



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**BRUNO RODRIGUES LISBOA**

**ESTUDO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DIRETAS EM  
UMA UNIDADE DE MINIGERAÇÃO FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA**

**FORTALEZA**

**2018**

BRUNO RODRIGUES LISBOA

ESTUDO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DIRETAS EM UMA  
UNIDADE DE MINIGERAÇÃO FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Sistemas de energia

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes

FORTALEZA

2018

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)

---

- L749e Lisboa, Bruno.  
Estudo de proteção contra descargas atmosféricas diretas em uma unidade de minigeração fotovoltaica distribuída / Bruno Lisboa. – 2018.  
76 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes.
1. Descargas atmosféricas. 2. Modelos de incidência. 3. Geração distribuída fotovoltaica. I. Título.  
CDD 621.3
-

BRUNO RODRIGUES LISBOA

ESTUDO DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DIRETAS EM UMA  
UNIDADE DE MINIGERAÇÃO FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Sistemas de energia

Aprovada em: 31 de Agosto de 2018

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. Dr. Francisco Kleber de Araújo Lima  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Giovanni Cordeiro Barroso  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Cícero Marcus Tavares Cruz  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho aos meus pais pela oportunidade dos estudos. À minha irmã pelo incentivo. Ao meu filho e futuro engenheiro eletricista Guilherme, por ser a razão de todo o meu esforço.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes pela orientação e incentivo.

Ao doutorando Ednardo Rodrigues pela grande ajuda nas simulações e valiosas contribuições.

Aos demais colegas e professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará.

A Universidade Federal do Semi-Árido por abrir as portas para realização do estudo de caso.

"Escrever um livro é uma aventura. No início, é como um brinquedo, uma diversão; então ele se torna nosso amante, nosso mestre, e, finalmente, um tirano. A última fase é aquela em que você está praticamente dominado pela servidão, você mata o monstro, e o joga para o público."

(Winston Churchill)

## RESUMO

O uso da geração fotovoltaica tem sido impulsionada por uma forte tendência de redução de custos de energia elétrica nas unidades consumidoras. Estes sistemas se encontram ao ar livre e estão sujeitos a incidência de descargas atmosféricas. Os métodos de proteção contra descargas atmosféricas sobre sistemas de geração fotovoltaicos ainda precisam ser desenvolvidos. Esta dissertação objetiva apresentar ganhos na área de proteção contra descargas atmosféricas, aplicada a sistemas de geração fotovoltaica. Para isso, foi realizado um estudo de caso em uma unidade de minigeração fotovoltaica distribuída localizada no semiárido nordestino, na cidade de Mossoró, no estado do Rio Grande do Norte. Neste trabalho é analisada a incidência de descargas atmosféricas através dos métodos tradicionalmente utilizados e previstos na Norma Regulamentadora Brasileira (NBR) 5419:2015, como o modelo do ângulo de proteção e a técnica das esferas rolantes. Também se realizou uma análise de incidência através do método Deflexão do campo elétrico (EFD), que foi proposto recentemente, e apresenta ganhos em relação aos métodos tradicionais, uma vez que ele considera na simulação além da geometria da estrutura, alguns parâmetros físicos, como a distribuição do Campo Elétrico, permissividade relativa dos materiais existentes na estrutura a ser protegida, além da permissividade do meio dielétrico. Os três modelos de incidência mostraram a necessidade de realizar a instalação de proteção contra descargas atmosféricas diretas na estrutura. Desta forma quatro cenários de proteção foram analisados, sendo o primeiro com captor ao redor das placas, contendo molduras em alumínio (A1); já o segundo cenário, o captor fica acima dos módulos fotovoltaicos (A2), que também possui alumínio nas molduras; o cenário (B1), em que a captação se apresenta ao redor da estrutura a ser protegida, porém a moldura do painel fotovoltaico é fabricada em fibra de vidro; e o cenário (B2) em que captação é estruturada acima dos painéis fotovoltaicos e a moldura dos módulos é constituída por fibra de vidro. Nos cenários A1 e A2, a proteção contra descargas atmosféricas diretas não foi satisfatória na análise de incidência do método EFD, uma vez que houve incidência de descargas diretas nas placas. Já os cenários B1 e B2 a proteção foi satisfatória, não havendo incidência direta de descargas atmosféricas, por conta da eliminação do captor natural com a substituição da moldura de alumínio por fibra de vidro.

**Palavras-chave:** Descargas atmosféricas. Modelos de incidência. Geração distribuída fotovoltaica.



## ABSTRACT

The use of Distributed Generation (DG) is propelled by a strong tendency by consumer units to reduce their energy costs. This dissertation aims to present gains in the area of protection against lightning, applied to photovoltaic generation systems. For that, a case study was carried out in a distributed photovoltaic minigeration unit located in the northeastern semi-arid region, in the city of Mossoró, in the state of Rio Grande do Norte. In this work the incidence of atmospheric discharges is analyzed through the traditionally used and predicted methods in NBR 5419: 2015, as the protection angle model and the rolling ball technique. We also performed an incidence analysis using the EFD method, which was recently proposed, and presents gains over traditional methods, since it considers in the simulation besides the geometry of the structure, physical parameters such as field distribution electrical, relative permittiveness of existing materials and dielectric medium. The three incidence models showed the need to carry out the protection installation in the structure. In this way four protection scenarios were analyzed, being the first with captor around the plates, containing frames in aluminum (A1); already the second scenario, the captor is above the photovoltaic modules (A2), which also has aluminum in the frames; the scenario (B1), where the uptake occurs around the structure to be protected, however the photovoltaic panel frame is made of fiberglass; and the scenario (B2) in which uptake is structured above the photovoltaic panels and the frame of the modules is constituted by glass fiber. In scenarios A1 and A2, protection against direct atmospheric discharges was not satisfactory in the incidence analysis of the EFD method, since there was incidence of direct discharges on the plates. In the B1 and B2 scenarios the protection was satisfactory, not having a direct incidence of atmospheric discharges, due to the elimination of the natural captor with the replacement of the aluminum frame by fiberglass.

**Keywords:** Atmospheric discharges. Incidence models. PV system.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de uma descarga atmosférica . . . . .	20
Figura 2 – Parâmetros de um impulso de corrente . . . . .	21
Figura 3 – Desenho ilustrando os tipos de descargas atmosféricas . . . . .	23
Figura 4 – Conexões das partes da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 5419:2015 . . . . .	25
Figura 5 – Danos e perdas através do ponto de impacto . . . . .	27
Figura 6 – Ângulo de proteção de um captor Franklin . . . . .	33
Figura 7 – Técnica das esferas rolantes . . . . .	35
Figura 8 – Lugar geométrico das esferas fictícias . . . . .	35
Figura 9 – Aplicação do líder progressivo . . . . .	37
Figura 10 – Líder positivo . . . . .	38
Figura 11 – Diagrama da evolução de uma descarga atmosférica. (a) Líder descendente. (b) Circuito equivalente a um passo da descarga atmosférica. Composição vetorial do campo elétrico. (d) Líder ascendente. . . . .	39
Figura 12 – Configuração de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) do tipo Franklin . . . . .	43
Figura 13 – Configuração da gaiola de Faraday . . . . .	43
Figura 14 – Comsol Multiphysics . . . . .	45
Figura 15 – Imagem geral da planta solar da UFERSA . . . . .	46
Figura 16 – Painel Canadian Solar . . . . .	47
Figura 17 – Inversor Solis 15K . . . . .	48
Figura 18 – Subestação . . . . .	49
Figura 19 – Quadro de distribuição e proteção . . . . .	50
Figura 20 – Padrão de aterramento do local . . . . .	51
Figura 21 – Quadro com DPS . . . . .	52
Figura 22 – Ligação dos DPS . . . . .	53
Figura 23 – Dimensões do painel fotovoltaico . . . . .	54
Figura 24 – Painel fotovoltaico, vista lateral . . . . .	55
Figura 25 – Ângulo de proteção do SPDA . . . . .	56
Figura 26 – Incidência por ângulo de proteção . . . . .	56
Figura 27 – Análise de incidência de descargas atmosféricas por Esferas rolantes . . . . .	57

Figura 28 – Fluxograma de implementação do EFD no Comsol . . . . .	58
Figura 29 – Desenho da unidade de minigeração no Comsol . . . . .	59
Figura 30 – Domínio paralelepípedo (volume de ar) . . . . .	60
Figura 31 – Domínio retangular (Malha de elementos finitos) . . . . .	61
Figura 32 – Histograma da qualidade da malha . . . . .	61
Figura 33 – Potencial elétrico . . . . .	62
Figura 34 – Intensidade do campo elétrico . . . . .	63
Figura 35 – Simulação de descarga atmosférica . . . . .	64
Figura 36 – (a) topologia de proteção A ao redor das placas ; (b) topologia de proteção B sobre as placas . . . . .	65
Figura 37 – Simulação com cabo guarda abaixo da estrutura . . . . .	66
Figura 38 – Simulação com cabo guarda acima da estrutura . . . . .	67
Figura 39 – Simulação da topologia com cabo guarda ao redor da estrutura e molduras de fibra de vidro . . . . .	68
Figura 40 – Simulação da topologia com cabo guarda acima da estrutura e moldura de fibra de vidro . . . . .	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das descargas atmosféricas . . . . .	22
Tabela 2 – Expressões sugeridas para cálculo do raio de atração . . . . .	34
Tabela 3 – Raios da esfera rolante por classe de proteção . . . . .	57
Tabela 4 – Cenários de simulação . . . . .	65

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.C	Antes de Cristo
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CB	Comitês Brasileiros
CEE	Comissões de Estudos Especiais
COSEERN	Companhia Energetica do Rio Grande do Norte
DDP	Diferença de Potencial
DPS	Dispositivo de Proteção Contra Surto de Tensão
EFD	Deflexão do campo elétrico
GD	Geração distribuída
IEC	Comissão Internacional de Eletrotécnica
IN	Intra-nuvens
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LEMP	Pulso Eletromagnético devido descargas atmosféricas
MPS	Medidas de Proteção Contra Surtos
NA	Nuvem-ar
NB	Norma Brasileira
NBR	Norma Regulamentadora Brasileira
NS	Nuvem-solo
ONS	Organismos de Normalização Setorial
Rt	Risco tolerado
SN	Solo-nuvem
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas
UFERSA	Universidade Federal do Semi-árido
ZPR	Zona de proteção contra raios

## LISTA DE SÍMBOLOS

$I$	Corrente elétrica
$P$	Potência
$t$	Tempo
$V$	Tensão
$V$	Kilovolt
$A$	Ampere
$W$	Watt
$q_L$	Carga elétrica
$kW$	Kilowatt
$MW$	Megawatt
$km$	Kilômetro
$kA$	Kiloampere
$CO_2$	Dioxido de carbono
$kWp$	Kilowatt-pico
$Hz$	Frequência
$\vec{E}$	Vetor campo elétrico
$\vec{J}$	Vetor densidade de corrente
$R$	Resistência Ôhmica
$\sigma_L$	Condutividade elétrica de um canal ionizado de uma descarga atmosférica
$\lambda_t$	Comprimento do salto
$\nabla_t$	Gradiente
$\delta_t$	Delta
$Z_t$	Impedância
$A_t$	Área de uma seção transversal

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>17</b>
<b>1.3</b>	<b>Contribuição dessa dissertação</b>	<b>18</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura da dissertação</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Descargas atmosféricas</b>	<b>19</b>
<i>2.1.1</i>	<i>Histórico das descargas atmosféricas</i>	<i>19</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Conceitos básicos sobre as descargas atmosféricas</i>	<i>20</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Tipos de descargas atmosféricas</i>	<i>22</i>
<i>2.1.4</i>	<i>Descargas atmosféricas tipo nuvem-solo negativa</i>	<i>23</i>
<b>2.2</b>	<b>A NBR 5419:2015</b>	<b>24</b>
<i>2.2.1</i>	<i>Histórico da ABNT NBR 5419</i>	<i>24</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Principais modificações realizadas na NBR 5419:2015</i>	<i>24</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Parte 01: Princípios Gerais</i>	<i>26</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Parte 02: Gerenciamento do risco</i>	<i>26</i>
<i>2.2.5</i>	<i>Parte 03: Danos físicos às estruturas e perigos à vida</i>	<i>29</i>
<i>2.2.6</i>	<i>Parte 04: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura</i>	<i>29</i>
<b>2.3</b>	<b>Geração distribuída</b>	<b>30</b>
<i>2.3.1</i>	<i>Geração de energia fotovoltaica</i>	<i>31</i>
<i>2.3.2</i>	<i>Principais componentes presentes no sistema fotovoltaico</i>	<i>31</i>
<b>2.4</b>	<b>Modelos de incidência de descargas atmosféricas</b>	<b>32</b>
<i>2.4.1</i>	<i>Ângulo de proteção</i>	<i>32</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Modelo eletrogeométrico e a técnica das esferas rolantes</i>	<i>33</i>
<i>2.4.3</i>	<i>Modelo do líder progressivo</i>	<i>36</i>
<i>2.4.4</i>	<i>Modelo da Deflexão do Campo Elétrico</i>	<i>37</i>
<i>2.4.4.1</i>	<i>Aproximação Eletrostática</i>	<i>41</i>
<b>2.5</b>	<b>Métodos de proteção contra descargas atmosféricas</b>	<b>42</b>
<i>2.5.1</i>	<i>Método de “Franklin”</i>	<i>42</i>
<i>2.5.2</i>	<i>Gaiola de Faraday</i>	<i>43</i>

2.6	Método dos elementos finitos . . . . .	44
2.6.1	<i>Ferramenta computacional COMSOL Multiphysics</i> . . . . .	45
3	<b>IDENTIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DA PLANTA</b> . .	46
3.1	Painéis fotovoltaicos . . . . .	46
3.2	Inversores . . . . .	47
3.3	Subestação de distribuição . . . . .	49
3.4	Proteções elétricas . . . . .	50
3.5	Sistema de aterramento . . . . .	51
3.6	Proteção contra descargas atmosféricas . . . . .	52
4	<b>ESTUDO DE CASO</b> . . . . .	54
4.1	Análise de incidência de descargas atmosféricas na planta . . . . .	54
4.1.1	<i>Análise de incidência - ângulo de proteção</i> . . . . .	55
4.1.2	<i>Análise de incidência - esferas rolantes</i> . . . . .	56
4.1.3	<i>Análise de incidência - EFD</i> . . . . .	57
4.2	Topologias de proteção . . . . .	64
4.2.1	<i>Cenário A1</i> . . . . .	66
4.2.2	<i>Cenário B1</i> . . . . .	67
4.2.3	<i>Cenário A2</i> . . . . .	67
4.2.4	<i>Cenário B2</i> . . . . .	68
5	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	70
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	71
	<b>APÊNDICES</b> . . . . .	73
	<b>APÊNDICE A – Ground’2018 &amp; 8<sup>th</sup> LPE</b> . . . . .	73



## 1 INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas certamente estão entre os fenômenos naturais mais relevantes da humanidade, uma vez que seu estudo está relacionado à segurança das pessoas, dos animais e à proteção de estruturas e equipamentos. Na antiguidade, as descargas atmosféricas eram associadas a deuses e divindades, inclusive os símbolos das descargas atmosféricas foram utilizados em desenhos produzidos por gregos em 700 Antes de Cristo (a.C), pois este fenômeno era atribuído a Zeus (RAKOV; UMAN, 2003).

Diante do grande crescimento tecnológico e demográfico que o mundo sofreu nos últimos anos, houve uma elevação significativa do risco de falhas ocasionadas pelas descargas atmosféricas, dentre as quais podemos citar as linhas de transmissão, os sistemas computacionais, as edificações e os sistemas de geração de energia.

As descargas atmosféricas são fenômenos naturais que sempre despertaram interesse dos seres humanos por conta de sua aparência, ruído e pelas ameaças que representam à vida e às estruturas. Pesquisas permitiram a criação de técnicas de detecção de descargas atmosféricas, sendo estas amplamente utilizadas atualmente (BETZ.; SCHUMANN, 2009).

Segundo o levantamento de dados realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Brasil é o país que possui a maior incidência de descargas atmosféricas no mundo, anualmente são cerca de 50 milhões de descargas, obtendo, assim, uma média de 137 mil ocorrências por dia (GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA, 2015).

As descargas atmosféricas sempre foram muito atreladas à segurança de edificações e estruturas, porém com o crescimento significativo das fontes renováveis de energia e o surgimento da geração distribuída, na qual destacamos principalmente a fotovoltaica, está surgindo grande quantidade de unidades de microgeração e minigeração fotovoltaicas distribuídas.

A conversão da energia solar em energia elétrica é realizada através dos painéis fotovoltaicos, cuja instalação física normalmente é localizada na área superior das edificações, podendo também ser instalado no nível natural do terreno, em situações que não exista sombreamento, dito isso existe possibilidade de que se tornem um ponto de captação de descargas atmosféricas, existindo risco de danificar os painéis fotovoltaicos, acarretando em uma possível descontinuidade de geração de energia elétrica.

## 1.1 Justificativa

Sabendo que uma descarga atmosférica pode causar grandes danos às edificações, às pessoas e aos sistemas elétricos, surgiu a necessidade de se realizar um estudo voltado à proteção de um sistema de minigeração distribuída localizado dentro de uma Universidade no município de Mossoró, no estado do Rio Grande do Norte, verificando se esta se encontra protegida sob os modelos de incidência amplamente utilizados, e por uma técnica de simulação eletroestática por elementos finitos, em que nela se leva em consideração a característica do ar atmosférico da região, além dos materiais empregados no sistema de Geração distribuída (GD).

## 1.2 Objetivos

Em vista destas considerações, o presente trabalho tem como objetivo geral realizar a análise de incidência de descargas atmosféricas, em uma unidade de minigeração fotovoltaica distribuída com potência de geração de 150 kW, através de uma simulação eletroestática denominada EFD, sigla do Inglês para *Electric Field Deflection*, comparando-a com métodos amplamente utilizados, como o ângulo do cone de proteção e a técnica das esferas rolantes, além de sugerir uma topologia de proteção ideal para o sistema. Para isso é apresentado a aplicação do método dos elementos finitos através do software, para cálculo e verificação da distribuição de campos elétricos e potenciais nos painéis fotovoltaicos.

A partir do objetivo geral, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar as características gerais da planta;
- Realizar a análise de incidência de descargas atmosféricas na planta através do modelo do ângulo de proteção;
- Realizar a análise de incidência de descargas atmosféricas na planta através da técnica das esferas rolantes;
- Realizar a análise de incidência de descargas atmosféricas na planta, através do método de deflexão do campo elétrico utilizando o software de simulação computacional por elementos finitos Comsol;
- Sugerir uma topologia de proteção para a planta de minigeração fotovoltaica distribuída.

### 1.3 Contribuição dessa dissertação

A principal contribuição desse trabalho é validar a utilização do método de simulação eletroestática EFD através de elementos finitos, para servir como auxílio na elaboração de projetos de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas. Dessa forma, a arquitetura e o posicionamento dos captadores seriam mais confiáveis, possibilitando que a topologia de proteção empregada seja mais robusta. Como forma de validar a eficácia do EFD no auxílio da engenharia de proteção contra descargas atmosféricas, é realizado um estudo de caso em uma unidade de minigeração distribuída.

### 1.4 Estrutura da dissertação

Para alcançar os objetivos que foram propostos, esta dissertação apresenta, além do presente capítulo, demais estruturados da seguinte forma:

- Capítulo 2: Fundamentação teórica. Neste capítulo é apresentada toda a fundamentação teórica que vai servir como base para elaboração dessa dissertação. Inicialmente é abordado o fenômeno de formação das descargas atmosféricas, assim como os tipos de descargas existentes; também é apresentada a metodologia para análise da necessidade técnica de um SPDA, segundo a NBR 5419:2015. São explanados também os modelos de incidência de descargas atmosféricas, métodos de proteção contra descargas atmosféricas, além da teoria dos elementos finitos.
- Capítulo 3: Características gerais e identificação da planta. Nele é apresentado o detalhamento da planta de minigeração distribuída fotovoltaica da Universidade Federal do Semi-árido Universidade Federal do Semi-árido (UFERSA), escolhida como objetivo de estudo da dissertação, identificando as características gerais da planta, como arquitetura, equipamentos elétricos e eletrônicos presentes na unidade.
- Capítulo 4: Estudo de caso. Neste capítulo é realizado a análise de incidência de descargas atmosféricas utilizando os métodos do ângulo de proteção, técnica das esferas rolantes e o modelo EFD, verificando a eficácia dos três, e as principais contribuições de cada, posteriormente é sugerido uma topologia de proteção baseada nas análises realizadas, a fim de garantir que o sistema esteja protegido.
- Capítulo 5: Conclusão. Por fim, este capítulo tem como objetivo apresentar as discussões e as considerações finais desta dissertação.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem por finalidade, apresentar os conceitos básicos necessários para entendimento desta dissertação. Inicialmente é fundamentado a teoria de formação das descargas atmosféricas, assim como explanado o seu histórico ao longo dos anos. Por conseguinte é realizado o estudo da NBR 5419:2015, com objetivo de entender os critérios de análise e proteção contra descargas atmosféricas, além de serem explicadas a teoria dos elementos finitos, a análise de incidência de descargas atmosféricas e as topologias de proteção.

### 2.1 Descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas sempre foram um fenômeno admirado e temido por toda civilização, alguns povos atribuíam este fenômeno aos deuses e divindades que os lançavam sobre a terra como sinal de reprovação, ou de que haveria tempos prósperos para a lavoura. Outros povos associavam que os raios eram produzidos pelas batidas de um poderoso martelo, que o efeito estrondoso originava os raios e trovões (BORTOLADO, 2017).

#### 2.1.1 *Histórico das descargas atmosféricas*

O cientista e inventor americano Benjamin Franklin (1706-1790), ficou conhecido internacionalmente por conta de suas descobertas sobre a eletricidade e, também por conseguir demonstrar que os raios são fenômenos de natureza elétrica.

Franklin desenvolveu um experimento, a fim de comprovar que as descargas atmosféricas eram de origem a própria natureza, ele fez uma pipa voar presa a um condutor metálico aterrado, durante uma forte chuva. Dessa forma, foi possível que ele comprovasse que as descargas atmosféricas ocorriam de forma natural. Apesar desses fatos serem relatados em seus escritos, ainda hoje é questionado se ele realmente realizou esse experimento.

A partir desse experimento, Benjamin Franklin propôs que se houvesse um transporte das descargas atmosféricas através de hastes metálicas até o solo, pois desse modo seria possível impedir que os raios atingissem qualquer estrutura ao seu redor. Sugeriu que fosse colocado, acima das casas, uma ponta metálica com hastes em contato com a terra, propiciando a condução da corrente elétrica sem que o raio causasse danos às estruturas circunvizinhas. Com isso, surgia o pára-raio e este é o conceito de um dos métodos de proteção contra descargas atmosféricas ser conhecido como método Franklin (BORTOLADO, 2017).

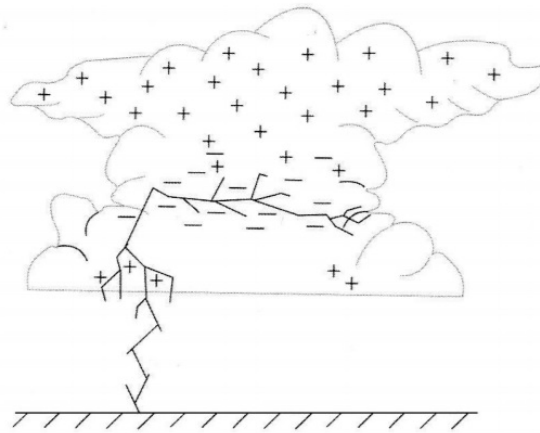
### 2.1.2 Conceitos básicos sobre as descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas, como o próprio nome sugere, são descargas elétricas que ocorrem na atmosfera, possuindo a duração geralmente menor que um segundo e magnitude de corrente na ordem de milhares de amperes (RAKOV; UMAN, 2003).

