



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VINÍCIUS LEAL TARRAGÔ

**AVALIAÇÃO DA GEOMETRIA DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO NA  
REDUÇÃO DO IMPACTO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Recife  
2024

VINÍCIUS LEAL TARRAGÔ

**AVALIAÇÃO DA GEOMETRIA DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO NA  
REDUÇÃO DO IMPACTO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Dissertação apresentada do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Área de concentração:** Fotônica

**Orientador:** Profº. Dr. Lauro Rodrigo Gomes da Silva Lourenço Novo

**Coorientador:** Profº. Dr. João Marcelo Xavier Natario Teixeira

Recife

2024

Catálogo de publicação na Fonte. UFPE – Biblioteca Central

Tarragô, Vinicius Leal.

Avaliação da geometria de sistemas de aterramento na redução do impacto de descargas atmosféricas / Vinicius Leal Tarragô. - Recife, 2025.

86f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2024.

Orientação: Lauro Rodrigo Gomes da Silva Lourenço Novo.

Coorientação: João Marcelo Xavier Natario Teixeira.

Inclui referências.

1. Descarga atmosférica; 2. Engenharia assistida por computador; 3. Malha de aterramento; 4. Simulação eletromagnética. I. Novo, Lauro Rodrigo Gomes da Silva Lourenço. II. Teixeira, João Marcelo Xavier Natario. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

**VINICIUS LEAL TARRAGÔ**

**“AVALIAÇÃO DA GEOMETRIA DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO  
NA REDUÇÃO DO  
IMPACTO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Fotônica.

Aprovada em: 06/12/2024.

**BANCA EXAMINADORA**

Prof<sup>o</sup>. Dr. Lauro Rodrigo Gomes da Silva Lourenço Novo  
(Orientador e Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

Prof<sup>o</sup>. Dr. Alexander Barros Lima  
(Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

Prof<sup>o</sup>. Dr. Francisco Rodrigues Sabino Júnior  
(Examinador Externo)  
ELETROBRAS/CHESF

Prof<sup>o</sup>. Dr. Silvério Visacro Filho  
(Examinador Externo)  
Universidade Federal de Minas Gerais

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por iluminar o meu caminho, dando-me saúde e força para continuar batalhando em busca dos meus sonhos.

Exponho minha eterna gratidão à minha mãe, Telma Leal, pelo investimento na minha educação e por sempre ter apoiado minhas escolhas. Obrigado pela dedicação, esforço e amor ao me incentivar a conquistar meus objetivos.

Ao meu pai, Pedro Tarragô, que sempre demonstrou orgulho e carinho por mim.

Agradeço aos meus avós, Álvaro e Margarida Leal, que mesmo à distância, foram cruciais para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

À minha tia Iris, que sempre esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis.

Aos meus irmãos, Cayo e Rodrigo que, junto à minha mãe, proporcionaram um ambiente favorável para o meu desenvolvimento desde cedo.

À minha amada noiva, Tayzes Hagabea, que sempre me apoiou e ficou ao meu lado, ajudando-me a superar os momentos de ansiedade e a seguir em frente.

Aos amigos da UFPE: Renan, João, Gustavo, Felipe, Leonardo e Vinícius, que me ajudaram a superar os desafios impostos pela graduação. Partilhar essa trajetória com pessoas que admiro foi realmente fascinante. Obrigado por tudo.

Aos amigos que estiveram sempre ao meu lado durante toda minha caminhada, aliviando o peso dos momentos difíceis, sendo essenciais em minha vida: Luis Eduardo, Machado Junior, Gabriel Brondi.

Agradeço ao Prof. Dr. Lauro Novo, por sempre ter acreditado no meu potencial e pela dedicação em me orientar, não só durante o Mestrado, mas durante boa parte do meu período de graduação.

