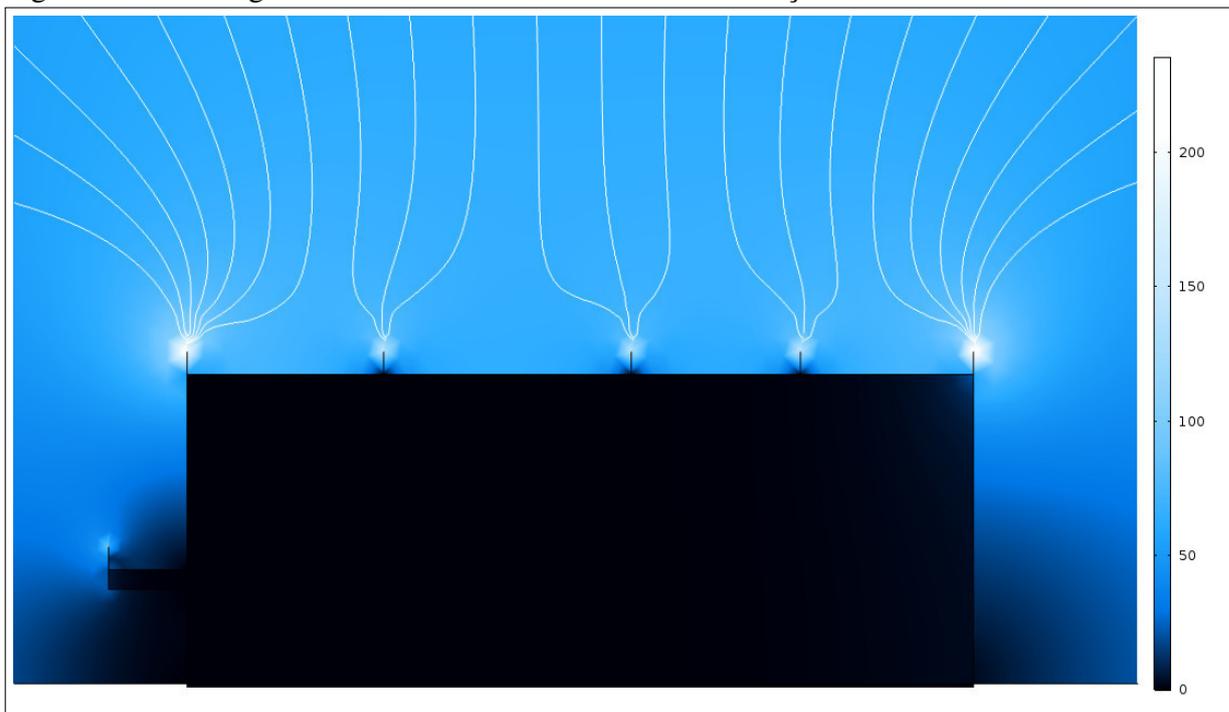
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 87 – Descarga atmosférica sobre fachada sul instalação industrial com SPDA



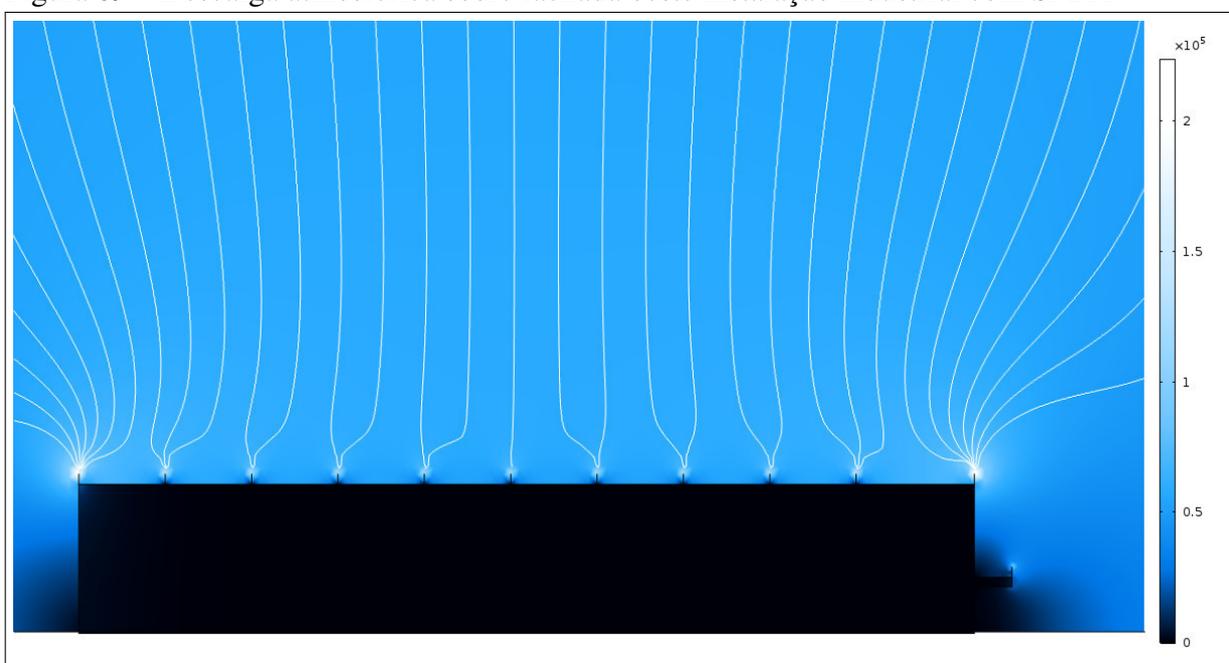
Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 88 – Descarga atmosférica sobre fachada norte instalação industrial com SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019)

Figura 89 – Descarga atmosférica sobre fachada oeste instalação industrial com SPDA



Fonte: elaborado pelo autor (2019)