Ela consiste em um fenômeno complexo, e se apresenta como uma corrente impulsiva de alta intensidade e curta duração, em que o percurso de alguns quilômetros parte de uma nuvem podendo até atingir a superfície da terra (VISACRO, 2005).

A característica impulsiva da corrente se deve ao fato de em um reduzido período de tempo (ordem de microssegundos) a amplitude da corrente elétrica alcança o seu valor de crista, que se caracteriza como o máximo valor atingido (VISACRO, 2005).

Figura 1 – Exemplo de uma descarga atmosférica



Fonte: Visacro (2005)

Uma descarga atmosférica pode atingir temperaturas superiores a 3.000 graus Celsius, esse aquecimento associado resulta em um efeito luminoso conhecido como relâmpago, além da expansão abrupta do ar circunvizinho ao canal com o deslocamento de uma onda sonora, conhecido como trovão (VISACRO, 2005).

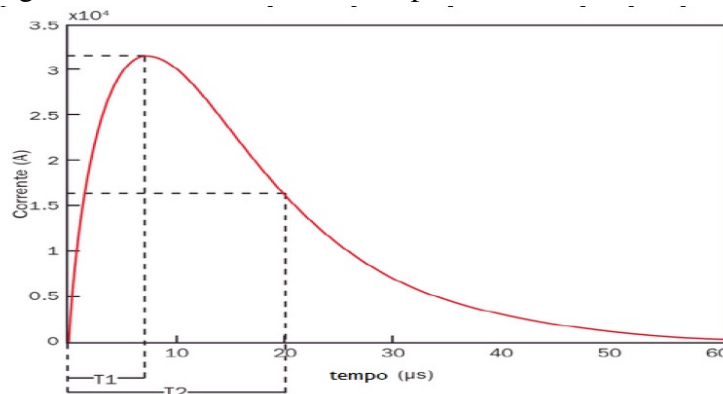
A cada segundo, cai sobre a Terra aproximadamente cerca de 50 a 100 raios, o que equivale a 10 milhões de descargas por dia ou três bilhões por ano, acarretando em prejuízos e mortes. Entre os anos 2000 e 2012, foram registradas 1.601 mortes causadas por descargas atmosféricas (SILVA, 2015, Citado na página 19).

Para que exista uma descarga atmosférica, é necessário que exista o carregamento de uma nuvem com cargas elétricas positivas e negativas, porém não existe um consenso até

hoje sobre o processo de eletrificação das nuvens, existindo uma teoria sobre a precipitação das nuvens, na qual partículas pesadas tendem a descer e as mais leves sobem. Com isso, existe a separação das cargas e a formação de um dipolo devido às correntes de ar ascendentes (SUETA, 2005).

Dentro do curto período de tempo de ocorrência de uma descarga atmosférica, podem ser destacados três momentos. O tempo de subida ou de frente (tempo para que o raio atinja o valor máximo), tempo de meia onda ou de meio valor (tempo necessário para que o raio atinja 50% do valor de pico) e a cauda da onda (intervalo a partir do tempo de subida, seguido por um período mais longo e suave no qual a corrente decai até desaparecer), conforme pode ser observado no desenho da Figura 02.

Figura 2 – Parâmetros de um impulso de corrente



Fonte: ABNT (2015)

Em que:

O1 = origem virtual;

I = corrente de pico;

T1 = tempo de frente;

T2 = tempo até meio valor;

i = polaridade.

A descarga atmosférica é iniciada quando o campo elétrico produzido por estas cargas supera a capacidade isolante do ar, também conhecida como rigidez dielétrica, que pode ser dentro da nuvem ou próximo ao solo. Uma vez quebrada essa rigidez, se inicia um rápido movimento de elétrons de uma região de cargas negativas para uma região de cargas positivas. Existem diversos tipos de descargas, classificadas em função do local onde se originam e do local onde terminam (VISACRO, 2005).

Os valores médios das grandezas físicas das descargas atmosféricas são mostrados na tabela 01.

Tabela 1 – Características das descargas atmosféricas

Parâmetros	Valores	Unidade
Corrente	2000 a 200.000	A
Tensão	100 a 1.000.000	kV
Duração	70 a 200	s
Carga elétrica da nuvem	20 a 50	C
Potência liberada	1000 a 8.000 milhões	kW
Energia	4 a 10	kWh
Tempo de crista	1,2	s
Tempo de meia cauda	50	s

Fonte: o autor

### 2.1.3 Tipos de descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas podem ser divididas de dois modos distintos: descargas diretas e indiretas.

A descargas diretas ocorrem quando o canal principal incide diretamente sobre determinados objetos, sendo responsável por ocasionar os danos mais severos. Uma descarga direta sobre uma edificação, por exemplo, pode destruir paredes, fundir materiais metálicos, danificar e/ou destruir antenas e cabos de comunicações, entre outros (VISACRO, 2005).

Já as descargas indiretas os efeitos ocorrerá distante do ponto de queda do raio. Quando o líder descendente se encontra com o ascendente e o circuito é fechado, ocorre uma descarga de grande intensidade fazendo com que o canal ionizante alcance altas temperaturas produzindo elevados campos eletromagnéticos produzidos em torno deste canal principal (VISACRO, 2005).

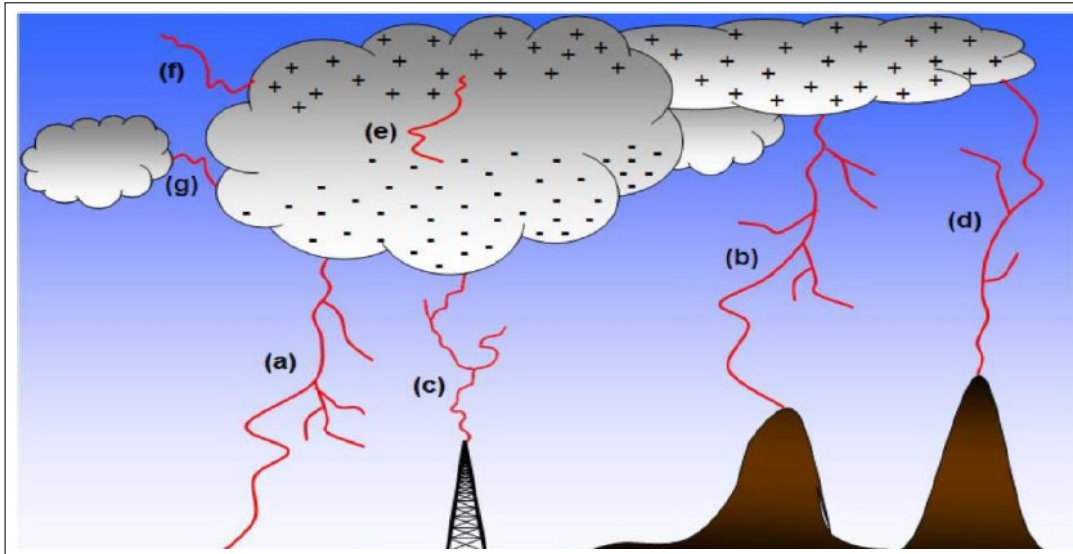
As descargas atmosféricas também podem ser classificadas em: Intra-nuvens (IN), Nuvem-ar (NA), Nuvem-solo (NS) ou descendentes e Solo-nuvem (SN) ou ascendentes. Os raios que vão para o solo recebem também duas classificações, que são os positivos (+NS) e os negativos (-NS), onde os positivos são os que transferem carga líquida positiva para o solo e os negativos são os que transferem carga líquida negativa para o solo.

De forma semelhante ocorre com os ascendentes, que são originados geralmente por estruturas altas como torres e possuem cargas positivas no seu canal principal (mas mesmo assim, podem transferir carga líquida negativa para o solo).

As descargas intra-nuvens são as mais comuns entre as citadas, é estimado que elas representam cerca de 80% do total dentre os diversos tipos de descargas atmosféricas (PINTO JUNIOR; PINTO, 2000).

Devido as grandes catástrofes que podem ser causadas, as descargas tipo NS são as mais importantes a serem estudadas (SHIGIHARA, 2005).

Figura 3 – Desenho ilustrando os tipos de descargas atmosféricas



Fonte: adaptado da Romero (2005)

#### 2.1.4 Descargas atmosféricas tipo nuvem-solo negativa

Para a engenharia de proteção, as descargas atmosféricas tipo nuvem-solo são as mais importantes. Elas são classificadas quanto à sua polaridade, podendo ser positiva ou negativa. As descargas negativas realiza a transferências de elétrons, e a descargas positivas são representadas essencialmente por prótons e outros íons positivos. A maioria das descargas nuvem-solo possuem polaridade negativa Visacro (2005).

A formação de uma descarga tipo nuvem-solo negativa ocorre através do carregamento da base de uma nuvem com cargas elétricas negativas, induzindo no solo uma enorme concentração de cargas elétricas com sinal contrário, ocorrendo uma repulsão de elétrons na superfície do solo.

Diante do exposto, existem duas regiões cujas cargas possuem polaridades opostas, gerando assim um intenso campo elétrico, sob várias centenas de megavolts, cujo sentido do vetor a ele associado é do solo para a nuvem (VISACRO, 2005).



## **2.2 A NBR 5419:2015**

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), foi fundada no ano de 1940 como uma organização privada sem fins lucrativos. A ABNT é responsável pela elaboração das normas técnicas brasileiras através de seus Comitês Brasileiros (CB) (ABNT/CB), Organismos de Normalização Setorial (ONS) (ABNT/ONS) e Comissões de Estudos Especiais (CEE) (ABNT/CEE).

A ABNT NBR 5419 é a norma responsável pela proteção contra descargas atmosféricas no Brasil. Seu histórico, principais modificações e aspectos gerais serão abordados nas subseções a seguir.

### ***2.2.1 Histórico da ABNT NBR 5419***

A NBR 5419 foi publicada em 1977, a partir de uma revisão da norma Norma Brasileira (NB)-1-65. Em 1993 a norma sofreu alterações significativas em relação a sua versão anterior. No ano de 2001 a NBR 5419 revisou a sua versão do ano de 1993, baseando-se na norma da Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC) 61.024 (Proteção de Estrutura Contra Raios).

No ano de 2005 a NBR 5419 passou por mais uma revisão, foi criada a Emenda 1, na qual foram substituídas tabelas e figuras baseadas em novos parâmetros da corrente da descarga atmosférica.

Em janeiro de 2006 a norma IEC 61.024 ganhou uma nova versão totalmente reformulada, passando a se chamar IEC 62.305, havendo a sua subdivisão em quatro volumes, sendo eles: princípios gerais, gerenciamento de risco, danos físicos e proteção de sistemas elétricos e eletrônicos no interior de estruturas protegidas. A alteração da norma IEC, na qual era baseada a ABNT NBR 5419 de 2005 acarretou em um projeto de revisão da norma brasileira.

Após dez anos de estudo baseados na norma IEC 62.305, a nova versão da ABNT 5419 foi publicada no ano de 2015, a partir de uma drástica alteração da anterior, culminando em uma norma muito mais robusta e mais detalhada.

### ***2.2.2 Principais modificações realizadas na NBR 5419:2015***

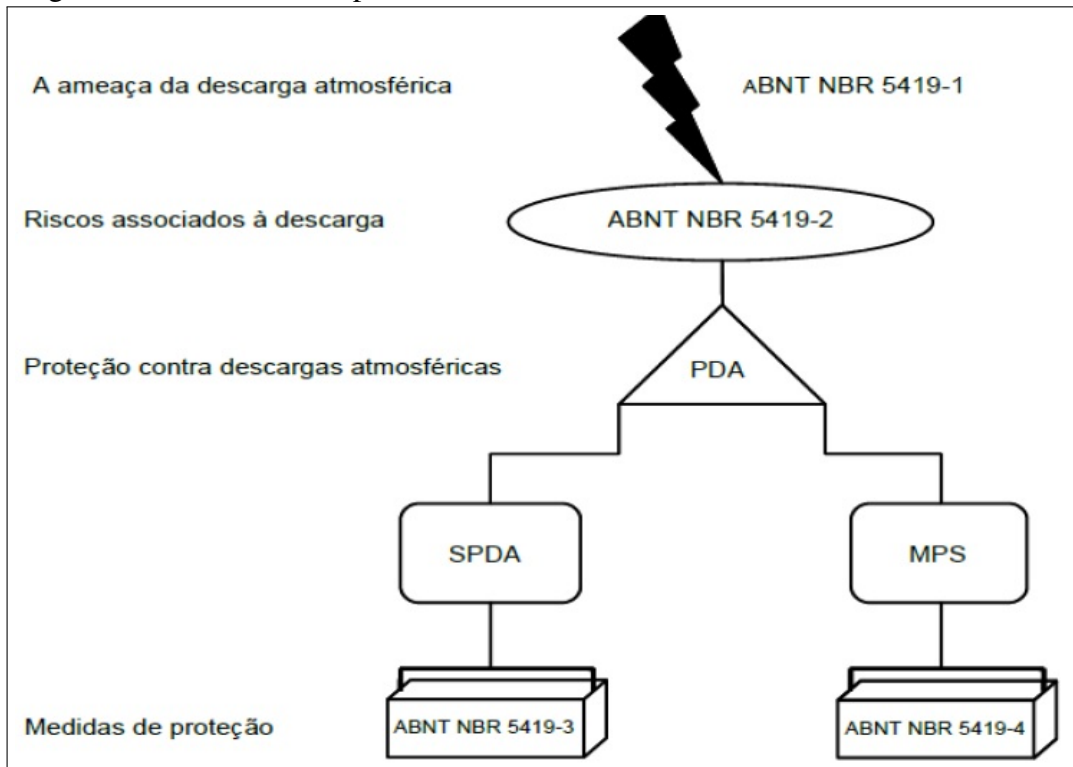
A mudança mais notável é na quantidade total de páginas da norma atual (ano de 2015), passando de quarenta e duas páginas em 2005 para mais de trezentas, além da divisão da

norma em quatro partes:

- Parte 01: Princípios gerais;
- Parte 02: Gerenciamento de risco;
- Parte 03: Danos físicos às estruturas e perigo de vida;
- Parte 04: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura (ABNT, 2015).

Na Figura 4, pode ser verificado as conexões entre as partes da ABNT NBR 5419:2015 através de um fluxograma, em que temos uma ameaça de descarga atmosférica (parte 01), com seus devidos riscos associados (parte 02), além de uma escolha de topologia de proteção, que pode ser realizado através de um SPDA (parte 03) ou com uso de Medidas de Proteção Contra Surtos (MPS) (parte 04).

Figura 4 – Conexões das partes da ABNT NBR 5419:2015



Fonte: adaptado da ABNT (2015)

Outra mudança significativa da norma foi o acréscimo do conteúdo abordado na parte 4, que detalha a proteção de equipamentos eletroeletrônicos no interior da estrutura utilizando as chamadas MPS, e trata basicamente de aspectos gerais ligados à compatibilidade eletromagnética e proteção para equipamentos elétricos e eletrônicos.

Também houve modificação em relação a engenharia de proteção, como por exemplo a alteração dos condutores de descida, que anteriormente poderiam possuir secção transversal

de 16 mm<sup>2</sup>, e com a atualização de 2015, os cabos passaram a ser de no mínimo 35 mm<sup>2</sup>. A continuidade elétrica da armadura de concreto armado também foi um parâmetro importante alterado, atualmente seus valores de medição devem ser iguais ou inferior a 0,2 ohms, bem menor do que o valor anterior da norma que era de 1 ohm. Para o sistema de aterramento foi retirado a obrigatoriedade de se realizar o ensaio de medição ôhmica, cujo valor sugerido máximo era de 10 ohms.

### **2.2.3 Parte 01: Princípios Gerais**

A NBR 5419-1:2015 trata de forma geral como deve ser realizada a proteção contra descargas atmosféricas, descrevendo a teoria envolvida para viabilizar a elaboração de projetos. Na norma também são definidos parâmetros importantes, dentre os quais podemos citar: correntes das descargas, níveis de proteção do sistema, taxas de subida e durações dos impulsos de corrente, além de descrever os principais danos causados pelas descargas atmosféricas que podem impactar diretamente as estruturas ou sua circunvizinhança.

Esta primeira parte da ABNT NBR 5419:2015 estabelece que a necessidade de um objeto ser protegido contra descargas atmosféricas deve ser avaliada, de modo a reduzir as perdas de valor social L1, L2, L3 e L4 sendo L1: perda de vida humana; L2: perda de serviço ao público; L3: perda de patrimônio cultural; L4: perda de valor econômico.

Para avaliar se existe necessidade de construir um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, deve ser realizada uma avaliação de risco, de acordo com procedimentos recomendados pela NBR 5419-2. A proteção contra descargas atmosféricas é necessária se o risco calculado for maior que o risco tolerado de referência da norma.

### **2.2.4 Parte 02: Gerenciamento do risco**

Na parte 02 é realizado um estudo sobre a estrutura, indicando parâmetros ao redor como as linhas elétricas existentes, indicando também as medidas de proteção à estrutura, às pessoas e aos equipamentos, a fim de verificar se o risco encontra-se dentro de limites toleráveis.

Para avaliar se uma estrutura precisa ou não ser protegida, é necessário realizar um estudo com as fontes de danos às estruturas decorrentes das descargas atmosféricas, sendo consideradas quatro situações bem definidas: descarga na estrutura, na proximidade da estrutura, na rede elétrica e na proximidade da rede.

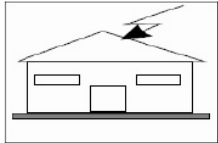
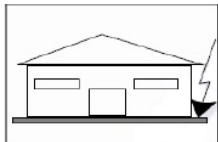
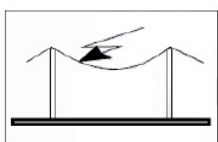
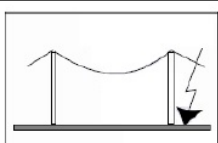
São considerados três tipos de danos: ferimentos em seres vivos, danos à estruturas

e falhas nos sistemas elétricos e eletrônicos.

Entende-se como risco, o valor de uma provável perda média anual de vida e bens devido às descargas atmosféricas, em relação ao valor total dos objetos a serem protegidos. Riscos esses que têm dependência do valor do número anual de descargas atmosféricas que influenciam a estrutura, da probabilidade de dano causado por uma das descargas atmosféricas que podem influenciar nesta estrutura e da quantidade média das consequentes perdas.

A Figura 5, relaciona as fontes de danos, tipos de danos e de perdas de acordo com o ponto de impacto da descarga atmosférica.

Figura 5 – Danos e perdas através do ponto de impacto

Descarga atmosférica		Estrutura	
Ponto de impacto	Fonte de danos	Tipo de danos	Tipo de perdas
	S1	D1 D2 D3	L1, L4 <sup>a</sup> L1, L2, L3, L4 L1 <sup>b</sup> , L2, L4
	S2	D3	L1 <sup>b</sup> , L2, L4
	S3	D1 D2 D3	L1, L4 <sup>a</sup> L1, L2, L3, L4 L1 <sup>b</sup> , L2, L4
	S4	D3	L1 <sup>b</sup> , L2, L4
<sup>a</sup> Somente para propriedades onde animais possam ser perdidos. <sup>b</sup> Somente para estruturas com risco de explosão ou para hospitais ou outras estruturas onde falhas de sistemas internos podem imediatamente colocar em perigo a vida humana.			

Fonte: adaptado da ABNT (2015)

Conforme observado é necessário a realização de cálculos referente aos riscos de uma determinada estrutura, o risco vai depender do número anual de descargas atmosféricas que incidem na estrutura ou próximo a ela.

A NBR 5419-1:2015 julga necessário a existência de proteção caso o risco R (R1 a R4) for maior do que o Risco tolerado (Rt) (ABNT, 2015).

Esses componentes de riscos podem ser analisados através de equações básicas. A seguir será exposto como realizar o equacionamento desses riscos.

Tais componentes se relacionam através dos equacionamentos a seguir:

$$R_x = N_x \times P_x \times L_x. \quad (2.1)$$

Em que:

- a)  $N_x$  é o número de eventos perigosos por ano;
- b)  $P_x$  é a probabilidade de dano a estrutura;
- c)  $L_x$  é a perda consequente.

Deve se utilizar esse equacionamento para análise dos componentes  $R_a$ ,  $R_b$ ,  $R_c$ ,  $R_m$ ,  $R_u$ ,  $R_v$ ,  $R_w$  e  $R_z$ .

Em que:

- $R_a$ : componente relativo a ferimentos aos seres vivos causados por choque elétrico devido a tensões de passo e de toque em distâncias de até 03 m do lado de fora da estrutura;
- $R_b$ : 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 devido à falha de sistemas internos causados por LEMPs (pulsos eletromagnéticos devido aos raios) por conta de descargas que atingem a estrutura;
- $R_m$ : Falha de sistemas internos causada por LEMPs devido às descargas que atingem áreas perto da estrutura;
- $R_u$ : componente relativo a ferimentos aos seres vivos causados por choque elétrico por causa das tensões de toque e passo dentro da estrutura ocasionadas por descargas que atingiram a linha elétrica conectada à 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 ao longo das linhas;
- $R_w$ : Componente relativo a falhas de sistemas internos causados por sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura e são transmitidas a esta;
- $R_z$ : Componente relativo a falhas de sistemas internos causados por sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura e são transmitidas a esta, geralmente em estrutura com risco de explosão, hospitais e outras com riscos de vida por falha de sistemas internos. (ABNT, 2015).

### **2.2.5 Parte 03: Danos físicos às estruturas e perigos à vida**

Na parte 03 da NBR 5419:2015, é relatada a proteção ao redor e no interior de uma determinada estrutura contra lesões a seres vivos e danos físicos. Assim, é considerado por ela que a parte mais eficaz é o SPDA, sistema que pode ter uma proteção interna e uma externa.

O SPDA de proteção externa é destinado a captar as descargas atmosféricas através do subsistema de captação. Conduzir a corrente da descarga atmosférica pelo subsistema de descidas e, por fim, dispersar essa corrente para a terra através do subsistema de aterramento.

Já o SPDA interno é destinado a mitigar os riscos de centelhamentos perigosos dentro da estrutura protegida pelo SPDA externo, através de ligações equipotenciais do sistema de aterramento de equipamentos elétricos, além de estruturas metálicas condutoras estranhas à instalação elétrica.

A parte 03 também visa munir o projetista de informações importantes para elaboração de um projeto, como por exemplo:

- Definição da arquitetura do subsistema de captação;
- Relação dos espaçamentos dos condutores de descidas;
- Especificação de materiais para o subsistema de aterramento;
- Critérios para elaboração de manutenção e inspeção de um SPDA;
- Proteção contra tensão de passo e toque;
- Parâmetros de equipotencialização.

### **2.2.6 Parte 04: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura**

Os equipamentos eletrônicos sofrem bastante com as descargas atmosféricas, haja vista que a corrente de uma descarga atmosférica pode atingir magnitude bastante elevada podendo acarretar falhas em seu funcionamento, dentre as quais podemos citar os surtos conduzidos e induzidos pelos condutores conectados ao sistema. Para que exista a proteção dos equipamentos eletrônicos, é necessário a implementação de medidas adicionais, tais como a instalação de Dispositivo de Proteção Contra Surto de Tensão (DPS) (ABNT, 2015).