Dedico meu reconhecimento aos professores da Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPE (PPGEE/UFPE), em especial ao Prof. Dr. Marcos Tavares, coordenador do Laboratório de Micro-ondas (DES/UFPE), cujo suporte e infraestrutura computacional foram decisivos para a realização desse trabalho.

## RESUMO

Este trabalho aborda o comportamento e a modelagem de sistemas de aterramento submetidos a descargas atmosféricas, com ênfase nas descargas do tipo nuvem-solo. A pesquisa concentra-se na análise da influência da geometria das malhas de aterramento e dos parâmetros que impactam a eficiência na dissipação da corrente elétrica, como a impedância de surto e a distribuição de potencial no solo. Além disso, buscou-se desenvolver uma metodologia de simulação computacional para avaliar o desempenho desses sistemas frente a correntes impulsivas. Para isso, foram realizadas simulações no *software* Ansys HFSS, que permite a modelagem eletromagnética detalhada de diferentes configurações de aterramento. As análises consideram variados tamanhos de malhas e diferentes arranjos de hastes verticais, visando identificar as soluções geométricas mais eficazes para a proteção contra descargas atmosféricas.

A análise de sensibilidade do domínio de simulação contribuiu para definir um modelo otimizado para esta, garantindo resultados precisos sem sobrecarregar o processamento computacional. Além disso, um *software* em linguagem *Python* foi desenvolvido e integrado ao Ansys HFSS para automatização dos modelos, extração dos resultados e pós-processamento.

Os resultados indicam que malhas de aterramento com maior número de hastes verticais, bem como aquelas com hastes posicionadas em pontos estratégicos, apresentam desempenho superior em termos de dissipação de corrente.

A pesquisa também destaca a importância de adaptar os modelos de solo em função da frequência dos sinais, visto que as descargas atmosféricas apresentam componentes de alta frequência que influenciam a propagação da corrente no solo. Com isso, foi possível desenvolver diretrizes que podem ser aplicadas ao projeto de sistemas de aterramento mais eficazes e seguros.

Palavras-chave: Malha de aterramento. Descarga atmosférica. Simulação eletromagnética. Engenharia assistida por computador.

## ABSTRACT

The presented work addresses the behavior and modeling of grounding systems in response to atmospheric discharges, particularly those of the cloud-to-ground type. The research focuses on the influence of the geometry of grounding meshes and the parameters that affect the efficiency in current dissipation, such as surge impedance and potential distribution in the soil.

In addition, this work aimed to develop a computational simulation methodology to evaluate the performance of grounding systems facing to impulsive currents. To achieve this, simulations were carried out using the Ansys HFSS *software*, which enables detailed electromagnetic modeling of different grounding configurations. The analyses consider various grid sizes and different arrangements of vertical rods, aiming to identify the most effective geometric solutions for protection against lightning strikes.

The sensitivity analysis of the simulation domain helped to define an optimized model for the simulation, ensuring accurate results without overloading the computational processing. Additionally, a Python-based *software* was developed and integrated with Ansys HFSS for the automation of models, results extraction, and post-processing.

The results indicate that grounding meshes with a greater number of vertical rods, as well as those with rods positioned in strategic points, demonstrate superior performance in terms of current dissipation. The research also highlights the importance of adapting soil models according to the signal frequency, as atmospheric discharges contain high-frequency components that influence current propagation in the soil. With this, it was possible to develop guidelines that can be applied to the design of more effective and safer grounding systems.

Keywords: Grounding grid. Lightning discharge. Electromagnetic simulation. Computer aided engineering.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Processo de conexão dos canais ascendente e descendente.</i>	17
<i>Figura 2: Tipos de descarga atmosférica entre a nuvem e o solo.</i>	18
<i>Figura 3: Primeira descarga e subsequente.</i>	20
<i>Figura 4: Forma de onda da Função Dupla Exponencial.</i>	21
<i>Figura 5: Forma de onda da Função de Heidler: (a) elevação e (b) cauda.</i>	22
<i>Figura 6: Forma de onda da Função Triangular.</i>	23
<i>Figura 7: Espectro de frequências das correntes 8/20 <math>\mu</math>s e 10/350 <math>\mu</math>s @ 100 kA.</i>	24
<i>Figura 8: Sistema de aterramento de uma subestação típica.</i>	26
<i>Figura 9: Resposta em frequência da permissividade e resistividade elétricas dos modelos de solo apresentados e dos dados de medição de BE (Bigelow e Eberle, 1972).</i>	31
<i>Figura 10: Resposta em frequência da impedância de entrada (Z) dos modelos de solo apresentados e de solo de parâmetros constantes (Cte), considerando condutor horizontal.</i>	32
<i>Figura 11: Resposta em frequência de dada impedância de aterramento.</i>	33
<i>Figura 12: Tensão de passo devido a uma corrente de raio</i>	34
<i>Figura 13: Exemplo da discretização em elementos finitos.</i>	37
<i>Figura 14: Fluxograma simplificado do Adaptive Refinement.</i>	39
<i>Figura 15: Fluxograma do método iterativo.</i>	41
<i>Figura 16: Correntes de descarga utilizadas na simulação.</i>	42
<i>Figura 17: Diagrama esquemático do sistema de aterramento utilizado.</i>	43
<i>Figura 18: Configuração com malha de aterramento e cabo de descida em solo semiesférico.</i>	44
<i>Figura 19: Condição de contorno em que <math>E=0</math> para o retorno da corrente.</i>	45
<i>Figura 20: Condição de contorno Open Region para evitar reflexões.</i>	46
<i>Figura 21: Elemento para simular passo humano e extrair a tensão de passo.</i>	47
<i>Figura 22: Loop para simular um circuito de interferência (EMI).</i>	47
<i>Figura 23: Modelo de simulação completo e indicação das linhas de integração.</i>	48
<i>Figura 24: Impedância impulsiva da malha relativa ao raio de solo semiesférico.</i>	50
<i>Figura 25: Fluxograma do algoritmo de automatização do modelo.</i>	51
<i>Figura 26: Sistema de aterramento de condutor único. (a) vertical. (b) horizontal.</i>	53

<i>Figura 27: Impedância impulsiva relativa ao comprimento dos condutores. (a) vertical e (b) horizontal.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 28: Impedância impulsiva relativa ao comprimento de eletrodo horizontal enterrado em solos com diferentes resistividades. ....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 29: Geometrias das malhas de aterramento 10 m x 10 m. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 30: Distribuição de campo elétrico na superfície do solo para a malha 10 m x 10 m considerando as correntes de descarga (a) 10/350 <math>\mu</math>s e (b) 8/20 <math>\mu</math>s.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 31: Densidade de corrente nas hastes P1 e P2 da Malha A1 para as correntes de descarga (a) 10/350 <math>\mu</math>s e (b) 8/20 <math>\mu</math>s. ....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 32: Tensões apresentadas pelas malhas 10 m x 10 m para as correntes de descarga (a) 10/350 <math>\mu</math>s e (b) 8/20 <math>\mu</math>s. ....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 33: Distribuição de potencial para as malhas 10 m x 10 m considerando as correntes de descarga 10/350<math>\mu</math>s e 8/20<math>\mu</math>s e as linhas de integração nas direções (a) lateral e (b) diagonal à malha.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 34: Tensões de passo para as malhas 10 m x 10 m a uma distância de (a) 5, (b) 10 e (c) 25 metros da origem, considerando as descargas 10/350 <math>\mu</math>s e 8/20 <math>\mu</math>s. ....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 35: Correntes nos circuitos EMI das malhas 10 m x 10 m posicionados a uma distância de (a) 5, (b) 10 e (c) 25 metros da origem, considerando as descargas 10/350 <math>\mu</math>s e 8/20 <math>\mu</math>s.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 36: Geometrias consideradas para a malha de aterramento 20 m x 20 m.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 37: Distribuição de campo elétrico no solo para a malha 20 m x 20 m considerando as correntes de descarga (a) 10/350 <math>\mu</math>s e (b) 8/20 <math>\mu</math>s.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 38: Densidade de corrente nas hastes P1 e P2 da Malha B1 para as correntes de descarga (a) 10/350 <math>\mu</math>s e (b) 8/20 <math>\mu</math>s. ....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 39: Tensões apresentadas pelas malhas 20 m x 20 m para as correntes de descarga (a) 10/350 <math>\mu</math>s e (b) 8/20 <math>\mu</math>s. ....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 40: Distribuição de potencial para as malhas 20 m x 20 m considerando as correntes de descarga 10/350<math>\mu</math>s e 8/20<math>\mu</math>s e as linhas de integração nas direções (a) lateral e (b) diagonal à malha.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 41: Tensões de passo para as malhas 20 m x 20 m a uma distância de (a) 5, (b) 10 e (c) 25 metros da origem, considerando as descargas 10/350 <math>\mu</math>s e 8/20 <math>\mu</math>s. ....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 42: Correntes nos circuitos EMI das malhas 20 m x 20 m posicionados a uma distância de (a) 5, (b) 10 e (c) 25 metros da origem, considerando as descargas 10/350 <math>\mu</math>s e 8/20<math>\mu</math>s.....</i>	<i>65</i>