Os surtos de tensão na estrutura podem se originar a partir de fontes externas ou internas à própria estrutura. Quando o surto é de origem externa à estrutura eles são provenientes das descargas atmosféricas que atingem as linhas na estrutura, ou o solo próximo a elas, e são transmitidos aos sistemas elétricos e eletrônicos dentro da estrutura por meio destas linhas. Já

os surtos com origem interna à estrutura são criados por descargas atmosféricas que atingem a própria estrutura ou o solo próximo a ela.

Quando temos um impacto direto sobre a estrutura, é constatado tanto o acoplamento magnético, efeito entre um componente do SPDA e um condutor que corre paralelamente a ele, como também o acoplamento resistivo, efeito entre os condutores de proteção e as estruturas metálicas que são interligadas a esses componentes. Os surtos de tensão que ocorrem através de um acoplamento resistivo podem gerar descargas perigosas, pois contêm energia suficiente para iniciar um incêndio ou destruir equipamentos. O acoplamento resistivo entre as partes condutoras também provoca o aparecimento de tensões perigosas de passo e de toque.

No caso do impacto indireto sobre a estrutura, falamos apenas do acoplamento magnético. Os surtos de tensão são gerados pelo campo magnético variante associado a corrente em alta frequência do raio que faz contato com as partes metálicas condutoras da estrutura (FINDER, 2012).

A proteção contra Pulso Eletromagnético devido descargas atmosféricas (LEMP) é baseada na teoria das Zona de proteção contra raios (ZPR), que visa assegurar uma redução gradual das sobretensões ocasionadas por conta das descargas atmosféricas. Ele consiste em dividir a instalação em diversos volumes, que são as zonas de proteções.

Cada zona é caracterizada por um nível máximo de sobretensão e de corrente de surto admissível. Os níveis são especificados de acordo com as características elétricas dos dispositivos presentes nesta zona de proteção. Para isto, é necessária a instalação de um DPS específico para uma determinada zona de proteção, ou seja, quando é realizado a instalação de um DPS, é criada de uma nova zona de proteção.

### **2.3 Geração distribuída**

O termo GD é usualmente empregado para designar a geração distribuída que pode ser caracterizada como a geração de energia elétrica localizada próximo ao seu consumo, além disso ela dispensa o uso de acumuladores de energia, uma vez que a energia produzida pode ser consumida pelas cargas de um determinado sistema ou injetada diretamente na rede elétrica da concessionária local de energia.

A GD apresenta grande vantagem em comparação com a geração centralizada (gerada em grandes centros) que é a redução significativa das perdas de energia em virtude da geração está próximo aos centros de consumo, outra grande vantagem da GD é a possibilidade de

armazenamento da energia por ela suprida nos grandes reservatórios das hidrelétricas, e também, um melhor aproveitamento da sazonalidade à qual alguns tipos de geração estão associados.

A GD pode ser classificada em grande, médio e pequeno porte quanto à magnitude de potência instalada. Normalmente as instalações de pequeno e médio porte abastecem residências e pequenos empreendimentos comerciais, já as instalações de grande porte podem fornecer energia para indústrias e grandes centros comerciais.

Existe também o conceito de micro e minigeração, que também é aplicado à potência instalada do sistema elétrico de geração. No Brasil temos as seguintes definições:

Microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a  $75\text{ kW}$  e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, biomassa ou coogeração qualificada, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica com potência instalada superior a  $75\text{ kW}$  e menor ou igual a  $3\text{ MW}$  para fontes hídricas, já para outras fontes é considerada potência instalada superior a  $75\text{ kW}$  e inferior ou igual a  $5\text{ MW}$  (ANEEL687, 2015).

### ***2.3.1 Geração de energia fotovoltaica***

A geração de energia fotovoltaica, funciona através do efeito fotovoltaico, fenômeno descoberto em 1839, por Edmond Becquerel, quando uma célula eletroquímica submetida à irradiação solar apresentou uma Diferença de Potencial (DDP) nos seus extremos, que interligados por um fio condutor resultou no estabelecimento de corrente elétrica.

Em 1876 foi desenvolvido o primeiro sistema fotovoltaico, por W. G. Adams. Mais de cem anos da descoberta do efeito, em 1956 iniciou-se a produção industrial dos painéis, sendo fabricadas, nos Laboratórios Bell nos Estados Unidos, as primeiras células fotovoltaicas possuíam eficiência muito baixa (PINHO JOAO T ; MARCO, 2014).

### ***2.3.2 Principais componentes presentes no sistema fotovoltaico***

Os principais componentes presentes em um sistema fotovoltaico são as células, módulos e os inversores. As células fotovoltaicas são fabricadas através de materiais semicondutores (normalmente de silício), sendo caracterizada como a unidade fundamental para a conversão de energia radiante do sol em eletricidade.

O módulo fotovoltaico é formado a partir da conexão de várias células fotovoltaicas,



usualmente ligadas em série, com a finalidade de obter resistência mecânica as intempéries ocasionadas pelo ambiente, além de garantir parâmetros elétricos de tensão e corrente, uma vez que uma célula típica produz menos de 3 Wp, com uma tensão de aproximadamente 0,5 V.

As células são prensadas dentro de lâminas plásticas, na parte frontal é acrescida a lâmina de vidro, ao passo que ao redor da placa é instalado uma moldura normalmente constituída de alumínio, que é o mais utilizado. Existe também a possibilidade de se utilizar um material isolante, como a fibra de vidro. A associação de módulos fotovoltaicos, em série e/ou paralelo, resultará no arranjo fotovoltaico (PINHO JOAO T ; MARCO, 2014).

O inversor é o equipamento eletrônico que realizar a conversão de energia em corrente contínua gerada pelo arranjo fotovoltaico, para energia em corrente alternada viabilizando a sua utilização na rede elétrica. Ele possui a característica de funcionar como fonte de corrente para o sistema elétrico, pois opera em paralelo com a rede elétrica, fornecendo um fluxo de potência em fase e com características muito similares ao da rede elétrica, possibilitando o paralelismo (URBANETZ, 2012).

Os inversores possuem uma função de monitoramento contínuo de alguns parâmetros da rede elétrica que operam em paralelo, sendo os três principais parâmetros: tensão, frequência e impedância da rede elétrica.

## **2.4 Modelos de incidência de descargas atmosféricas**

Os principais modelos para análise de incidência de descargas atmosféricas são: Método do ângulo de proteção, Técnica das esferas rolantes e o Modelo do líder progressivo. Abaixo são descritos cada um deles, e também será descrito um modelo recentemente proposto na literatura, que é baseado na deflexão do campo eletrostático, denominado e EFD.

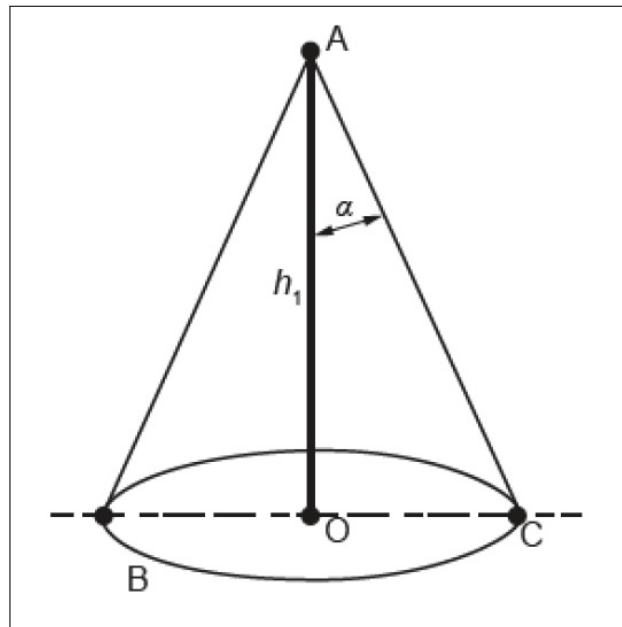
### **2.4.1 Ângulo de proteção**

O modelo do ângulo de proteção é um dos mais empregados na análise de incidências de descargas atmosféricas, foi a primeira convenção de delimitação da zona de proteção, a mesma foi elaborada por um comitê em que Benjamin Franklin era membro (CAVENDISH *et al.*, 1773).

Ele é baseado na criação de um ângulo entre a ponta da haste vertical e uma linha que deve ser projetada até a superfície, conforme pode ser observado na Figura 06. O ângulo varia de acordo com a altura da haste e a classe de proteção, essa variação se apresenta na ordem de 23° a 80°.

Esse método é empregado em edifícios, principalmente os que possuem altura inferior a 60 metros. Para sabermos se uma dada estrutura está dentro do volume de proteção, verifica-se a posição dos captores tanto em plantas como em elevação e cortes laterais (ABNT, 2015).

Figura 6 – Ângulo de proteção de um captor Franklin



Fonte: ABNT (2015)

#### 2.4.2 Modelo eletrogeométrico e a técnica das esferas rolantes

É fundamentado no conceito de raio de atração, que pode ser caracterizado na distância estimada entre um canal descendente e a estrutura conectada à terra, na qual existirá um seccionamento do percurso entre o canal descendente e ascendente.

De acordo com experimentos laboratoriais, registros fotográficos e filmagens de algumas incidências de descargas atmosféricas, foi relacionado o módulo do pico da corrente de descarga com o raio de atração. Na Tabela 2, pode-se visualizar as expressões sugeridas na literatura para cálculo do raio de atração.

Tabela 2 – Expressões sugeridas para cálculo do raio de atração

Referência	Expressão $R_a(m), I_p(kA)$
Brown, Whitehead	$R_a = 7,1I_p^{0,75}$
Love, Anderson	$R_a = 10I_p^{0,65}$
Armstrong	$R_a = 6,7I_p^{0,8}$
ABNT NBR 5419:2015	$R_a = 2 * (I_p) + 30(1 - e^{-I_p})$

Fonte: o autor

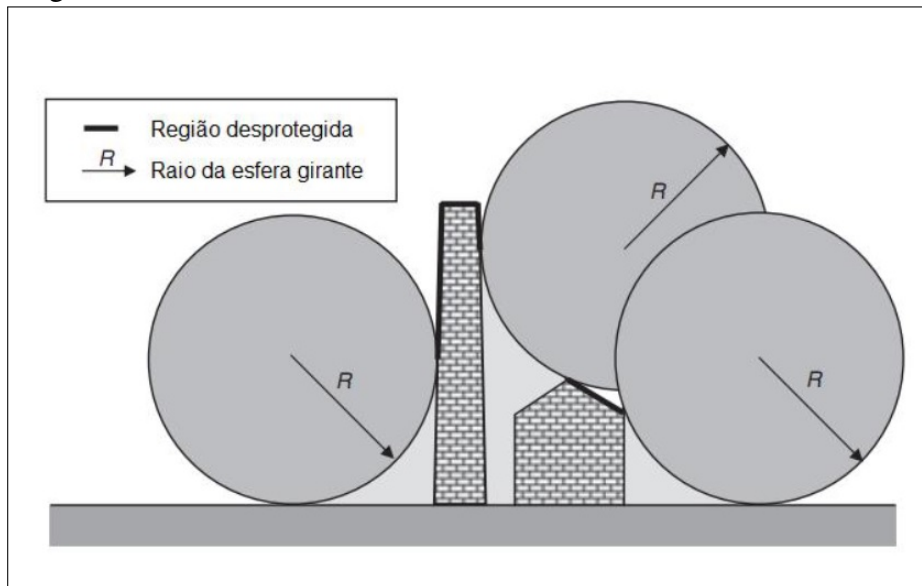
Atualmente, o método mais aplicado do modelo eletrogeométrico são as esferas rolantes, nesse método existe uma coordenação entre o raio da esfera e o nível de proteção oferecido pelo SPDA, ou seja, quanto menor o raio da esfera rolante, maior será o nível de proteção fornecido pelo sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Esse método delimita o volume de proteção dos captores de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, sendo também bastante utilizado em estruturas que possuem altura elevada ou com formas arquitetônicas diferenciadas (ABNT, 2015).

Toda a teoria da esfera rolante é baseada no conceito da distância de atração, que pode ser caracterizado como a distância entre a ponta do líder escalonado e o ponto de queda do raio no solo, instantaneamente da quebra da rigidez dielétrica do ar próximo ao solo, além disso deve ser considerado que a zona de proteção depende do pico de corrente da descarga de retorno, já que a distância de atração é diretamente proporcional ao pico de corrente (PINTO JUNIOR; PINTO, 2000).

Podemos afirmar que o método da esfera rolante é uma evolução do método do ângulo de proteção para o caso de existir combinação de proteção entre captores, pois, com isso, a proteção oferecida começa a ser superior. Caso a análise seja somente para um captor, teremos um resultado bastante parecido (KINDERMANN, 1997).

Na Figura 7 podemos visualizar um exemplo de aplicação da técnica das esferas rolantes. Nesse caso, temos uma esfera com um determinado raio R que pode ser rolada sobre as estruturas, a área abrangida pelas esferas representa o volume de proteção fornecido por elas.

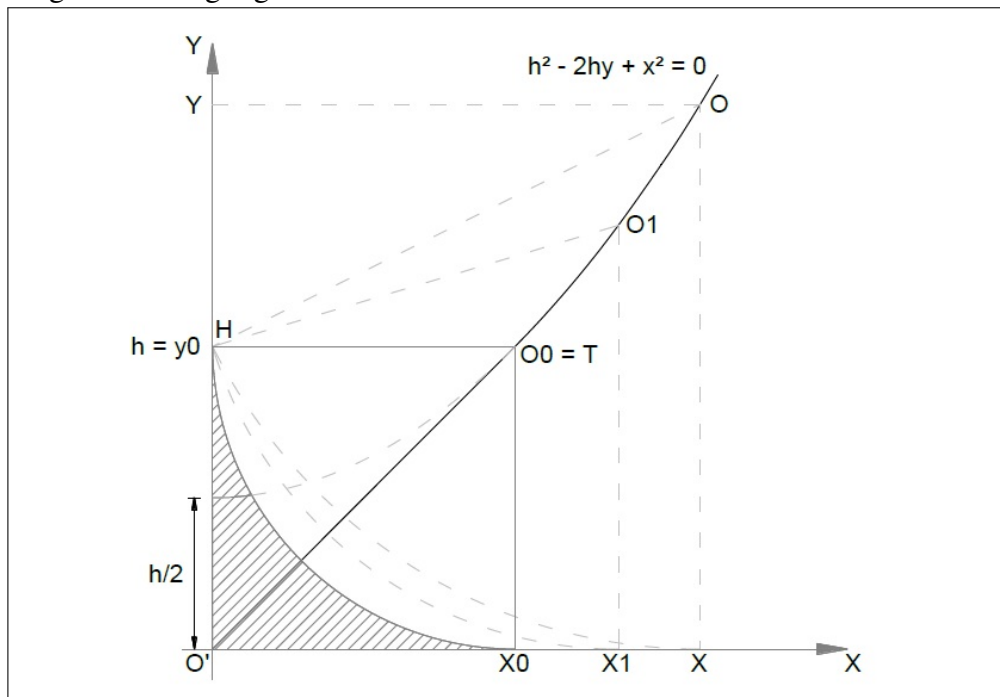
Figura 7 – Técnica das esferas rolantes



Fonte: Cooray (2010)

O raio das esferas rolantes é fictício, ou seja, não possui precisão definida, por conta disso é necessário obtermos a zona de proteção através da base de uma parábola, onde existe o centro de todas as esferas de raio  $R$  variável. O volume de proteção abrange os pontos nos quais a esfera toca ao ser rolada em uma determinada estrutura. Dito isso, a região que se apresenta hachurada na Figura 8 é caracterizada como a região de proteção oferecida pelo captor de altura  $h$ .

Figura 8 – Lugar geométrico das esferas fictícias



Fonte: Lacerda (1989)

### 2.4.3 *Modelo do líder progressivo*

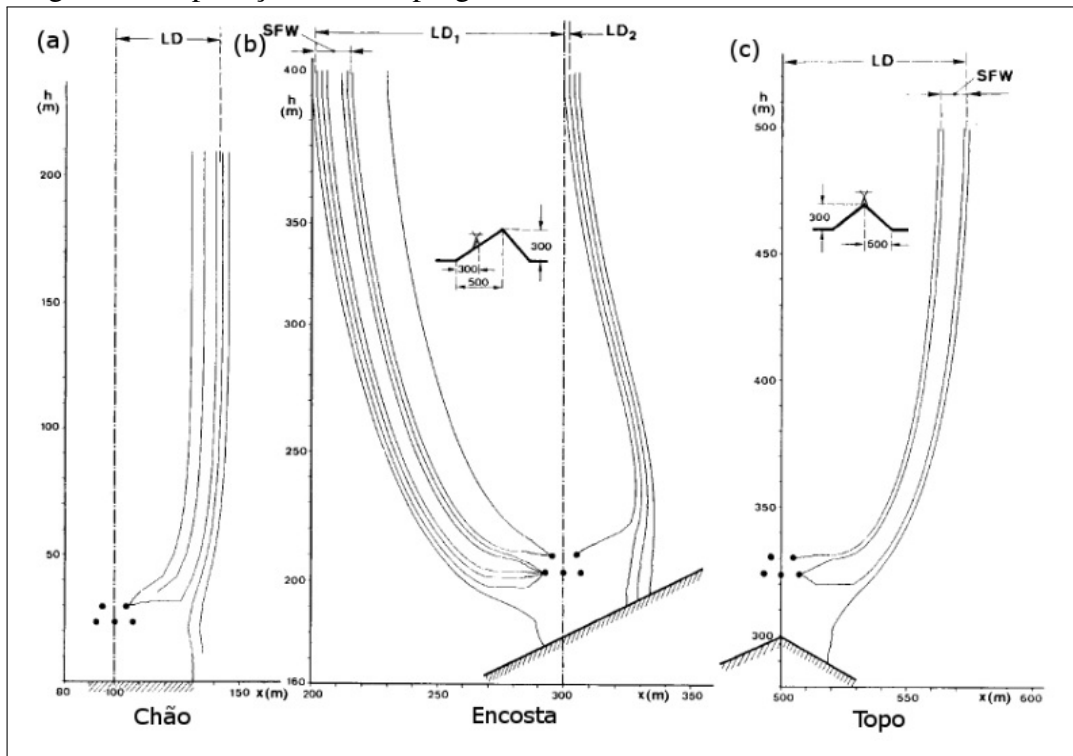
O modelo de progressão do líder surgiu através da idealização de dois engenheiros italianos, Dellera e Garbagnati. O método consiste em representar a evolução do canal descendente das descargas atmosféricas em determinados instantes, com intuito de se obter a trajetória dos raios, considerando o campo elétrico existente na extremidade do canal e o campo elétrico médio que levasse a uma nova descarga atmosférica.

Para realizar esse modelo de incidência, é necessário realizar uma simulação da distribuição de cargas na nuvem e no solo através do método de simulação de cargas, levando em consideração algumas variáveis como por exemplo, a distância lateral da estrutura e a largura da falha de blindagem.

Esse método possibilitou que houvesse uma evolução significativa de proteção de estruturas, porém ele possui uma grande desvantagem: o longo tempo de simulação. Normalmente não é amplamente utilizado em estruturas devido à sua grande complexidade de implementação (DELLERA; GARBAGNATI, 1990).

Este modelo pode ser usado em diferentes condições topográficas onde os modelos geométricos podem induzir a erros, como em linhas de transmissão sobre colinas. A Figura 9 (a) representa uma simulação bidimensional de uma linha de transmissão de 420 kV sobre o solo horizontal ao nível do mar. A Figura 9 (b) representa a seção transversal da linha de transmissão a 200 m de altura sobre a encosta de uma colina de 1 km de extensão e 300 m de altura. A Figura 9 (c) representa a linha de transmissão sobre o topo da colina. Os dois pontos superiores, representam os cabos guarda em seção transversal, os três pontos imediatamente inferiores são as três fases da linha.

Figura 9 – Aplicação do líder progressivo



Fonte: Deller e Garbagnati (1990)

Nos casos sobre uma encosta ou topo de uma colina, como verificado na Figura 9, utilizando o mesmo projeto de posicionamento de cabos de guarda, haveria uma falha de blindagem e as fases seriam atingidas, o que poderia causar uma sobretensão da linha, abrindo a proteção do sistema de transmissão, ou até mesmo danificar transformadores e isoladores.

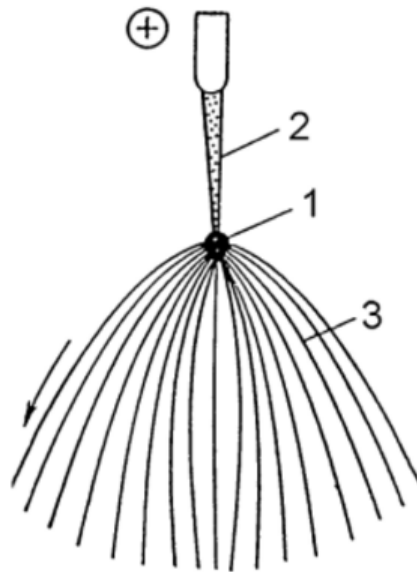
#### 2.4.4 Modelo da Deflexão do Campo Elétrico

O modelo da Deflexão do Campo Elétrico ou *Electric Field Deflection (EFD)* em inglês, é um modelo proposto recentemente por Rodrigues *et al.* (2016). Ele é baseado na deflexão do campo elétrico devido a ionização do ar que faz com que a descarga atmosférica procure o caminho com menor rigidez dielétrica para um determinado potencial (RODRIGUES *et al.*, 2016). Esta deflexão é proporcional ao comprimento médio do passo da descarga atmosférica e ao gradiente do módulo do campo elétrico. É utilizado o modelo do capacitor de placas paralelas com o meio dielétrico sendo o ar. A placa superior representa a base de nuvem, e a placa inferior, a superfície do solo. A direção da trajetória de descarga atmosférica é obtida pelo vetor direcional a partir do seguinte equacionamento:

Para descrever passo a passo o modelo de incidência EFD, primeiro, apresenta-se a

Figura 10 para definição dos elementos de um líder escalonado de uma DA, adaptada de Gorin *et al.* (1976). Rotulado por 1, tem-se a ponta ou cabeça do líder (*leader tip*), 2 indica o canal do líder (*leader channel*) e 3 identifica a zona de canais-piloto ou zona de eflúvios corona (*streamer zone*).

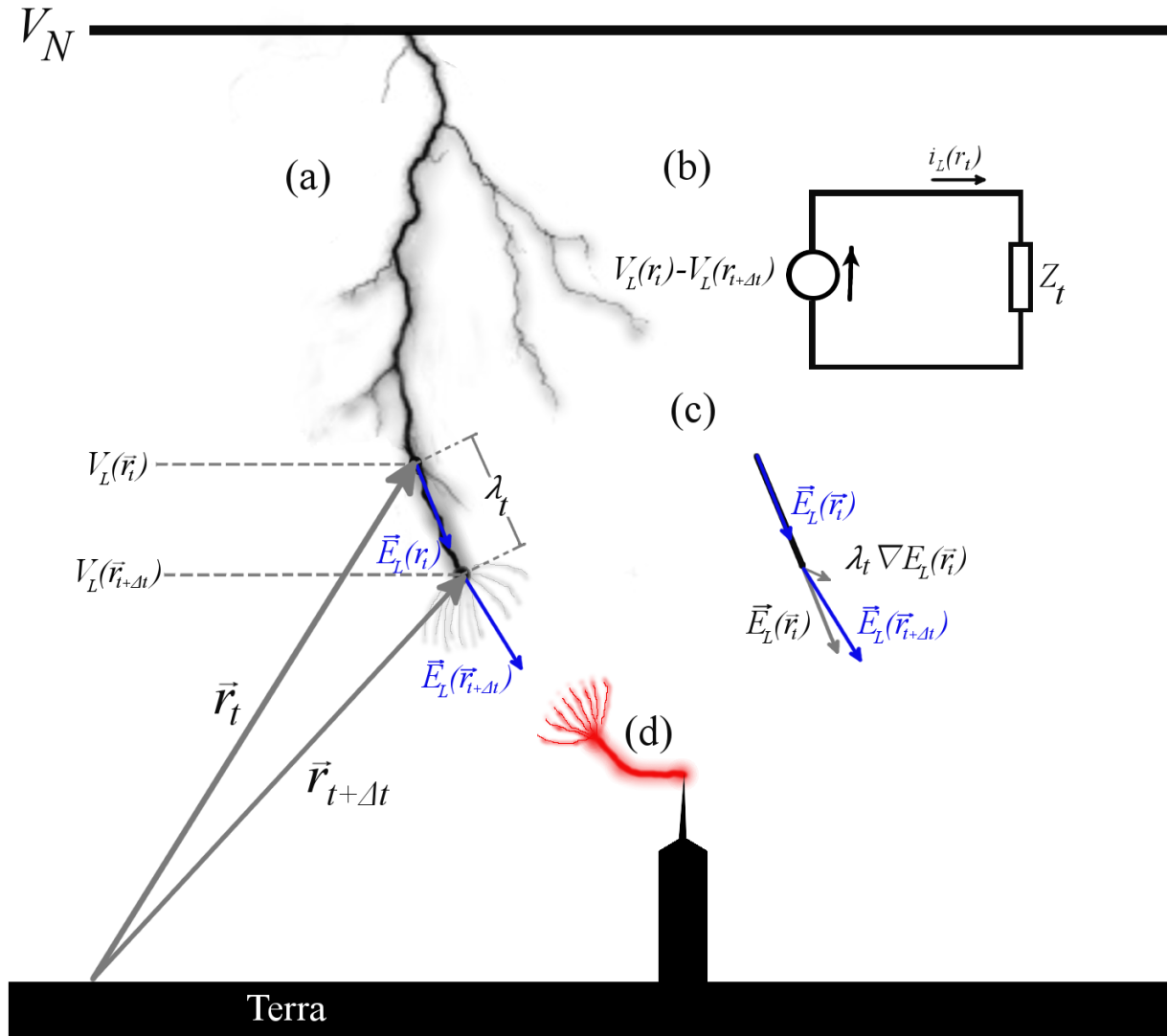
Figura 10 – Líder positivo



Fonte: Gorin *et al.* (1976)

As descargas atmosféricas descendentes, predominantemente, possuem carga elétrica  $q_L$  negativa (VISACRO, 2005), contudo, para fundamentação, considere um líder descendente de carga positiva como mostrado na Figura 11a. No instante  $t$ , a ponta do líder encontra-se na posição  $\vec{r}_t$  onde o potencial é  $V_L(\vec{r}_t)$  e o campo elétrico é  $\vec{E}_L(\vec{r}_t)$ . Após um intervalo de tempo  $\Delta t$ , este campo  $\vec{E}_L(\vec{r}_t)$  faz a ponta do líder saltar um comprimento  $\lambda_t$  para a posição  $\vec{r}_{t+\Delta t}$  onde o potencial passa a ser  $V_L(\vec{r}_{t+\Delta t})$ . Tal comportamento é equivalente ao apresentado pelo circuito da Figura 11b. Entre as posições  $\vec{r}_t$  e  $\vec{r}_{t+\Delta t}$  a diferença de potencial gera uma corrente  $i_L(\vec{r}_t)$  limitada pela impedância  $Z_t$ .

Figura 11 – Diagrama da evolução de uma descarga atmosférica. (a) Líder descendente. (b) Circuito equivalente a um passo da descarga atmosférica. Composição vetorial do campo elétrico. (d) Líder ascendente.



Fonte: Rodrigues *et al.* (2016)

A transição de estado do líder ocorre pela ruptura da rigidez dielétrica do ar, portanto não há efeito capacitivo entre os estados. E devido a trajetória retilínea, o efeito indutivo foi desprezado. Deste modo, as reatâncias são desconsideradas e a impedância se torna puramente resistiva, ou seja,  $Z_t \approx R_t$ .

De acordo com a Primeira Lei de Ohm na forma macroscópica, a variação do potencial é dada por,

$$V_L(\vec{r}_t) - V_L(\vec{r}_{t+\Delta t}) = R_t i_L(\vec{r}_t). \quad (2.2)$$

Se aplicarmos o operador gradiente nos dois membros da Equação 2.2, obtém-se um vetor campo elétrico que aponta na direção de maior variação de potencial, percorrendo uma trajetória retilínea



num salto de comprimento  $\lambda_t$  de acordo com o comportamento das descargas atmosféricas, ou seja,

$$\vec{E}_L(\vec{r}_{t+\Delta t}) - \vec{E}_L(\vec{r}_t) = R_t \nabla i_L(\vec{r}_t). \quad (2.3)$$

Na posição  $\vec{r}_{t+\Delta t}$ , supondo que a impedância é a mesma para todos os canais, o gradiente do segundo membro da Equação 2.3 indica a direção de maior intensidade de corrente. Isto está de acordo com o que foi suposto anteriormente para o eflúvio que antecede a descarga plena.

Da Segunda Lei de Ohm, sabe-se que a resistência é diretamente proporcional ao comprimento  $\lambda_t$ , inversamente proporcional à condutividade  $\sigma_L$  e à área  $A_t$  da secção transversal do canal de condução, ou seja,

$$R_t = \frac{\lambda_t}{\sigma_L A_t}. \quad (2.4)$$

Assim, substituindo a Equação 2.4 em 2.3, obtém-se

$$\vec{E}_L(\vec{r}_{t+\Delta t}) = \vec{E}_L(\vec{r}_t) + \frac{\lambda_t}{\sigma_L A_t} \nabla i_L(\vec{r}_t). \quad (2.5)$$

Realocando os fatores de condutividade e área sobre a atuação do gradiente, chega-se à

$$\vec{E}_L(\vec{r}_{t+\Delta t}) = \vec{E}_L(\vec{r}_t) + \lambda_t \nabla \frac{i_L(\vec{r}_t)}{\sigma_L A_t}. \quad (2.6)$$

A taxa de corrente  $i_L(\vec{r}_t)$  por unidade de área  $A_t$  é igual ao módulo da densidade de corrente  $J_L(\vec{r}_t)$  do canal. Através da Primeira lei de Ohm na forma pontual, obtém-se uma expressão do campo elétrico em função do módulo da densidade de corrente e da condutividade do canal ionizado, ou seja,

$$\vec{J}_L(\vec{r}_t) = \sigma_L \vec{E}_L(\vec{r}_t) \Rightarrow E_L(\vec{r}_t) = \frac{J_L(\vec{r}_t)}{\sigma_L}. \quad (2.7)$$

Substituindo a implicação da Equação 2.7 em 2.6, chega-se à

$$\vec{E}_L(\vec{r}_{t+\Delta t}) = \vec{E}_L(\vec{r}_t) + \lambda_t \nabla E_L(\vec{r}_t). \quad (2.8)$$

A Equação 2.8 fornece o campo elétrico que movimentará a ponta do líder de uma descarga atmosférica no instante  $t + \Delta t$  em função do campo elétrico no instante anterior  $t$ . A Figura 11 mostra a composição vetorial do campo elétrico no mesmo instante  $t + \Delta t$ . O termo  $\lambda_t \nabla E_L(\vec{r}_t)$  será denominado *termo de desvio*. A vantagem da Equação 2.8 sobre a Equação 2.6 é a redução do número de variáveis do termo de desvio. Enquanto o gradiente da Equação 2.6

atua sobre três variáveis (não necessariamente,  $\sigma_L$  e  $A_t$  precisam ser constantes), o gradiente da Equação 2.8 atua apenas sobre uma variável,  $E_L(\vec{r}_t)$ .

A variação da posição da ponta do líder, do instante  $t$  para o instante  $t + \Delta t$ , ocorre por um deslocamento  $\lambda_t$  na direção de  $\vec{E}_L(\vec{r}_t)$ , ou seja, na direção do vetor unitário  $\hat{E}_L(\vec{r}_t)$  definido por,

$$\hat{E}_L(\vec{r}_t) \equiv \frac{\vec{E}_L(\vec{r}_t)}{E_L(\vec{r}_t)}. \quad (2.9)$$

Estas considerações podem ser generalizadas por,

$$\vec{r}_{t+\Delta t} - \vec{r}_t = \lambda_t \hat{E}_L(\vec{r}_t) \quad (2.10)$$

que implica em

$$\vec{r}_{t+\Delta t} = \vec{r}_t + \lambda_t \hat{E}_L(\vec{r}_t) \quad (2.11)$$

para posição do líder positivo no instante  $t + \Delta t$ .

O próximo salto da DA ocorre no instante  $t + 2\Delta t$ , e a ponta do líder se desloca para a posição  $\vec{r}_{t+2\Delta t}$  conforme

$$\vec{r}_{t+2\Delta t} = \vec{r}_{t+\Delta t} + \lambda_t \hat{E}_L(\vec{r}_{t+\Delta t}). \quad (2.12)$$

Os passos se repetem até o líder descendente encontrar o ascendente.

Para o líder ascendente negativo, de forma análoga à Equação 2.8, obtém-se

$$\vec{E}_L(\vec{r}_{t+\Delta t}) = \vec{E}_L(\vec{r}_t) - \lambda_t \nabla E_L, \quad (2.13)$$

$$\vec{r}_{t+\Delta t} = \vec{r}_t - \lambda_t \hat{E}_L(\vec{r}_t). \quad (2.14)$$

O sinal negativo se deve ao fato de o líder negativo se deslocar para o potencial positivo, no sentido oposto ao campo elétrico. Assim, não importa se o raio é descendente ou ascendente, o sinal dos termos de desvio tem o mesmo sinal da carga  $q_L$  do líder.

#### 2.4.4.1 Aproximação Eletrostática

Considere um líder descendente positivo na iminência de deixar a nuvem. Como não há ainda um canal ionizado, o campo elétrico é influenciado pela nuvem, pelo o solo e pelas estruturas sobre a superfície terrestre. Esse é um campo eletrostático que será denominado de campo elétrico de fundo  $\vec{E}_f$ . Se a influência do campo elétrico gerado pelo canal ionizado

também for desconsiderada nos passos subsequentes, não é necessário fazer simulações no domínio do tempo para a trajetória da DA. Desse modo, segundo Rodrigues *et al.* (2016), é possível descrever a trajetória de uma descarga a partir de uma simulação eletrostática dada por

$$\vec{E}_L(\vec{r}) \approx \vec{E}_f(\vec{r}) + \lambda \nabla E_f(\vec{r}). \quad (2.15)$$

Nota-se que o campo elétrico da descarga atmosférica foi aproximado por uma função do campo elétrico de fundo  $\vec{E}_f$  que por sua vez é uma função só da posição  $\vec{r}$ . A vantagem de usar a aproximação eletrostática da Equação 2.15 em relação à evolução no tempo descrita pela Equação (2.5), é a rápida convergência de simulação.

## 2.5 Métodos de proteção contra descargas atmosféricas

Existem dois métodos de proteção contra descargas atmosféricas: a proteção através de captadores do tipo Franklin e a proteção através da Gaiola de Faraday. Todo sistema de proteção possui três subsistemas como componentes:

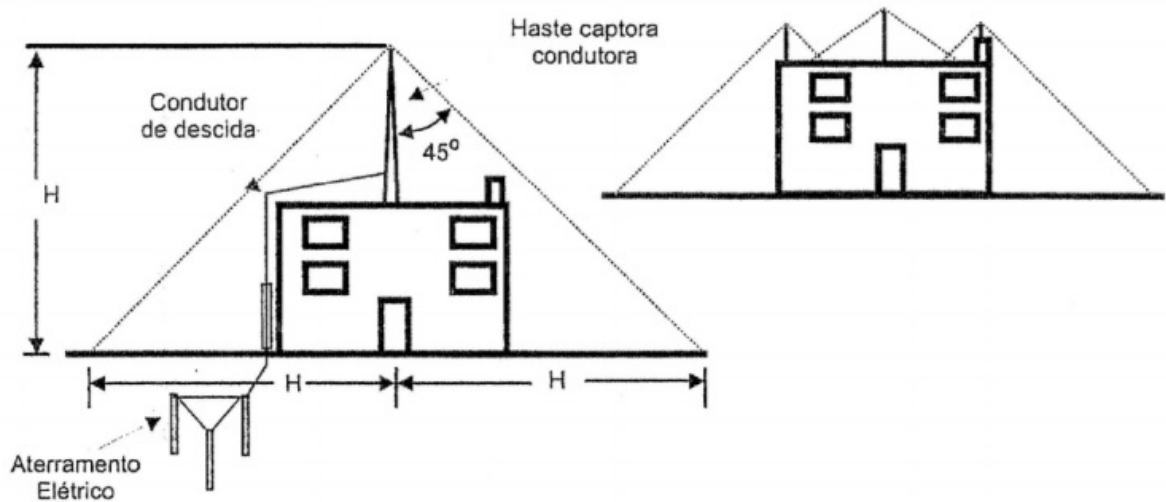
- a) Subsistema de captação: É formado por elementos metálicos, cuja função é basicamente receber os raios, minimizando a probabilidade de a estrutura ser atingida;
- b) Subsistema de descidas: Tem a função de conduzir a corrente do raio recebida pelos captadores até o aterramento, reduzindo ao mínimo a probabilidade de descargas laterais e de campos eletromagnéticos perigosos no interior da estrutura;
- c) Subsistemas de aterramento elétrico: Utiliza eletrodos cravados no solo para dispersão da corrente elétrica de uma provável descarga atmosférica.

### 2.5.1 Método de “Franklin”

O método de Franklin foi desenvolvido por meio do cruzamento das descargas descendentes, que possuem atração da estrutura a partir do captador instalado no sistema de proteção (VISACRO, 2005).

O método Franklin tem sua aplicação preferencialmente em estruturas altas e delgadas. Entretanto, em edificações com alturas superiores a 20 metros este não método não se mostra tão eficaz, pois a aplicação deste sistema requer complementação para prevenir a ocorrência de descargas laterais. Na Figura 12 pode ser observado um exemplo de uma topologia de captadores tipo Franklin sendo empregado em uma estrutura.

Figura 12 – Configuração de um SPDA do tipo Franklin

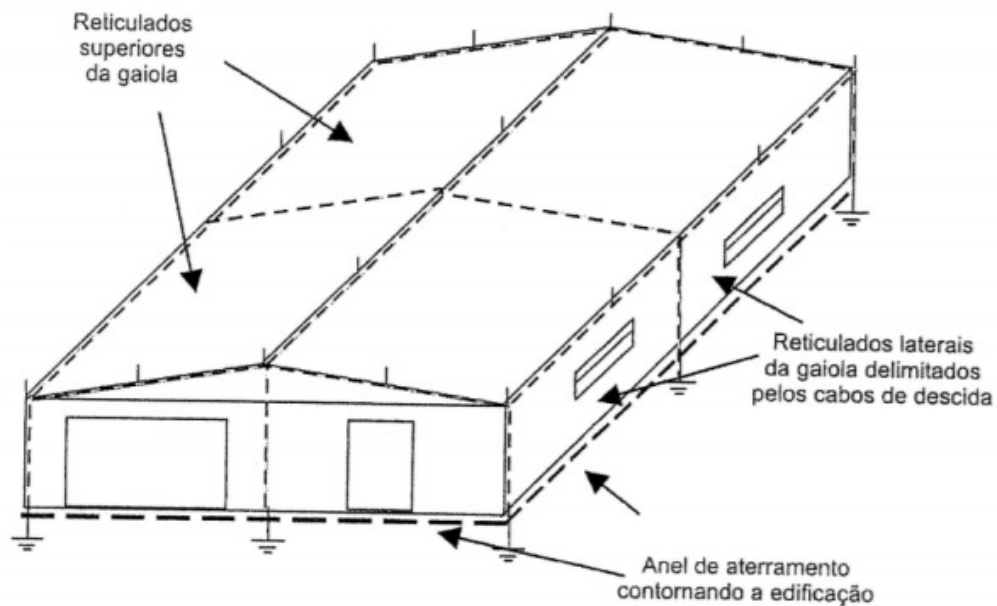


Fonte: Visacro (2005)

### 2.5.2 Gaiola de Faraday

Esse método atualmente é um dos mais utilizados, ele é baseado no princípio de que o campo elétrico no interior da gaiola condutora é nulo, já em outros locais, como na proximidade, por exemplo, existe um campo, e este pode gerar tensões induzidas nas instalações elétricas que estejam em paralelo ou próximos à gaiola (LEITE D, 2001). A proteção é constituída de captores formados por condutores na cobertura da edificação, conforme pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 – Configuração da gaiola de Faraday



Fonte: Visacro (2005)

Desses captosres são derivadas algumas descidas que irão se conectar ao sistema de aterramento. Quanto menor for a distância entre os condutores da malha captora, mais eficiente será a proteção, a implementação deste método requer a construção de uma gaiola condutora que envolva toda a estrutura, não admitindo que partes desta fiquem fora do envolto da gaiola. Assim, as descargas elétricas que atingirem a gaiola teriam seus fluxos de correntes conduzidos pelos condutores da gaiola e não pelas partes internas da estrutura.

## 2.6 Método dos elementos finitos

Os métodos numéricos são utilizados para solucionar problemas complexos na área de engenharia, onde a solução analítica é de difícil obtenção. Alguns problemas matemáticos podem ser solucionados através do cálculo numérico. A solução numérica apesar de ser uma aproximação do resultado normalmente possui elevado grau de exatidão.

Um método numérico bastante utilizado para a solução de problemas na área de eletricidade, é o método dos elementos finitos. Esse método foi inicialmente desenvolvido para atuar na área de estruturas, porém atualmente é empregado em diversas áreas como máquinas elétricas, aterramento etc (SADIKU, 2009).

O método dos elementos finitos exige alto esforço computacional, entretanto é muito eficaz em situações onde o problema é aplicado em meios heterogêneos e com geometria complexa (POTIER *et al.*, 2010).

Para realizar uma análise utilizando esse método são necessários quatro etapas:

A primeira etapa é a discretização da região de interesse em um número finito de sub-regiões. Nesta etapa a região de interesse é dividida em diversas outras figuras geométricas menores.

A segunda etapa consiste em obter as equações que regram um elemento típico. Neste passo é obtida uma equação que descreva o comportamento dentro de cada elemento subdividido.

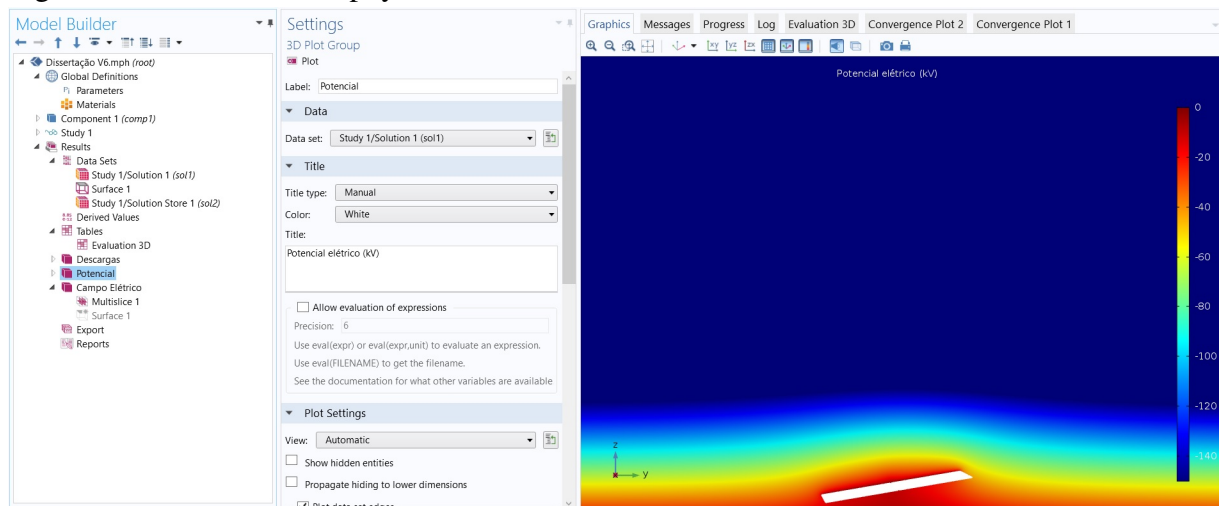
No passo seguinte unem-se todos os elementos na região de solução utilizando uma matriz de equações. No quarto passo é resolvido as equações diferenciais (SADIKU, 2009).

### 2.6.1 Ferramenta computacional COMSOL Multiphysics

O COMSOL Multiphysics é um software de análise e solução de problemas por elementos finitos, onde é possível modelar e simular aplicações de engenharia, especialmente fenômenos multifísicos. O programa possui módulos adicionais que permitem melhorar a experiência nas áreas de elétrica, química, mecânica e mecânica dos fluidos.

O software também possui interface com MATLAB, além de permitir a importação quanto a exportação de arquivos CAD, o que facilita utilização de figuras mais complexas. Os pacotes são sustentados por plataformas mais utilizadas como Windows, Mac (MULTIPHYSICS, 2018). A Figura 14 ilustra o ambiente de programação e parametrização do software.

Figura 14 – Comsol Multiphysics



Fonte: O autor

### 3 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DA PLANTA

Neste capítulo será realizada a identificação da planta e suas características gerais. A usina de minigeração fotovoltaica pertence a UFERSA, Universidade que se localiza na cidade de Mossoró, no estado do Rio Grande do Norte. O local foi escolhido por se localizar em uma região aberta, ou seja que não sofre nenhuma influência de estruturas próximas, possibilitando assim uma análise mais verossímil de proteção contra descargas atmosféricas.

A usina é classificada como minigeração, uma vez que sua potência instalada de 150,8 kW é superior a 75 kW e inferior ou igual a 5 MW, além de está conectada na rede de distribuição da concessionária local. Os painéis fotovoltaicos presentes na usina transformam a radiação solar em energia elétrica de corrente contínua por meio do Efeito fotovoltaico.

Segundo informações da Universidade, a usina de minigeração fotovoltaica é capaz de evitar cerca de 1,51 toneladas por mês de emissões de dióxido de carbono, que seriam geradas por uma usina térmica. Também é capaz de produzir mensalmente de 20.790 kWh, sendo responsável pela geração de 5% da energia elétrica consumida no campus da UFERSA.

Figura 15 – Imagem geral da planta solar da UFERSA



Fonte: o autor

#### 3.1 Painéis fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos são do fabricante Canadian Solar, medindo 98 x 164 cm, totalizando 580 unidades distribuídas entre os 10 arranjos. A armadura das placas são compostas

por alumínio e as células por silício policristalino.

A potência máxima de geração dos painéis fotovoltaicos é de  $150,8 \text{ kW}_p$ , cada unidade possui as seguintes características construtivas:

- Tensão máxima de operação:  $30,4 \text{ V}$ ;
- Potência nominal máxima:  $260 \text{ W}_p$ ;
- Corrente máxima de operação:  $8,56 \text{ A}$ ;
- Tensão de circuito aberto:  $37,5 \text{ V}$ ;
- Corrente de curto-circuito:  $9,12 \text{ A}$ .

Figura 16 – Painel Canadian Solar



Fonte: (CANADIAN, 2018)

### 3.2 Inversores

As placas estão conectadas aos inversores, que fazem a conversão dessa energia de corrente contínua para alternada, nos níveis de tensão e frequência requeridos para acessar a rede de distribuição da Companhia Energetica do Rio Grande do Norte (COSERN).