<i>Figura 43: Geometrias consideradas para a malha de aterramento 30 m x 30 m.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 44: Distribuição de campo elétrico no solo para a malha 30 m x 30 m considerando as correntes de descarga (a) 10/350 <math>\mu</math>s e (b) 8/20 <math>\mu</math>s.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 45: Densidade de corrente nas hastes P1 e P2 da Malha C1 para as correntes de descarga (a) 10/350 <math>\mu</math>s e (b) 8/20 <math>\mu</math>s.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 46: Tensões apresentadas pelas malhas 30 m x 30 m para as correntes de descarga (a) 10/350 <math>\mu</math>s e (b) 8/20 <math>\mu</math>s.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 47: Distribuição de potencial para as malhas 30 m x 30 m considerando as correntes de descarga 10/350<math>\mu</math>s e 8/20<math>\mu</math>s e as linhas de integração nas direções (a) lateral e (b) diagonal à malha.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 48: Tensões de passo para as malhas 30 m x 30 m a uma distância de (a) 5, (b) 10 e (c) 25 metros da origem, considerando as descargas 10/350 <math>\mu</math>s e 8/20 <math>\mu</math>s.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 49: Correntes nos circuitos EMI das malhas 30 m x 30 m posicionados a uma distância de (a) 5, (b) 10 e (c) 25 metros da origem, considerando as descargas 10/350 <math>\mu</math>s e 8/20 <math>\mu</math>s.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 50: Configurações para análise das hastes verticais da Malha A2 em solo de dupla camada.....</i>	<i>76</i>

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Coeficientes <math>a_i</math> do modelo de Smith-Longmire.</i>	28
<i>Tabela 2: Parâmetros das descargas utilizadas na simulação.</i>	42
<i>Tabela 3: Equações de Messier na sintaxe do Ansys.</i>	44
<i>Tabela 4: Impedâncias impulsivas das malhas 10 m x 10 m.</i>	57
<i>Tabela 5: Impedâncias impulsivas das malhas 20 m x 20 m.</i>	63
<i>Tabela 6: Impedâncias impulsivas das malhas 30 m x 30 m.</i>	69
<i>Tabela 7: Resultados para todas as malhas de aterramento simuladas com a corrente de descarga 10/350 <math>\mu</math>s com 100kA de pico.</i>	72
<i>Tabela 8: Resultados para todas as malhas de aterramento simuladas com a corrente de descarga 8/20 <math>\mu</math>s com 25kA de pico.</i>	73
<i>Tabela 9: Resultados de impedância impulsiva para as diferentes configurações de solo e comprimento das hastes verticais da Malha A2.</i>	76