Os inversores, por sua vez, se conectam ao transformador, com intuito de elevar a tensão para  $13,8\text{ kV}$ , injetando a energia gerada na rede de distribuição primária da UFERSA. A unidade possui 10 inversores do fabricante Ginlong Technologies, modelo Solis 15K, sendo cada um deles com potência nominal de  $15\text{ kW}$ . A potência máxima de geração dos inversores em corrente contínua equivale a  $172\text{ kW}$ , e a potência nominal de geração dos inversores em corrente alternada é de  $150,80\text{ kW}$ . Os inversores possuem a seguinte característica construtiva:

- Tensão máxima contínua:  $1.000\text{ V}$ ;
- Corrente máxima contínua:  $18\text{ A}$ ;
- Frequência nominal:  $60\text{ Hz}$ ;
- Potência nominal alternada:  $15.000\text{ W}$ ;
- Potência máxima de geração em corrente contínua:  $17,2\text{ kW}$ .

Figura 17 – Inversor Solis 15K



Fonte: o autor

Os inversores também possuem como função proteger o sistema elétrico, contra distúrbios de subtensão, sobretensão, sincronismo, sobrefrequência e subfrequência.

### 3.3 Subestação de distribuição

A energia gerada na Usina, depois de condicionada e injetada na rede interna de distribuição é consumida no próprio campus da Ufersa, reduzindo, assim, a necessidade de consumo de energia proveniente da própria concessionária local. O sistema possui uma subestação de distribuição que receberá energia oriunda do sistema fotovoltaico. Esta possui potência nominal de 150 kVA, através de um transformador trifásico, com tensão de alimentação primária de 13,8 kV e tensão secundária de distribuição de 380 V, fechamento interno em delta-estrela com o neutro solidamente aterrado. O equipamento possui sistema de resfriamento a óleo mineral através do seu radiador elíptico.

Figura 18 – Subestação



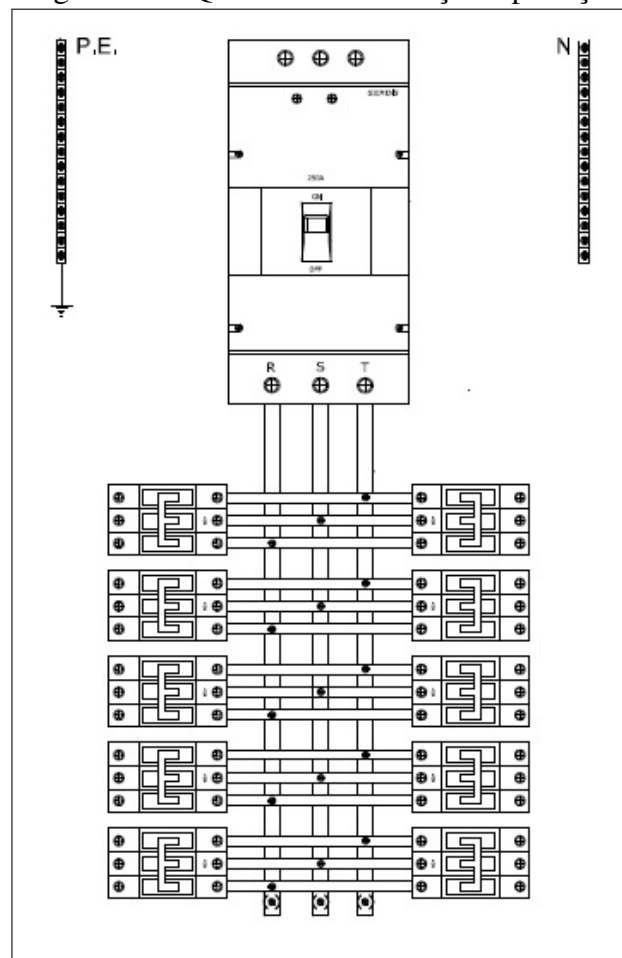
Fonte: o autor

### 3.4 Proteções elétricas

A subestação possui proteção e seccionamento através de um conjunto de três chaves-fusíveis com classe de tensão de 10 kV, 300 A e corrente de curto-circuito de 10 kA. Para proteção contra sobretensões, o sistema possui três para-raios a resistor não linear com classe de tensão de 12 kV do tipo óxido de zinco.

As proteções elétricas dos condutores e dos inversores do sistema foram realizadas através da instalação de disjuntores termomagnéticos de 32 A, a montante a esses equipamentos existe um disjuntor geral termomagnético trifásico com corrente nominal de 250 A. Esse disjuntor possui capacidade de isolar totalmente o sistema de minigeração com o transformador de distribuição. Todos os componentes citados estão alocados em um Quadro geral, conforme Figura 19.

Figura 19 – Quadro de distribuição e proteção



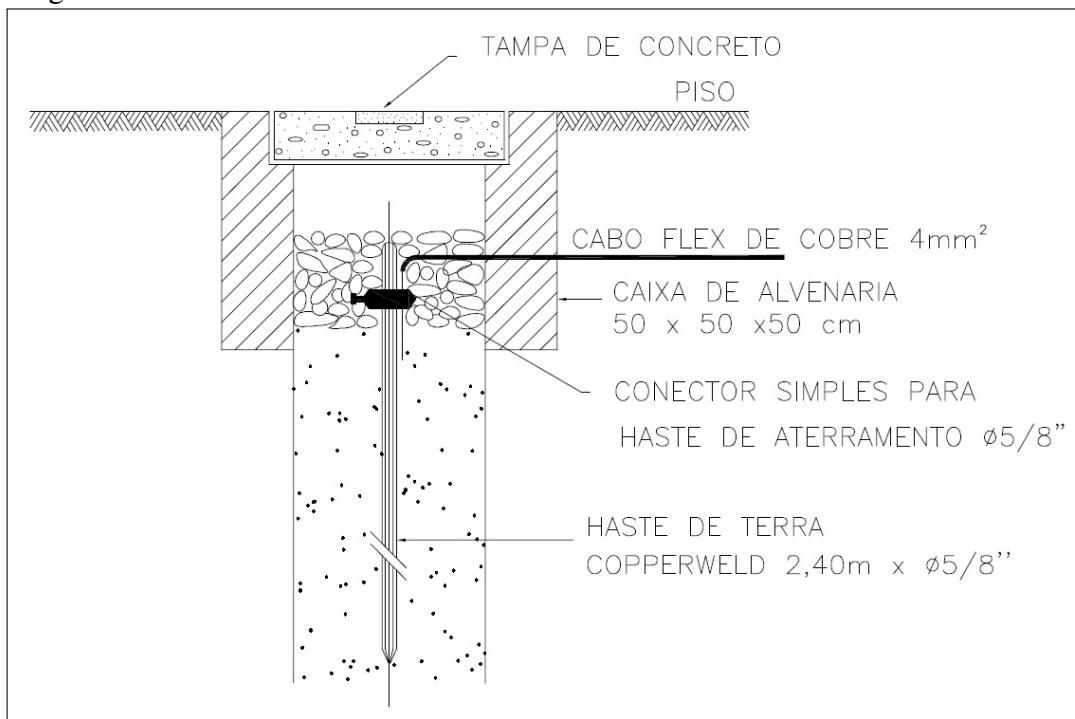
Fonte: o autor

### 3.5 Sistema de aterramento

O sistema de aterramento existente na unidade é destinado à proteção dos inversores, ele é constituído por hastes verticais do tipo Copperweld com dimensões de 2,40 m × 5/8", sendo elas interligadas para o barramento de equipotencialização local, presente no Quadro geral, caracterizando como um sistema de aterramento do tipo TN-s.

O condutor de aterramento utilizado para fazer as interligações e conexões possui secção transversal de 4 mm<sup>2</sup>, inclusive sendo conectado a estrutura dos painéis fotovoltaicos.

Figura 20 – Padrão de aterramento do local



Fonte: o autor

### 3.6 Proteção contra descargas atmosféricas

Do ponto de vista de proteção contra descargas atmosféricas diretas, a planta solar não possui nenhum SPDA, o que pode ocasionar avaria nos equipamentos em caso de incidência de descargas atmosféricas no local. Também não existem estruturas próximas com SPDA instalado, ou seja, não existe interferência de nenhum captor externo à estrutura.

Com intuito de garantir a proteção por eventuais surtos de tensão provenientes das descargas atmosféricas indiretas, a planta possui DPS conectados aos condutores de fase e neutro do inversor. Na Figura 21 pode ser verificado o quadro elétrico com os DPS.

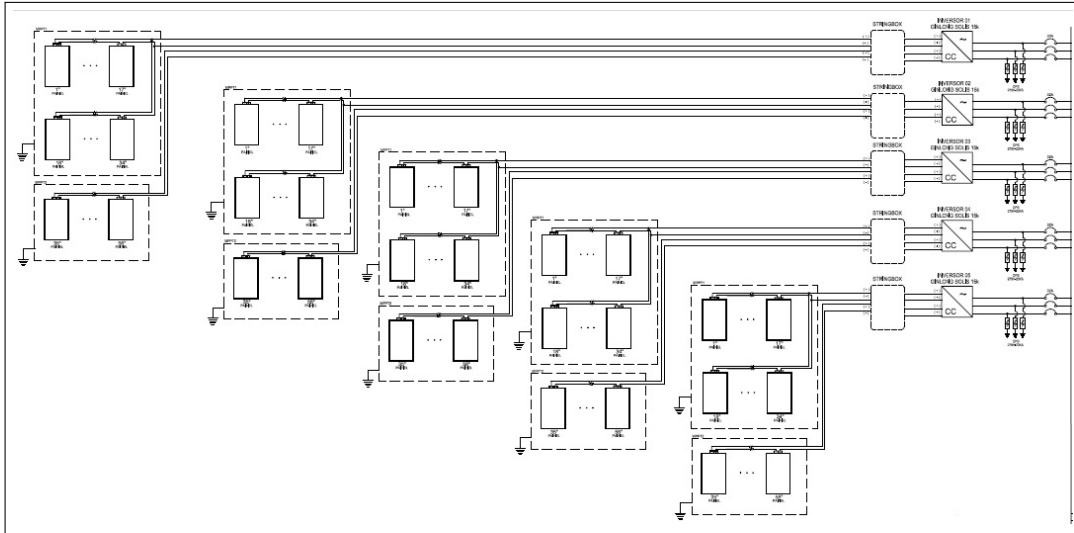
Figura 21 – Quadro com DPS



Fonte: o autor

Já na Figura 22 é apresentado o diagrama trifilar com as ligação elétrica dos DPS's, localizados a jusante dos disjuntores de proteção de sobrecorrente, e a montante dos inversores.

Figura 22 – Ligação dos DPS



Fonte: o autor

## 4 ESTUDO DE CASO

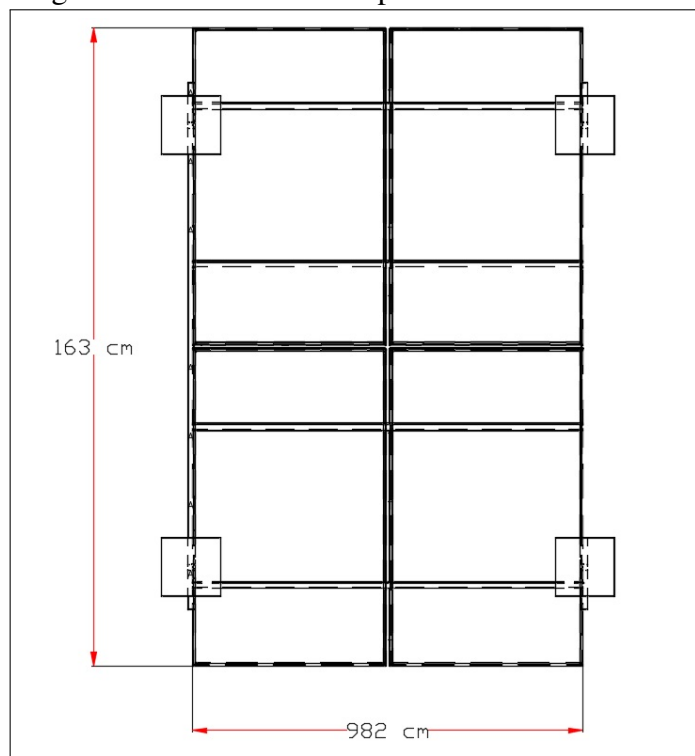
Com base na identificação e características gerais da planta, conforme detalhado no Capítulo 3, foi possível realizar as análises de incidências de descargas atmosféricas, através dos métodos tradicionais (ângulo de proteção e esferas rolantes), além do método EFD. Neste trabalho é considerado que a estrutura necessita de proteção contras descargas atmosféricas diretas, além disso a planta foi classificada como classe de proteção I, que é a mais crítica em proteção contra descargas atmosféricas. No fim do capítulo será proposto uma topologia de proteção confiável e que atenda todos os modelos de incidências analisados.

### 4.1 Análise de incidência de descargas atmosféricas na planta

Para realizar a análise de incidência de descargas atmosféricas na unidade de minigeração fotovoltaica, foi necessário realizar o detalhamento dimensional de um painel fotovoltaico. Uma vez que todas as unidades são idênticas, faremos apenas a análise de incidência em apenas um módulo, e o seu resultado vai refletir nas outras unidades.

Na Figura 23 é possível verificar o detalhamento dimensional de um dos 580 painéis fotovoltaicos, que totalizam uma área total de 951,69 m<sup>2</sup> de área coberta por painéis fotovoltaicos.

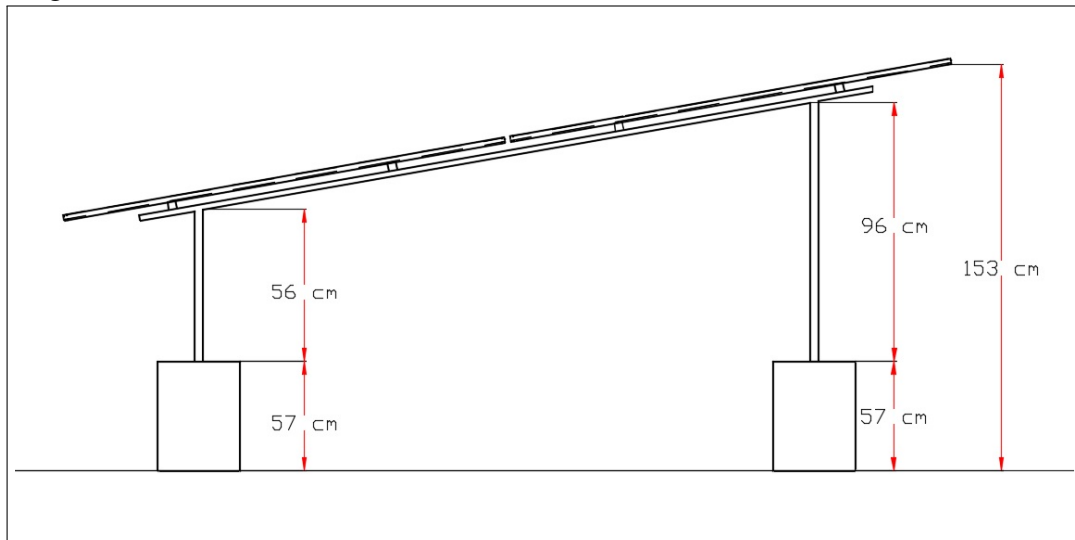
Figura 23 – Dimensões do painel fotovoltaico



Fonte: o autor

Já na Figura 24, podemos visualizar o detalhamento das dimensões das bases de concreto, dos suportes metálicos de fixação do painel fotovoltaico, além das alturas da parte inferior e superior da placa, que possibilita assim encontrar a inclinação atual do painel fotovoltaico, que no caso dessa planta é de  $10^\circ$ , voltado para o norte.

Figura 24 – Painel fotovoltaico, vista lateral



Fonte: o autor

Foi realizada a análise de incidência de descargas atmosféricas através do modelo do ângulo de proteção, técnica das esferas rolantes, que são os métodos amplamente utilizados. Devido à sua dificuldade de implementação, não será realizada análise de incidência pelo método do líder progressivo. Também será realizada a análise através do método EFD, que utiliza uma simulação eletroestática para análise de incidência.

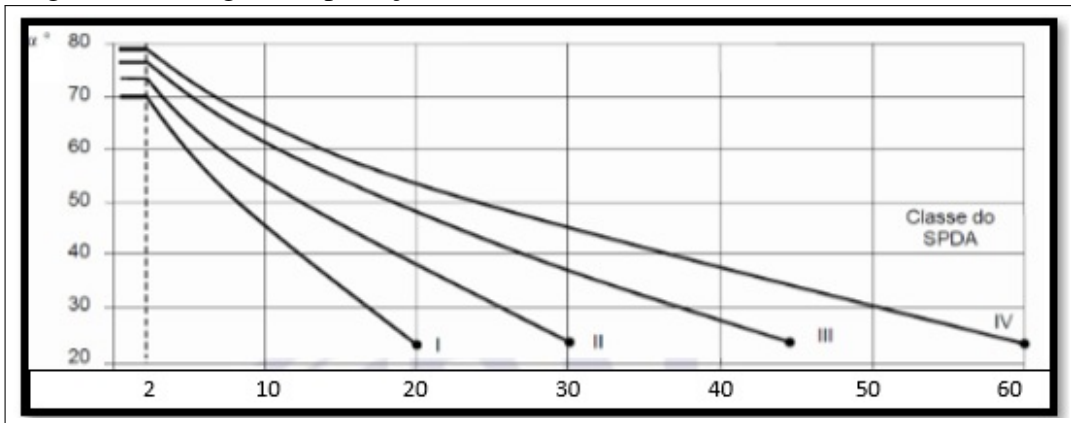
#### **4.1.1 Análise de incidência - ângulo de proteção**

Para realizar a análise de incidência de descargas atmosféricas através do ângulo de proteção, foi considerado que planta deveria possuir SPDA com classe I (mais protegido). Neste caso, outra variável a ser analisada é a altura do painel fotovoltaico, que, conforme pode ser observado na Figura 24 é inferior a 2 metros.

Utilizando a curva de classe do SPDA I, que pode ser visualizado na Figura ??, e considerando a altura do painel de 1,53 m, obtemos um ângulo de proteção de  $70^\circ$  (ABNT, 2015).



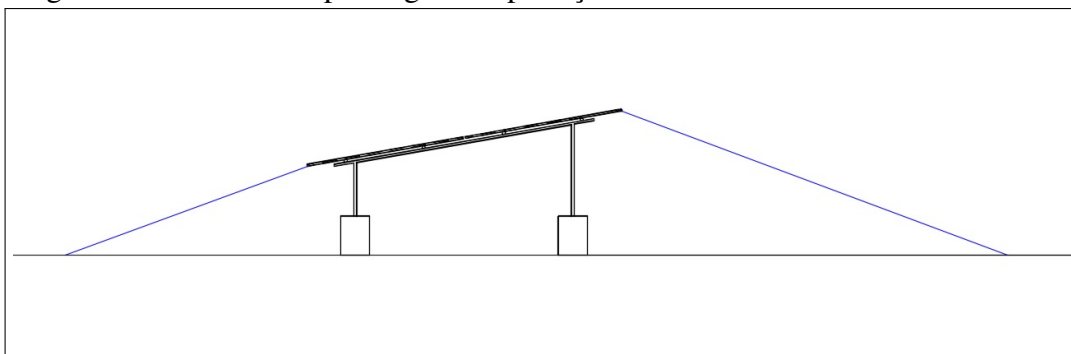
Figura 25 – Ângulo de proteção do SPDA



Fonte: ABNT (2015)

Visualizando a Figura 26 é percebido que pela análise do ângulo de proteção, seria necessária a adição de mais de que um captor para proteção do painel fotovoltaico, mostrando que o sistema está vulnerável a descargas atmosféricas, e de acordo com esse método de análise de incidência é necessário realizar a instalação de um SPDA.

Figura 26 – Incidência por ângulo de proteção



Fonte: o autor

#### 4.1.2 Análise de incidência - esferas rolantes

Como já observado anteriormente, o nível de proteção para descargas atmosféricas da planta foi classificado como I. Dito isso, para realizarmos a análise de incidência de descargas atmosféricas pela técnica das esferas rolantes, consideramos a existência de uma esfera fictícia com raio de proteção igual a 20 metros, conforme pode ser verificado na Tabela 3 (ABNT, 2015).

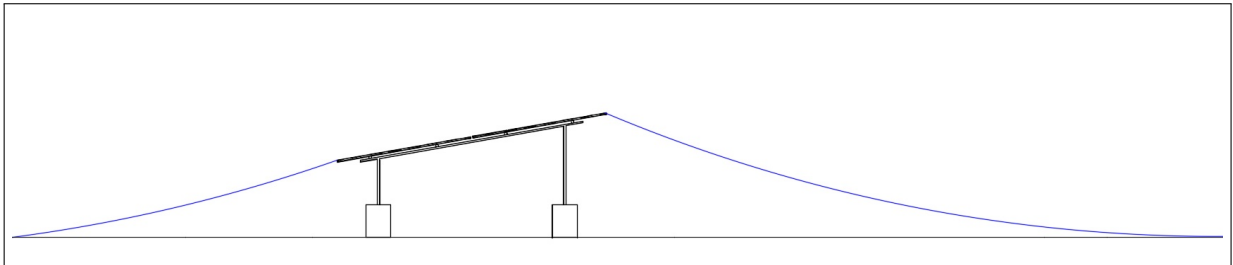
Tabela 3 – Raios da esfera rolante por classe de proteção

Classe do SPDA	Raio da esfera rolante R (m)
I	20
II	30
III	45
IV	60

Fonte: ABNT (2015)

Conforme pode ser observado na Figura 27 da mesma forma que pelo método do ângulo de proteção, a estrutura também se apresenta vulnerável a descargas atmosféricas, e também seria necessário a instalação de um SPDA.

Figura 27 – Análise de incidência de descargas atmosféricas por Esferas rolantes

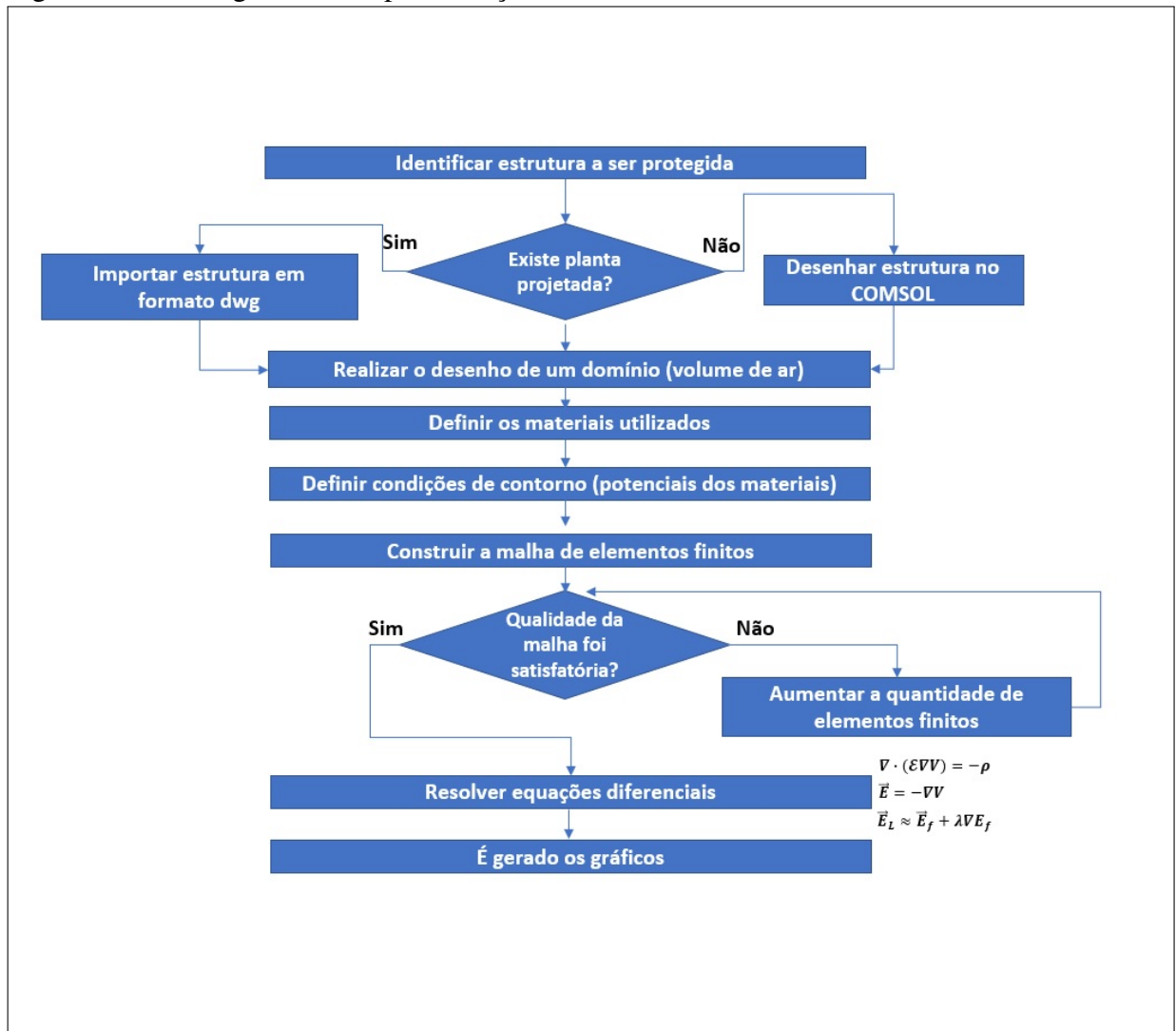


Fonte: o autor

#### 4.1.3 Análise de incidência - EFD

Uma terceira análise de incidência foi realizada através de um método recentemente criado, denominado EFD, apresentado na Subseção 2.4.4. Utilizando o software de simulação Comsol Multiphysics, foi possível realizar a modelagem do sistema baseado em elementos finitos. O fluxograma da Figura 28 apresenta passo a passo, a execução da simulação utilizando o método EFD.

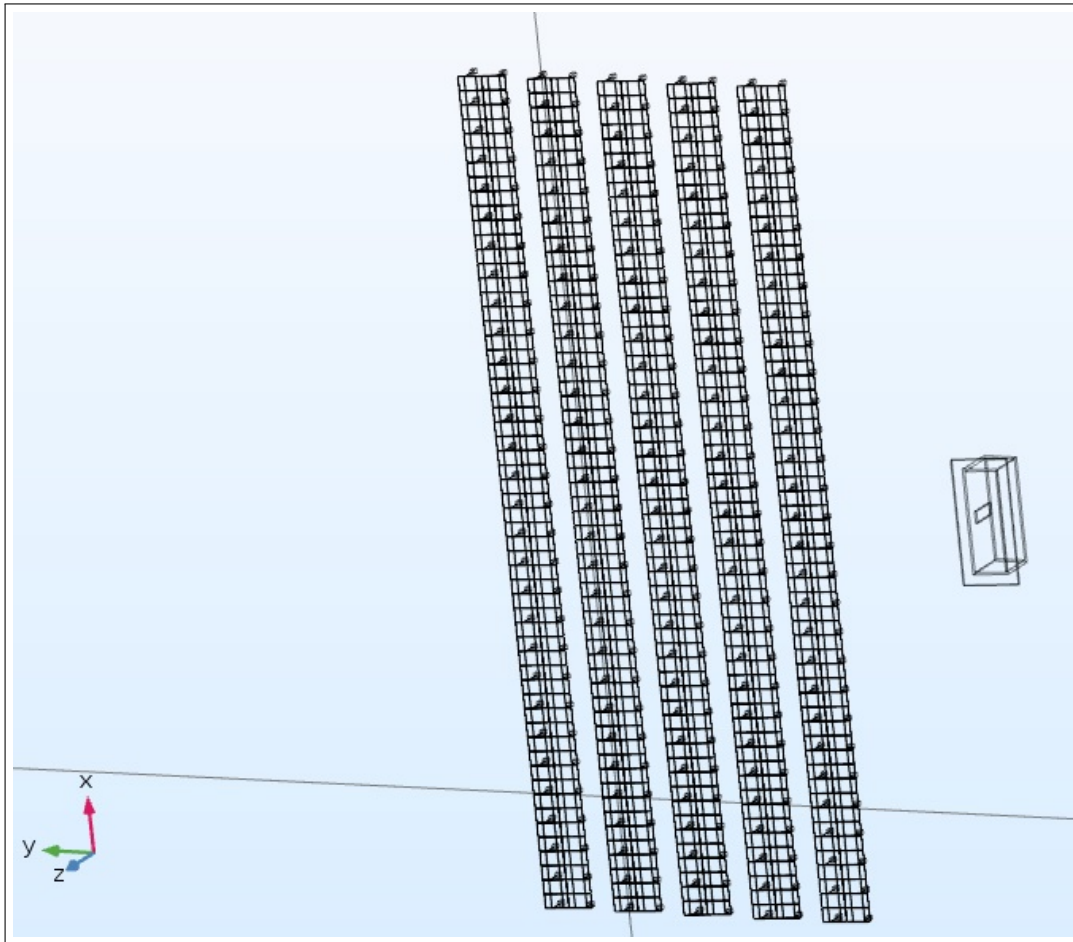
Figura 28 – Fluxograma de implementação do EFD no Comsol



Fonte: o autor

Inicialmente é realizada a identificação da estrutura a ser protegida, podendo existir o projeto da mesma em alguma plataforma com extensão *.dwg*, ou o usuário pode optar por desenhar a estrutura no próprio Comsol. No caso desta simulação, foi necessário desenhar planta em três dimensões, uma vez que não existia acesso a extensão do arquivo em formato *.dwg*. O desenho da unidade de minigeração pode ser verificado na Figura 29.

Figura 29 – Desenho da unidade de minigeração no Comsol



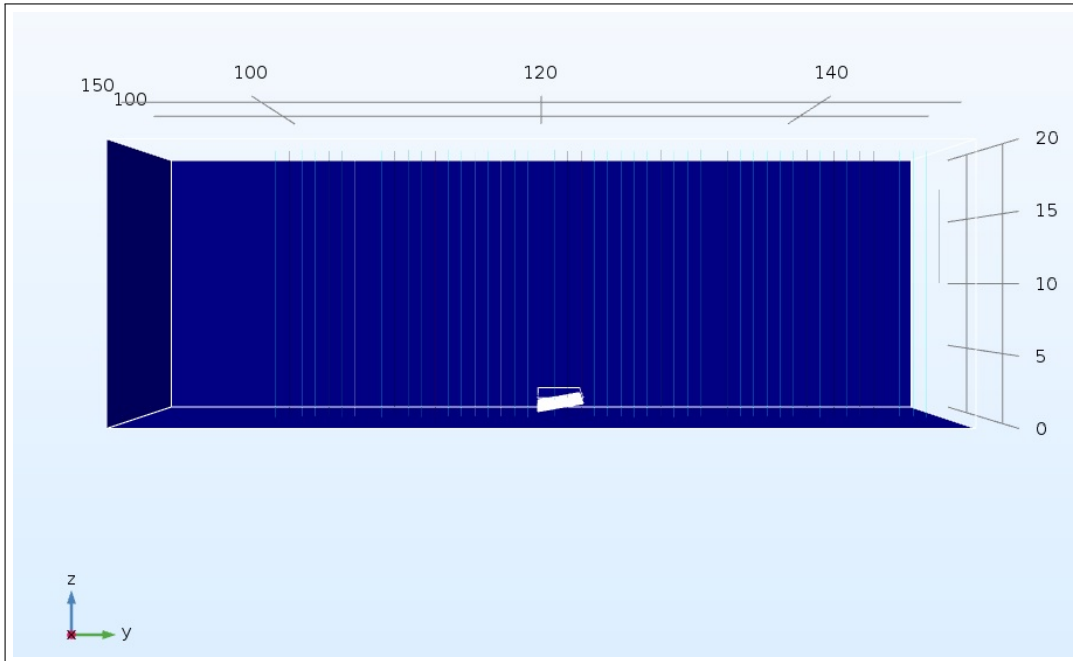
Fonte: o autor

A unidade de minigeração fotovoltaica distribuída é constituída de cinco arranjos de placas fotovoltaicas, além de um cubículo que abriga equipamentos de eletrônica da usina solar, tais como os inversores e o DPS. A simulação por elementos finitos, requer uma malha adequada, o que não é tão simples de se obter quando se tem elementos de ordem de grandeza em milímetros e outros de quilômetros. Essa grande variação de escala requer um grande número de elementos finitos para preencher todo o domínio, e por conta disso nem sempre a malha de elementos finitos apresenta boa qualidade.

Isso pode levar a erros nos resultado, principalmente das trajetórias das descargas atmosféricas. Uma vez que os módulos são praticamente idênticos. Visando simplificar a simulação, foi utilizado apenas um dos cinco arranjos de painéis fotovoltaicos.

Após a etapa de desenho da estrutura, deverá ser projetado o domínio (volume de ar) onde o sistema estará inserido. A Figura 30 mostra o domínio que foi gerado no software Comsol. A simulação foi realizada em formato de um paralelepípedo, com as seguintes dimensões:  $150 \times 150 \times 20$  metros.

Figura 30 – Domínio paralelepípedo (volume de ar)



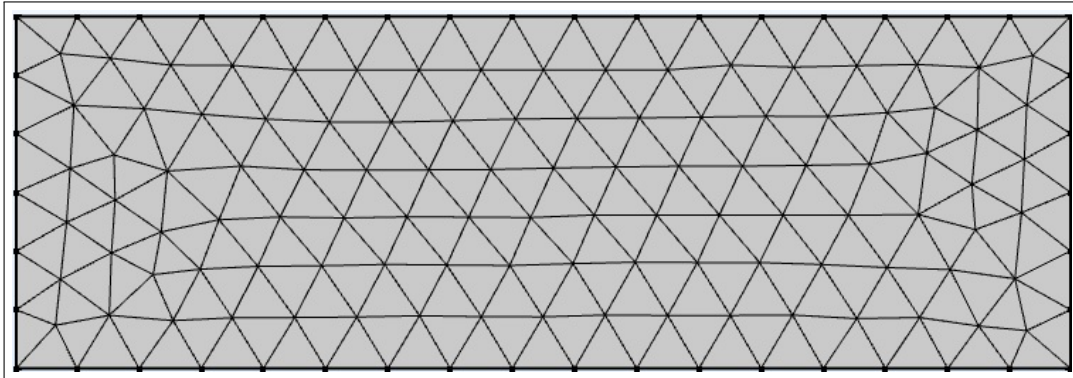
Fonte: o autor

Após a inserção do domínio, defini-se os tipos de materiais presentes na simulação, como o silício que é o principal material que compõe a célula fotovoltaica, além da fibra de vidro e o alumínio que podem estar presentes na moldura do painel fotovoltaico. Não foi considerado nessa simulação aditivos, pintura, anodização ou qualquer tipo de tratamento químico que possa alterar as propriedades do alumínio. Outros parâmetros também foram considerados, como por exemplo a permissividade relativa do ar (dielétrico), que é fundamental para solução da equação de Poisson.

É necessário também definir as condições de contorno, como o potencial de  $-100\text{ kV}$  no domínio superior, além daquele da superfície inferior, onde o potencial é nulo (terra). Essa configuração gera um campo elétrico de  $50\text{ kV/m}$ , o mesmo gerado pela base de uma nuvem de tempestade a  $2000\text{ m}$  de altitude e onde o potencial é de  $-100\text{ MV}$  (VISACRO, 2005; RODRIGUES *et al.*, 2016).

A construção da malha do sistema também é necessária, sendo formada a partir de vários elementos finitos. A presente simulação possui  $131.442$  elementos em formato triangular e  $1.628.365$  elementos tetraédricos. A malha pode ser observada na Figura 31.

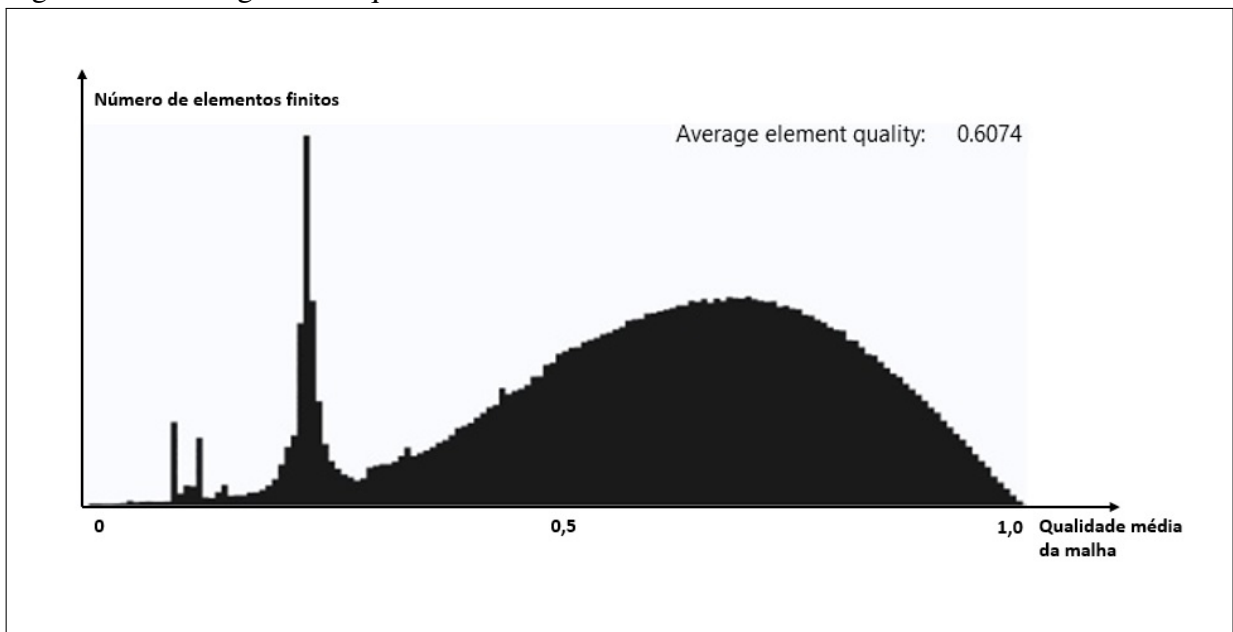
Figura 31 – Domínio retangular (Malha de elementos finitos)



Fonte: o autor

Durante o processo de simulação pode ser percebido que a qualidade da malha não é suficiente para gerar um resultado satisfatório, quando isso acontece, é necessário aumentar a quantidade de elementos finitos. O Comsol possui uma função estatística que permite verificar a qualidade da malha, um parâmetro que vai de 0 a 1. Gera-se um histograma do número de elementos em função da qualidade da malha conforme pode ser observado na Figura 32. Também é calculado o parâmetro de qualidade média. No caso desta simulação, o parâmetro de qualidade média foi de 0,6074.

Figura 32 – Histograma da qualidade da malha



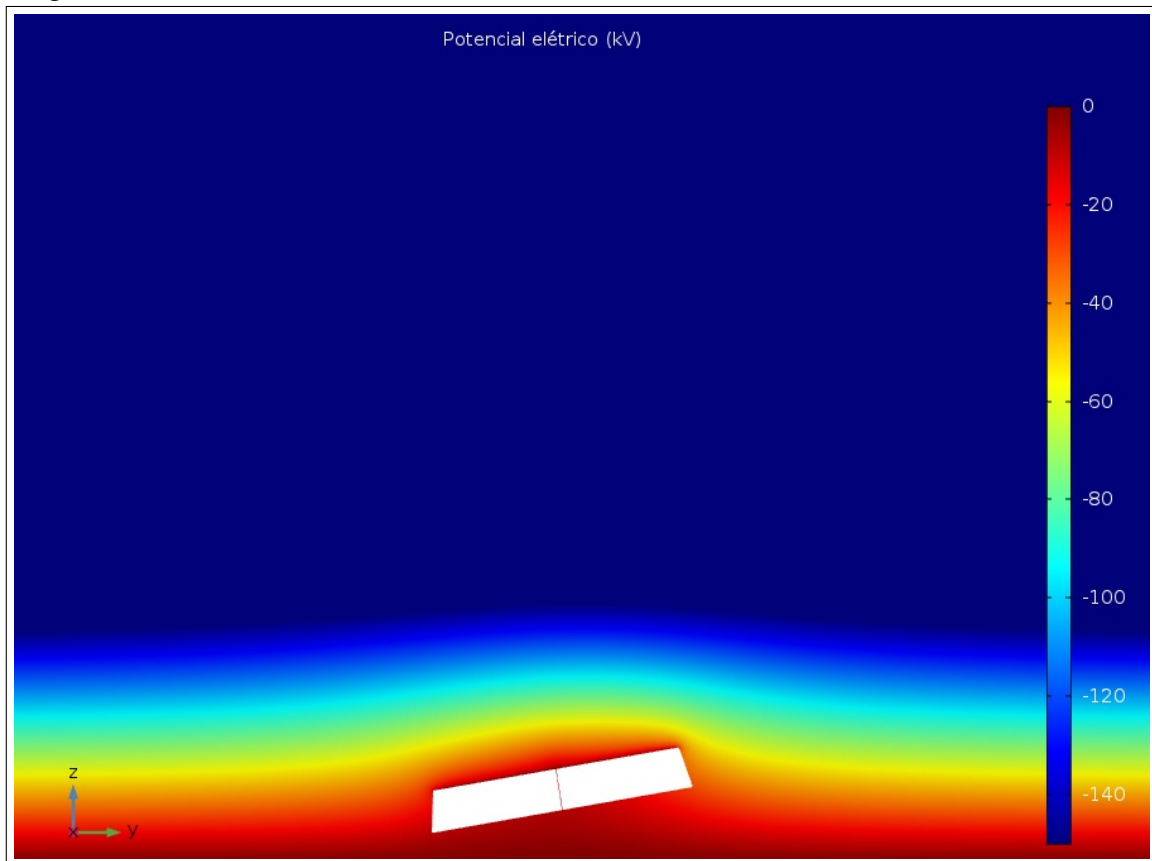
Fonte: o autor

Após ser projetada e validada a qualidade da malha, é necessário inserir as equações diferenciais, que serão resolvidas em cada elemento finito da malha. A equação diferencial a ser resolvida neste caso é a Equação de Poisson dada por:

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = -\rho. \quad (4.1)$$

O potencial simulado para a planta da UFERSA por meio da Equação 4.1 encontra-se na Figura 33. Para altitudes muito acima dos painéis fotovoltaicos, o potencial é menor do que -140 kV enquanto nas proximidades do solo o potencial é nulo (terra). Percebe-se que as equipotenciais são curvadas nas proximidades dos painéis.

Figura 33 – Potencial elétrico



Fonte: o autor

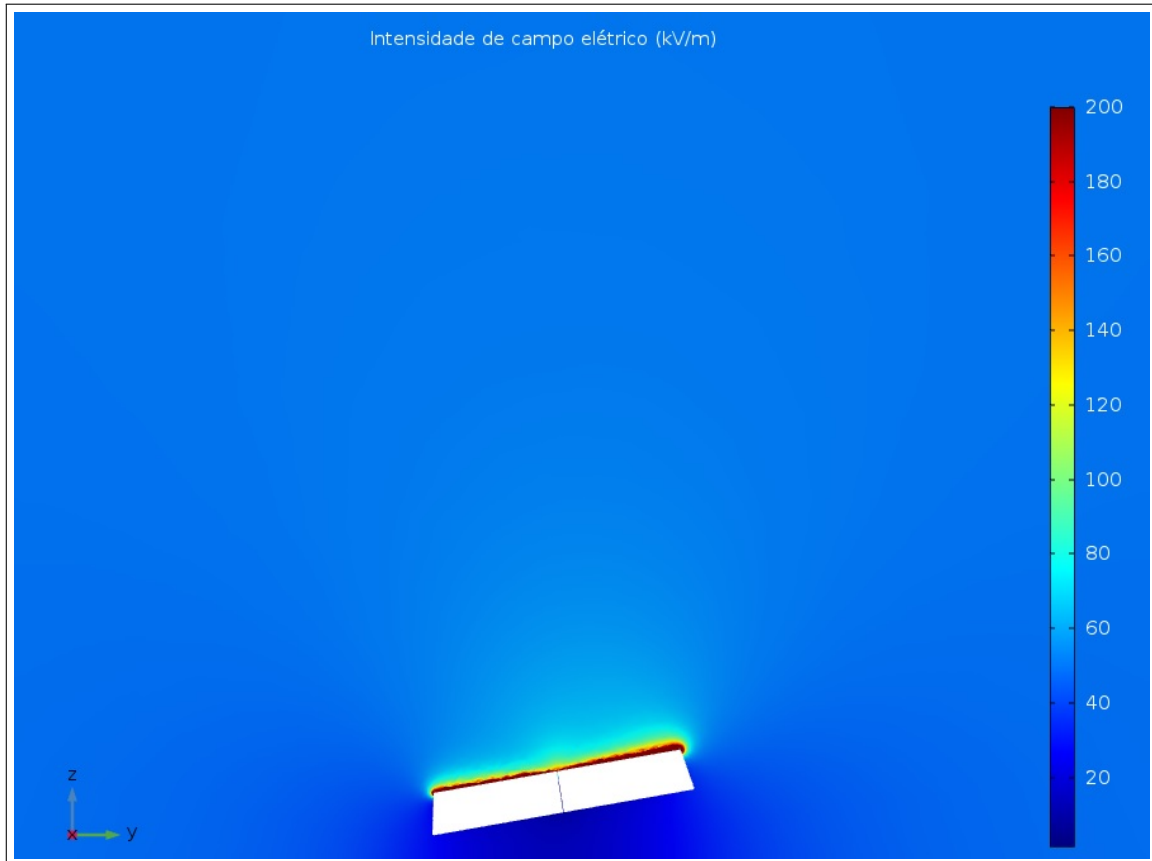
Depois de resolver a Equação 4.1 para potencial, obtém-se o campo elétrico por

$$\vec{E} = -\nabla V. \quad (4.2)$$

A Figura 34 apresenta o campo elétrico obtido pela Equação 4.2. Percebe-se que a intensidade do campo elétrico supera os 200 kV/m. Esse valor não é suficiente para quebrar a rigidez

dielétrica do ar em condições de bom tempo que é cerca de 3 MV/m. Todavia, em condições de tempestades, a rigidez dielétrica do ar cai para cerca de 100 MV/m. Deste modo podem surgir canais ionizados a partir das placas fotovoltaicas.

Figura 34 – Intensidade do campo elétrico



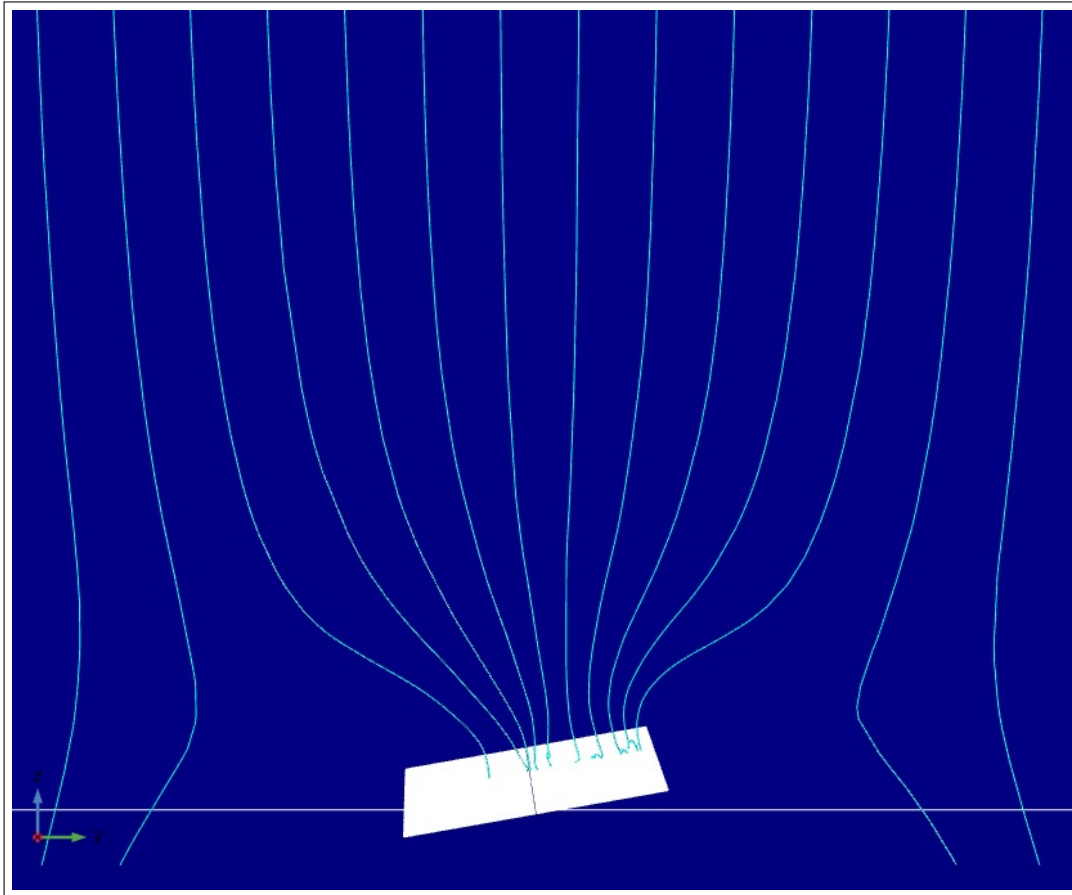
Fonte: o autor.

E finalmente, a trajetória da descarga atmosférica é determinado pela Eq. 2.15. Para todas simulações, foi adotado um salto médio  $\lambda = 20$  m, que corresponde ao raio de atração mínimo do nível de proteção I, conforme estabelecido na NBR 5419:2015 da ABNT. As trajetórias estimadas pelo modelo de incidência EFD encontra-se na Figura 35.

Com a simulação apresentada na Figura 35 podemos constatar que as descargas atmosféricas podem atingir o painel, podendo assim danificar o sistema, com isso percebido podemos admitir que o método EFD converge com os métodos tradicionais (ângulo de proteção e a técnica das esferas rolantes) quanto a necessidade de existir proteção contras descargas atmosféricas diretas na unidade de minigeração distribuída solar.



Figura 35 – Simulação de descarga atmosférica



Fonte: o autor

## 4.2 Topologias de proteção

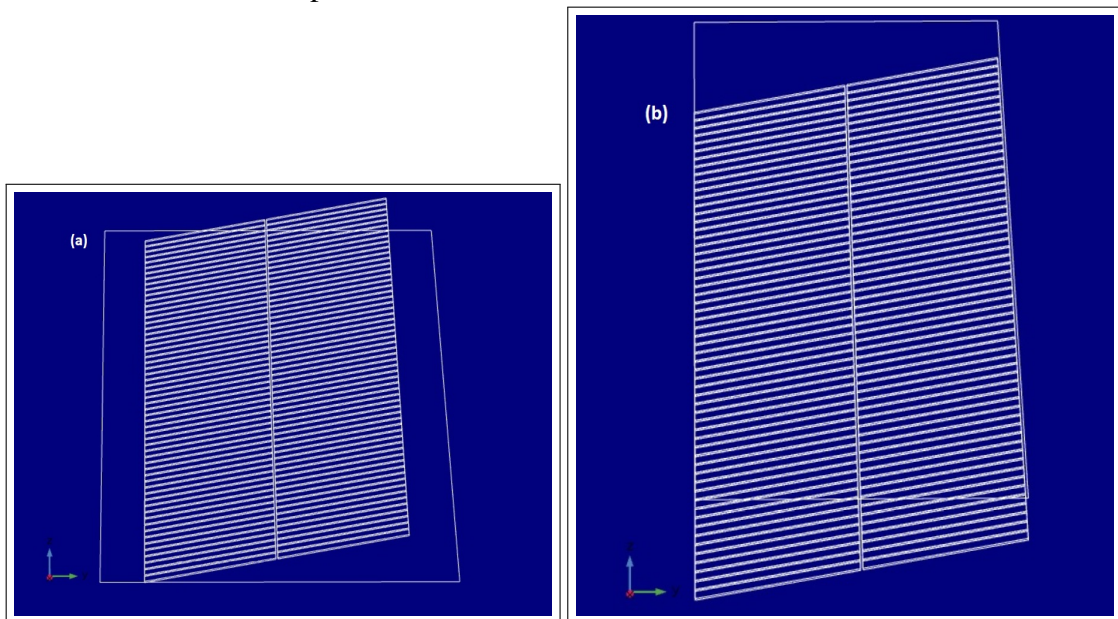
Após ser verificadas as análises de incidências de descargas atmosféricas através dos métodos tradicionais, conforme descrito na Seção 2.4 e de um método eletroestático (EFD), conforme descrito na Seção 2.4.4, pôde ser percebido a necessidade de instalar um SPDA na unidade de minigeração fotovoltaica.

A topologia de proteção do SPDA pode conter diversas arquiteturas, dentre as quais podemos citar: utilização de captadores tipo Franklin, instalação de cabo guarda no perímetro ou ao redor da estrutura, instalação de malhas captoras, emprego de topologias mistas entre outras configurações possíveis. As topologias devem atender as necessidades de proteções verificadas nas análises de incidências de descargas atmosféricas dos modelos tradicionais, desde que sejam instaladas corretamente. Para validar as proteções através da análise de incidência utilizando o método EFD, foi necessário simular a estrutura com as topologia de proteção instaladas.

Para este trabalho foram analisadas duas topologias de proteção, sendo a primeira (topologia a), conforme pode ser observado na Figura 36a um cabo guarda, tipo cobre nú com

seção transversal de  $50 \text{ mm}^2$  ao redor de toda a estrutura do arranjo fotovoltaico, porém a instalação da proteção se localiza abaixo da altura máxima da estrutura (painel fotovoltaico). Também será realizada uma segunda topologia similar ao anterior, conforme pode ser verificado na Figura 36b, porém nesse caso o cabo guarda está instalado acima da altura máxima dos painéis fotovoltaicos (topologia b). Em ambas topologias, as placas estão dispostas com a inclinação de  $10^\circ$  conforme os arranjos fotovoltaicos da planta.

Figura 36 – (a) topologia de proteção A ao redor das placas ; (b) topologia de proteção B sobre as placas



Fonte: o autor

Uma vez que as topologias de proteção estão definidas, a simulação apresentará cenários de acordo com o material que constitui as molduras, conforme pode ser verificado na Tabela 4. Em todos os cenários foram consideradas que as células fotovoltaicas são fabricadas em silício, entretanto as molduras pode ser de alumínio (índice 1) ou fibra de vidro (índice 2) conforme descrito na Seção 3.1.

Tabela 4 – Cenários de simulação

Cenário	Alumínio	Fibra de vidro
Topologia A	A1	A2
Topologia B	B1	B2

Fonte: ABNT (2015)

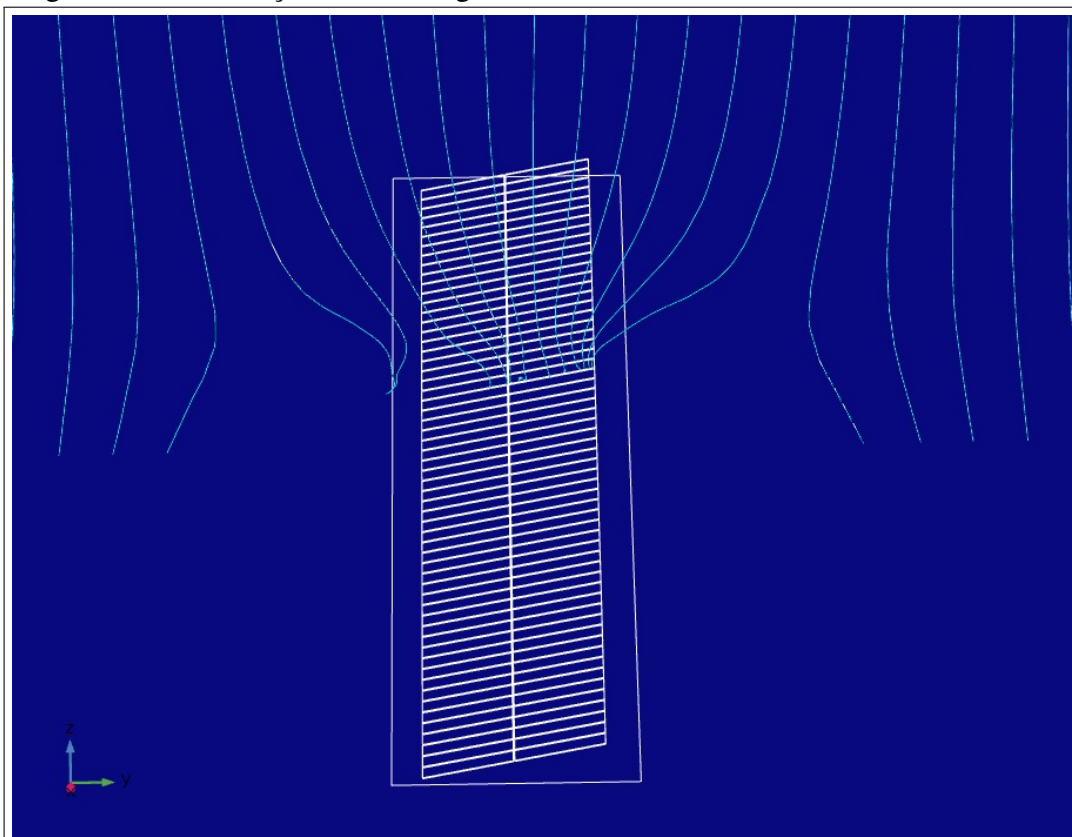
#### 4.2.1 Cenário A1

A Figura 37 mostra a incidência de descargas atmosféricas com a topologia do cenário A1, em que um cabo guarda com seção transversal de  $50 \text{ mm}^2$ , é instalado ao redor dos módulos fotovoltaicos, e que a moldura dos painéis são fabricado em alumínio.

Duranta a simulação, pôde ser percebido que o cabo guarda realiza a captação das descargas atmosféricas, assim como também foi verificado que com os painéis fotovoltaicos também ocorre o mesmo fenômeno, isso acontece em virtude do material que existe na moldura do painel fotovoltaico (alumínio), haja vista que ele está aterrado (possuindo potencial nulo).

Por tanto o painel fotovoltaico funciona como um captor natural, existindo riscos de danificar os equipamentos eletrônicos presentes na usina solar, além ocasionar a interrupção da geração de energia em uma eventual descarga atmosférica.

Figura 37 – Simulação com cabo guarda abaixo da estrutura

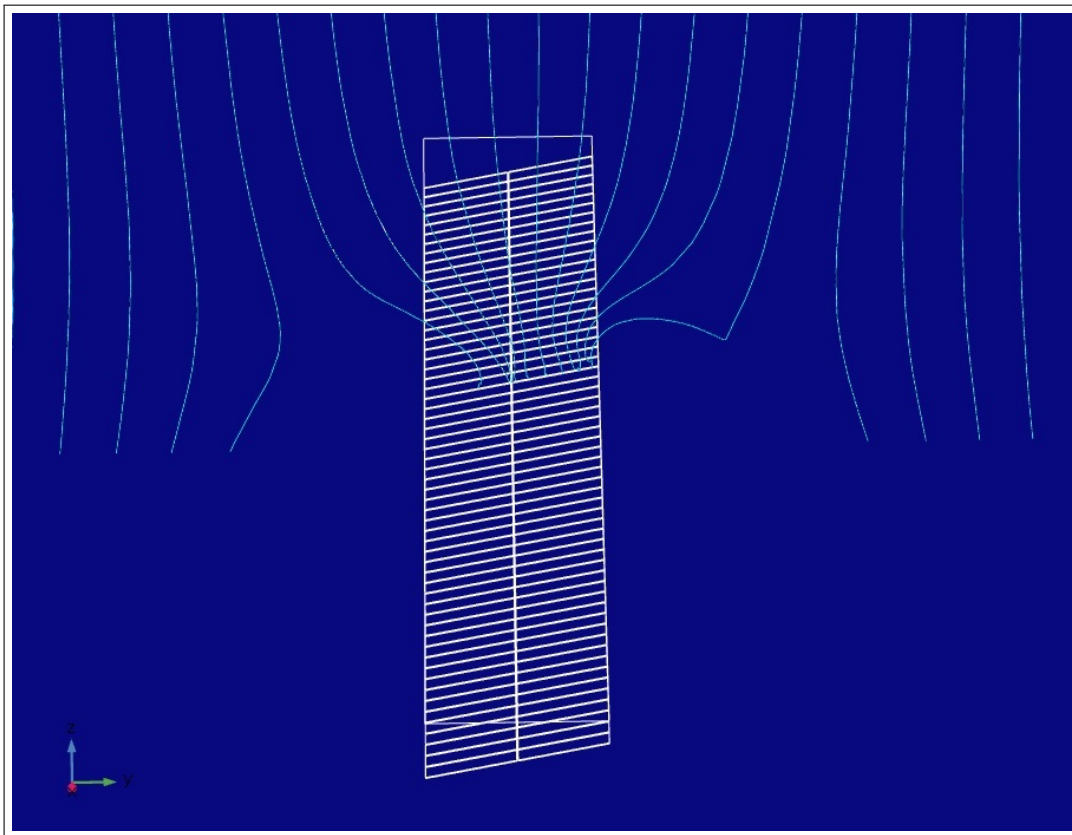


Fonte: o autor

#### 4.2.2 Cenário B1

Quando é realizado novamente a simulação da topologia de proteção com o mesmo cabo guarda do cenário A1, porém dessa vez ele inserido acima dos painéis fotovoltaicos, o resultado obtido é praticamente o mesmo, ou seja a trajetória do líder descendente da descarga atmosférica tende a se encontrar com o cabo guarda, que será atraído para o painel, conforme pode ser observado na Figura 38.

Figura 38 – Simulação com cabo guarda acima da estrutura



Fonte: o autor

Diante disso pôde ser constatado durante a simulação do método EFD, que nenhuma topologia de proteção, especificada a partir de uma análise de incidência de descargas atmosféricas citadas na NBR 5419:2015 irá proteger totalmente o painel fotovoltaico enquanto ele possuir captação natural.

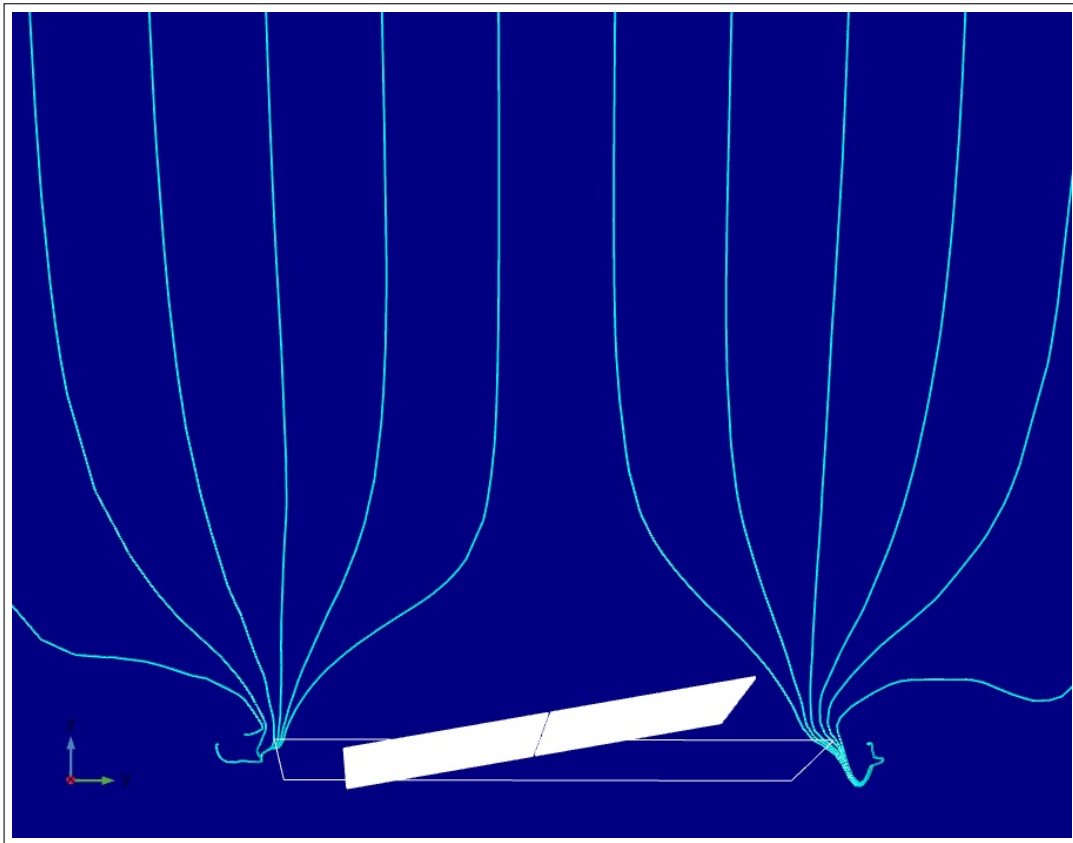
#### 4.2.3 Cenário A2

Para comprovar que as molduras ao redor das células fotovoltaicas estão funcionando como captadores de descargas atmosféricas, será realizado uma simulação eletroestática

substituindo o tipo de material da moldura do módulo fotovoltaico, que antes era de alumínio (material extremamente condutivo), agora por um material isolante, ou com baixa condutividade elétrica. O material escolhido para essa simulação foi a fibra de vidro.

Na Figura 39, é realizado a simulação com a topologia do cabo guarda ao redor do painel fotovoltaico construído utilizando-se de fibra de vidro nas molduras. Pode ser percebido que a descarga atmosférica é atraída somente para o cabo guarda, ou seja, mesmo que o captor não esteja instalado acima da estrutura, a descarga atmosférica ainda assim será direcionada para os condutores de captação que estão posicionados de modo a funcionar como um captor.

Figura 39 – Simulação da topologia com cabo guarda ao redor da estrutura e molduras de fibra de vidro

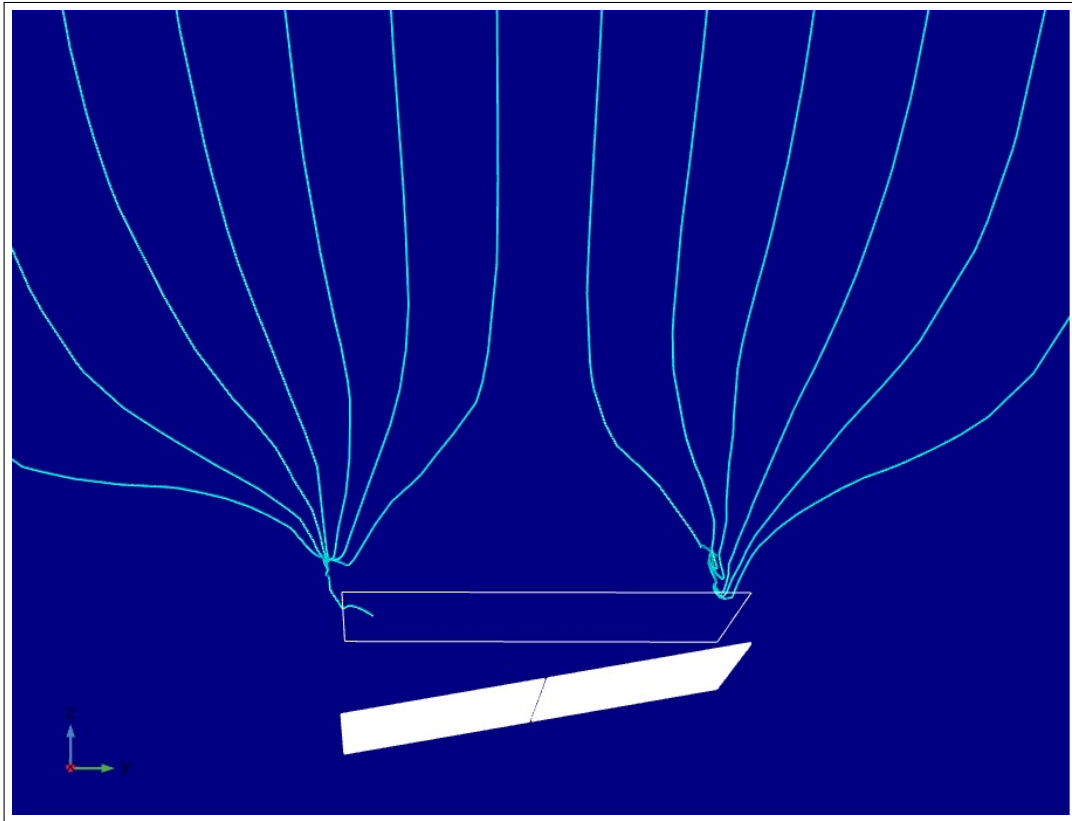


Fonte: o autor

#### 4.2.4 Cenário B2

Quando é feito a simulação novamente com a moldura dos painéis fabricada em fibra de vidro, e com o mesmo cabo guarda de cobre nú, porém agora instalado acima da estrutura, o resultado é semelhante, ou sejam, não existe incidências de descargas atmosféricas nas placas, conforme pode ser observado na Figura 40.

Figura 40 – Simulação da topologia com cabo guarda acima da estrutura e moldura de fibra de vidro



Fonte: o autor

Dessa forma, segundo os métodos tradicionais, que são inclusive citados na NBR 5419:2015 (ângulo de proteção e a técnica das esferas rolantes), a instalação de captosres nas regiões de incidência de descargas atmosféricas protegeria estruturas ali localizadas. Isto é explicado pelo simples fato desses métodos somente analisarem a geometria estrutura, e não verificam parâmetros importantes como distribuição do campo elétrico, potencial, permissividade relativa do meio dielétrico e composição dos materiais empregados na estrutura, que são parâmetros importantes quando o sistema a ser protegido são painéis fotovoltaicos. A partir dessas observações, pode-se afirmar que o método EFD é mais eficaz que os modelos tradicionais quando se analisam as estruturas fotovoltaicas.

Portanto, a topologia de SPDA proposta neste trabalho para a unidade de minigeração fotovoltaica distribuída, localizada na UFERSA, é a utilização de um cabo guarda de  $50 \text{ mm}^2$  acima da altura das placas, uma vez que esta condição atende os métodos tradicionais, fazendo-se também é necessário que a moldura das placas seja fabricada com fibra de vidro. Estas condições atendem também o método EFD e a simulação da topologia mostrada na Figura 40, retratando o cenário B2.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Conforme observado no presente estudo, a análise de incidência de descargas atmosféricas através do método EFD, obteve resultados satisfatórios quando comparado aos métodos amplamente utilizados, como ângulo de proteção e a técnica das esferas rolantes, no que concerne somente a análise da geometria da estrutura.

O estudo de caso deste trabalho, foi elaborado com a criação de quatro cenários na estrutura de uma usina de minigeração fotovoltaica distribuída. O primeiro deles foi o cenário A1, no qual foi instalado um captor ao redor da estrutura, cujos painéis fotovoltaicos possuem moldura fabricada em alumínio. Também foi proposto o cenário A2, em que a captação segue os mesmos parâmetros do cenário A1, porém houve a modificação no material da moldura dos painéis fotovoltaicos, substituindo o alumínio por fibra de vidro.

Um terceiro cenário também foi analisado (cenário B1), em que se tem a captação através de um condutor tipo cabo guarda de  $50 \text{ mm}^2$ , instalado acima da estrutura, com o material da moldura do painel fotovoltaico sendo alumínio. Também foi verificado um quarto cenário (B2), no qual é repetido a instalação da captação acima da estrutura e utilizado no cenário B1, porém foi utilizada a moldura fabricada em fibra de vidro.

Com a simulação dos quatro cenários, foi identificado que existe a possibilidade dos painéis fotovoltaicos serem atingidos por descargas atmosféricas diretas, caso utilizem a topologia de proteção A1 ou B1, uma vez que o alumínio presente da moldura das placas, por ser um bom condutor funcionará como um captor natural. Já as topologias A2 e B2, as placas não serão atingidas por não possuírem esse captor natural, haja vista que o material de fabricação da moldura considerado foi a fibra de vidro.

Diante do exposto, foi especificado como topologia ideal para a proteção contra descargas atmosféricas da planta deste estudo de caso, o cenário B2, uma vez que ele atende os métodos tradicionais (ângulo de proteção e a técnica das esferas rolantes), assim como também o método EFD.

Em trabalhos futuros, propõe-se realizar a mesma simulação, porém considerando eventuais alterações das propriedades do alumínio, através de processos químicos, anodização, pintura etc, já que ele é o principal material utilizado na confecção de molduras. Outra sugestão de trabalho seria analisar as descargas indiretas que podem ser causadas na planta de minigeração fotovoltaica distribuída e quais as soluções de proteção, visando esse tipo de fenômeno.



## REFERÊNCIAS

- ANEEL687. **Resolução normativa N° 687**. 2015. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 01 ago. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419**: Proteção contra descargas atmosféricas — parte 02: Gerenciamento de risco. Rio de Janeiro, 2015. 100 p.
- BETZ., H. D.; SCHUMANN, P. L. U. **Lightning**: Principles, instruments and applications - review of modern lightning reseach. [S. l.]: Springer, 2009.
- BORTOLADO, W. W. **Estudo comparativo das alterações da norma NBR 5419, avaliação e estudo de gerenciamento de risco**. 2017.
- CANADIAN. **Multiphysics Software Product Suite**. 2018. Disponível em: <<https://www.canadiansolar.com>>. Acesso em: 10 ago. 2018.
- CAVENDISH, H.; WATSON, W.; FRANKLIN, B.; ROBERTSON, J.; WILSON, B. A report of the committee appointed by the royal society, to consider of a method for securing the powder magazines at purfleet. **Philosophical Transactions**, The Royal Society, v. 63, p. 42–48, 1773.
- COORAY, V. **Lightning Protection**. [S. l.]: IET Power and Energy Series, Londres, 2010. v. 1.
- DELLERA, L.; GARBAGNATI, E. Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. ii. exposure and shielding failure evaluation of overhead lines with assessment of application graphs. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 5, n. 4, p. 2023–2029, 1990.
- FINDER. **Guia para aplicação de Dispositivos de Proteção contra Surtos - DPS**. 2012. Disponível em: <<http://www.findernet.com>>. Acesso em: 10 ago. 2018.
- GORIN, B.; LEVITOV, V.; SHKILEV, A. Some principles of leader discharge of air gaps with a strong non-uniform field. In: **IEE Conf. Publ.** [S.l.: s.n.], 1976. v. 143, p. 274–278.
- GRUPO DE ELETRICIDADE ATMOSFÉRICA. **Densidade de descargas atmosféricas para a terra (Ng)**. 2015. Dados publicados na ABNT NBR 5419-2:2015 - Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 2: Gerenciamento de risco. Disponível em: <[http://www.inpe.br/webelat/ABNT\\_NBR5419\\_Ng/](http://www.inpe.br/webelat/ABNT_NBR5419_Ng/)>. Acesso em: 28 jun. 2016.
- KINDERMANN, G. **Tempestade e Relâmpagos no Brasil**. [S. l.]: Sagra Luzzatto Editores, Porto Alegre, 1997. v. 1.
- LACERDA, M. **Dúvidas e limitações do modelo eletrogeométrico**. [S. l.]: Eletricidade moderna, São Paulo, 1989. v. 1.
- LEITE D, M. **Proteção contra descargas atmosféricas**. [S. l.]: Oficina de mydia, São Paulo, 2001. v. 1.
- MULTIPHYSICS, C. **Multiphysics Software Product Suite**. 2018. Disponível em: <<http://www.br.comsol.com/products>>. Acesso em: 10 ago. 2018.
- PINHO JOAO T ; MARCO, A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. [S.l.]: Rio de Janeiro, 2014.



PINTO JUNIOR, O.; PINTO, I. R. C. A. **Tempestades e Relâmpagos no Brasil. São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 193 p.** [S.l.], 2000.

POTIER, G. D. C.; GAZZNA, D. D. S.; DIAS, G. A.; SILVA, L. C.; TELLÓ, M. **Física dos Raios & Engenharia de Proteção.** [S.l.]: EDIPUCRS, 2010.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: physics and effects.** [S. l.]: Cambridge University Press, 2003.

RODRIGUES, E. M.; PONTES, R. S. T.; FERNANDES NETO, T. R. Novel lightning incidence model based on the electric field gradient: 2d electrostatic analyses. **International Conference on Grounding and Earthing 8th International Conference on Lightning Physics and Effects, Pirenópolis, Brazil, 2016.**

ROMERO, F. **Avaliação do comportamento dos campos eletromagnéticos gerados por descargas atmosféricas nuvem-terra.** Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SADIKU, M. N. O. **Numerical techniques in electromagnetics. 3. ed.** [S.l.]: New York: CRC Press, 2009.

SHIGIHARA, M. **Avaliação de correntes de descargas atmosféricas através de medições diretas em estruturas altas.** Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SILVA, J. C. O. Com vocês a nbr 5419-1. **O Setor elétrico**, Edição 112, p. 1–4, 2015, Citado na página 19.

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

URBANETZ, J. J. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos e dimensionamento de sistemas.** [S.l.]: Curitiba, 2012.

VISACRO, S. **Descargas atmosféricas uma abordagem de engenharia.** [S. l.]: Artliber Editora, São Paulo, 2005. v. 1.

**APÊNDICE A – GROUND'2018 & 8<sup>TH</sup> LPE**

*Digest submetido ao International Conference on Grounding and Earthing & 8<sup>th</sup> International Conference on Lightning Physics and Effects, Pirenópolis, GO - May, 2018, BR.*

## A STUDY OF THE PROTECTION OF A CONSUMER UNIT EQUIPED WITH PHOTOVOLTAIC MICROGENERATION AGAINST A DIRECT LIGHTNING STRIKE

Bruno R. Lisboa Ednardo M. Rodrigues Ricardo S. T. Pontes

Department of Electrical Engineering, Federal University of Ceará ; Center of technological sciences University of Fortaleza

**Abstract** – The use of Distributed Generation (DG) is propelled by a strong tendency by consumer units to reduce their energy costs. In most installations the DG is located at the top of the building, making the DG vulnerable to lightning strikes. This work aims to simulate the incidence of lightning strikes on a building equipped with photovoltaic (PV) microgeneration through an electrostatic simulation, comparing the results obtained from this simulation with the ones obtained by the widely used modelling methods of the Protection Angle and the Rolling Spheres. In addition, an analysis on lightning protection is carried out on two different PV panel construction: a conventional one with aluminium frame and a less common one of fiberglass frame.

### 1 - INTRODUCTION

The inclusion of photovoltaics (PV) in Distributed Generation (DG) in the Brazilian electric system has been taking place in a gradual manner. Frequently, it is driven by a tendency from the part of the consumers to reduce their energy costs. The main goal of DG is to allow the generation of electric energy within the consumer unit itself. Its use implies the necessity of the installation of PV systems whose area of occupation varies in function of the desired amount of electric power to be generated. In most facilities, the DG is located at the top of the building, due to its area of occupation and exposure to sunlight. As a consequence of their positioning at the top of buildings, they are exposed to the natural phenomenon of lightning [1].

### 2 – LIGHTNING INCIDENCE MODELS

The main models for the analysis of the incidence of lightning strikes are: Protection Angle, Electrogeometric and Rolling Spheres.

A description for each one of these methods is given in the following sections.

#### 2.1 – PROTECTION ANGLE MODEL

The Protection Angle Model is one of the most used in the analysis of lightning strike and is based on the definition of an angle between the tip of the vertical rod and a line projected into the reference plane. The angle varies in function of the height of the rod and the class of protection. This variation is between 23° and 80°. This

method is mainly used with buildings of height inferior to 60 m [2].

#### 2.2 – ELECTROGEOMETRIC MODEL

The EGM is based on the concept of striking distance, which can be described as the distance between the downward leader and the reference plane. If an edification is beyond this estimated distance  $R_a$ , then the downward leader is likely to hit the structure [3,4].

This method is widely used for the protection of transmission lines [4,5].

Due to evidence resulting from laboratory experiments, photographic and video records of actual lightning strikes, specialists relate the module of discharge current of highest magnitude to the attractive radius  $R_a$ . The most commonly used expression given by [6]:

$$R_a = 7.1I_p^{0.75} \quad (1)$$

where  $I_p$  is the lightning strike peak discharge current. The class and radii of LPS are I (20 m), II (30 m), III (45 m) and IV (60 m).

#### 2.3 – ROLLING SPHERES METHOD

The Electrogeometric Method was adapted to buildings and then became known as the Rolling Spheres Method.

This technique is based on the definition of a volume of protection offered by the captor system against lightning strikes. It is mainly used on buildings of greater heights or of more elaborate architectural designs [7].

The protection zone is defined as the area below the sphere arcs which intersect the structure [7]. The sphere's attractive radius  $R_a$  is also given by Eq. 1.

#### 2.4 – LEADER PROGRESSION MODEL

The Leader Progression Model (LPM) consists in representing the evolution of the downwards leader in determined instants, considering the existing electric field at the end of the channel and the electric field of a future lightning strike. In order to employ this incidence method it is necessary to obtain a charge distribution on cloud and ground through the charge simulation method

[09,10]. However, this method is not adopted by Brazilian protection standards [7].

### 2.5 – ELETRIC FIELD DEFLECTION METHOD

This method is based on the deflection of the electrostatic field due to the ionization of air. This deflection is proportional do the average step length of the lightning strike and to the gradient of the electric field module. The trajectory direction of the strike is obtained by the directional vector given by [8]:

$$\vec{E}_L(\vec{r}) \cong \vec{E}_b(\vec{r}) + \lambda \nabla E_b(\vec{r}) \quad (2)$$

$\vec{E}_L$ : Electric field which describes the direction of the lightning strike,  
 $\vec{r}$ : Position vector of the tip of the downwards leader,  
 $\vec{E}_b$ : Background electric field, generated by the cloud's base and the ground,  
 $\lambda$ : Step length.

This approach uses the parallel plates capacitor model with air as dielectric medium. The upper plate represents the base of the cloud and the bottom plate represents the ground's surface.

### 3 - DEVELOPMENTS

In order to analyse the direct lightning strikes on a PV microgeneration consumer unit, a plant was modeled after a real system located in the city of Fortaleza, in the state of Ceará in Brazil. A photograph of this real system is given in Fig. 1.

The plant corresponds to a two-story edification with the following characteristics: distance of 12 m between the ground reference plane and the tip of a Franklin lightning rod, length of 25 m, width of 7.5 m, with a water tank (8 m x 6.46 m x 3.5 m) at the top, above which is located the Franklin lightning rod, as it can be seen in Fig 2. The edification is equipped with 36 PV panels, each 1 m wide and 1.67 m long, with inclination of 3.8 ° and located 1 m next to the water tank. The frames used in the PV panels constructions are made out of aluminium, which is an important characteristic for this work's analysis.



Figure 01 – Photograph of the plant in study.

The PV panels location at the buildin's rooftop, next to the water tank, is illustrated in Fig. 2.a.

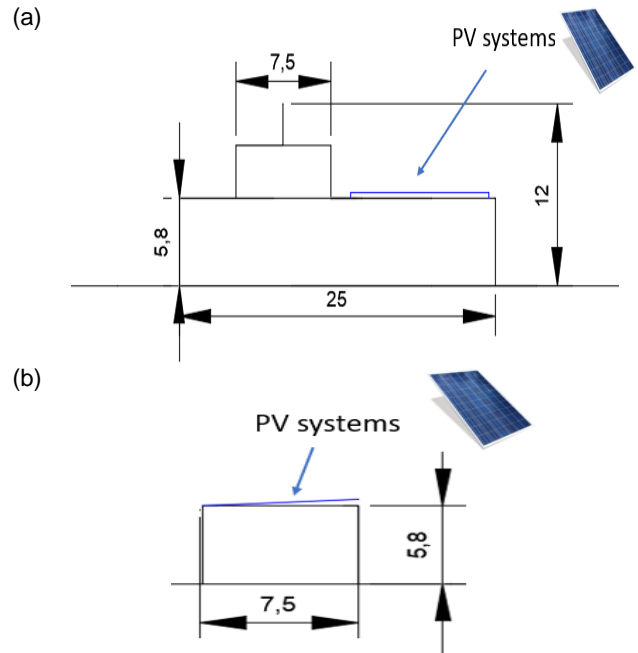


Figure 02 – Plant dimensions in meters: (a) side view, (b) front view.

### 4 – RESULTS

Once the plant's dimensions were collected, it was possible to model the incidence of lightning through the following methods: Protection Angle, Rolling Spheres and Electric Field Deflection (EFD). The Leader Progression Model was not used due to its complexity of implementation and to the fact that the Brazilian lightning protection standards do not adopt this model.

In Fig. 3 it can be seen that, according to the Protection Angle Method, virtually all the area containing the panels is located in the protection zone. The structure is classified as a level IV protection. The analysis was carried out with an angle of 70 °, which is recommended for a 12 m height for the refered protection level [2].

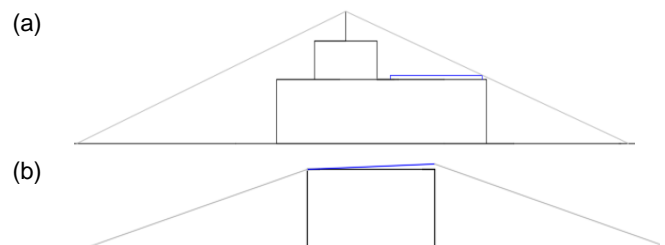


Figure 03 – Analysis of the lightning strike incidence on the PV panels through the Protection Angle model: (a) side view, (b) front view

In Fig. 4, we have the incidence analysis through the Rolling Spheres method, for an attractive radius of 60 m, which is the indicated for the level IV protection [3-abnt].

Similarly to the Protection Angle, the Rolling Sphere method indicated that the PV panels were protected from lightning.

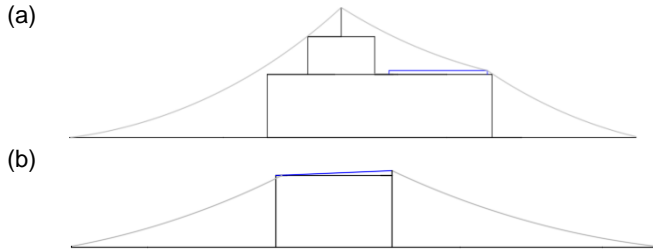


Figure 04 – Analysis of the lightning incidence on the PV panels through the Rolling Spheres method: (a) side view, (b) front view

As the frames of the PV panels are made out of aluminium and connected to ground, they are likely to attract lightning. As the Rolling Spheres and Protection Angle methods do not take into account the materials used in the structure, they completely neglect the aluminium frames tendency to attract lightning and therefore present a rather unrealistic estimative of the PV protection against lightning. A third analysis was then carried out, now using the recently developed Electric Field Deflection method [8] presented in Sec. 2.5. For simulation purposes, a step length LAMBDA of 60 m was adopted, which corresponds to the minimum attractive radius for level IV protection as stated in NBR 5419/2015 standards [2].

The simulations were carried out using *COMSOL Multiphysics®*, a modeling software based on the finite element method for solving differential equations. The simulations are three-dimensional and were carried out within a cubic domain with a 250 m edge. A potential of -12.5 MV was defined at the top surface of the domain, while the bottom surface was set to ground (null) potential. The electric field generated is equivalent to the one generated by a flat base of a thunderstorm cloud at 2 km altitude, where the potential is -100 MV.

First, the EFD was employed to a plant modeled like the real one described in Sec. 3, with aluminium frames. In this case (Fig. 5), even with the Franklin rod above the water tank, the EFD simulation indicates that there are lightning strikes in the panels. PV systems are likely then to be severely damaged, as they are not designed to withstand the effects of the voltages and currents that result from the strikes. This result can be explained by the fact that the aluminium frames, in this situation, act as air-terminations which attract lightning.

After verifying that lightning does strike the PV panels, an additional simulation was carried out, now considering PV panel frames made out of fiberglass, which is an electric insulating material. For this new simulation, the results are presented in Fig. 6. In this case, it can be seen that the lightning strikes are attracted to the building's edge, where the air-termination wires are located, while the PV panels are not hit.

The EFD method then showed an advantage in comparison to the traditional methods described, as it takes into account the materials employed in the structure and therefore presents a more realistic approximation of the real phenomenon, which can be

crucial for a proper design of a lightning protection system.

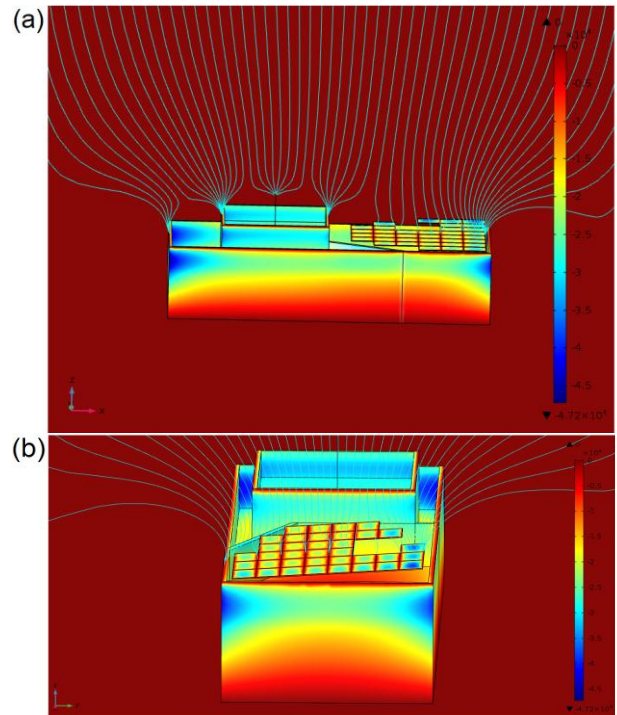


Figure 05 – Analysis of the lightning incidence on the PV panels through the EFD method, panels with aluminum frames: (a) side view, (b) front view

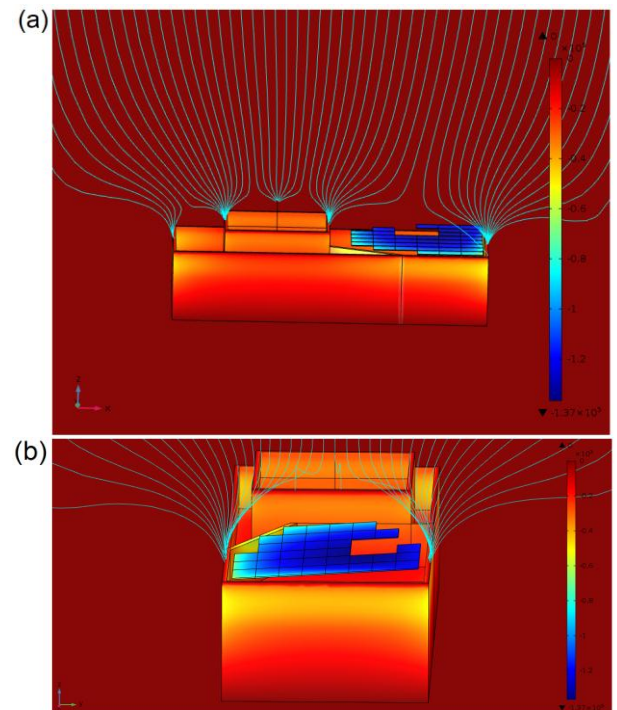


Figure 06 – Analysis of the lightning incidence on the PV panels through the EFD method, panels with fiberglass frames: (a) side view, (b) front view

## 5 – CONCLUSIONS

The Protection Angle and Rolling Spheres models take into account only the structure's geometry and the

protection level on the specification of the protected area, neglecting relevant factors such as the materials employed in the structure, which can lead to non-effective designs, as can be seen in Sec. 4.

The lightning strike analysis through the EFD method obtained different results from the traditional methods for the specific case of the protection of installations equipped with PV systems on the rooftop. While the traditional methods, considering the modeling of the plant as the real one, estimated that the panels were protected, the EFD simulation showed that the PV panels were hit by lightning in the conditions that modeled the thunderstorm.

Through the EFD electrostatic simulation, it was observed that the PV panels lightning protection can be significantly improved if the panel frames are made out of an electrically insulating material like fiberglass instead of an electrically conducting material like aluminium.

The plant studied in this work, as it is a building equipped with PV panels, differs from less recent buildings, but is representative of the edifications which embrace the strong tendency of the adoption of PV microgeneration in order to reduce energy costs. This tendency brings the necessity of revision of protection standards so they can guide the designs of protection schemes that suit these new technologies.

## 6 - REFERENCES

[1] ACKERMANN, T., ANDERSON, G., SÖDER, L., "Distributed Generation: a Definition", Electric Power Systems Research, v. 57, n. 3, p. 195 – 204, 2001. Available in: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877960101018>>.

[2] NBR 5419-3, "Lightning Protection Part 3: Physical damage to structures and life hazard", ANBT, 2015

[3] LEE, R.H., "Lightning Protection of Buildings", IEEE Transactions on Industry Application, Vol. IA-15, NO. 3. 1979

[4] VISACRO, S., "Descargas atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia", Artliber, 2005

[5] POTIER, G.C., GAZZANA, D.S., DIAS, G.A.D., and SILVA, L.C.F., "Física dos Raios & Engenharia de Proteção", ediPURS, 2010

[6] RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Lightning: physics and effects. [s. l.]: Cambridge University press, 2003.

[7] NBR 5419-3, "Lightning Protection Part 2: Physical damage to structures and life hazard", ANBT, 2015.

[8] RODRIGUES, E.M., PONTES, R.S.T., NETO, T.R.F. "Novel Lightning incidence model based on the electric field gradient: 2D electrostatic analyses". Porto de Galinhas, 2016.

### Main author

Name: Bruno Rodrigues Lisboa  
Address: Rua Clóvis Beviláqua, 100 Casa 2000  
Fax: ; Phone: +55 (85) 98899 5676  
E-mail: [brunorlisboa@gmail.com](mailto:brunorlisboa@gmail.com)