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>
GEM	Ground Enhancement Material
CIGRÉ	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
GPR	<i>Ground Potencial Rise</i>
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
MoM	<i>Method of Moments</i>
NBR	Norma Brasileira
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SPDA	Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas
SE	Subestação de Energia Elétrica
TLM	<i>Transmission Line Modelling</i>
WG	<i>Working Group</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	Motivação	14
1.2	Objetivo	15
1.3	Estrutura do Trabalho	15
<b>2</b>	<b>SOBRE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</b>	<b>16</b>
2.1	Conceitos Básicos	16
2.2	Caracterização das Descargas Atmosféricas	19
2.3	Espectro de Frequências de uma Descarga Atmosférica	23
<b>3</b>	<b>SISTEMA DE ATERRAMENTO E PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS</b>	<b>25</b>
3.1	Composição de um Sistema de Aterramento	25
3.2	Parâmetros do Solo e a Dependência de Frequência	27
3.3	Efeitos de Correntes Impulsivas em Sistemas de Aterramento	32
<b>4</b>	<b>ENGENHARIA ASSISTIDA POR COMPUTADOR</b>	<b>35</b>
4.1	Definição	35
4.2	Método dos Elementos Finitos	36
4.3	O Software Ansys HFSS	38
<b>5</b>	<b>MODELO DE SIMULAÇÃO NO SOFTWARE ANSYS HFSS</b>	<b>40</b>
5.1	Modelagem da Corrente de Descarga Atmosférica	40
5.2	Modelagem do Sistema de Aterramento	42
5.3	Modelagem do Solo	43
5.4	Condições de Contorno	45
5.5	Pós-processamento	47
5.6	Análise de Sensibilidade do Domínio de Simulação	49
5.7	Automatização do Modelo de Simulação	50
<b>6</b>	<b>INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO SISTEMA DE ATERRAMENTO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</b>	<b>52</b>
6.1	Sistema de Aterramento de Condutor Único	52
6.2	Sistema com Malha de Aterramento	54
6.2.1	Malha de aterramento 10 m x 10 m	55
6.2.2	Malha de aterramento 20 m x 20 m	61
6.2.3	Malha de aterramento 30 m x 30 m	66
6.2.4	Análise comparativa dos resultados entre as malhas	72
6.3	Sistema de Aterramento em Solo de Dupla Camada	75
6.4	Propostas para Continuidade do Trabalho	77
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>78</b>
	REFERÊNCIAS	80

## 1 INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas correspondem ao mecanismo de transferência de cargas elétricas na atmosfera, que ocorrem devido à presença de nuvens eletricamente carregadas. O acúmulo de cargas em determinadas regiões da nuvem gera uma elevada diferença de potencial, suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar e criar um canal ionizado, que permite a passagem da corrente de descarga. As descargas atmosféricas podem se manifestar no interior das nuvens, entre nuvens ou entre a nuvem e o solo. Além disso, fenômenos como tempestades de poeira, incêndios florestais e erupções vulcânicas também podem criar condições favoráveis para a ocorrência de descargas atmosféricas. As descargas que ocorrem entre a nuvem e o solo são as que possuem maior interesse acadêmico devido ao seu potencial destrutivo e, portanto, será foco deste trabalho (PAULINO *et al.*, 2016).

Os sistemas de aterramento são projetados para proporcionar um caminho de baixa impedância às correntes indesejadas em um sistema elétrico, protegendo equipamentos e seres vivos. Em outras palavras, uma fuga de corrente causada por um curto-circuito, por exemplo, não deve causar danos, desde que o sistema de aterramento esteja devidamente instalado. Contudo, na maioria dos casos, o aterramento não elimina a necessidade de dispositivos de proteção adicionais, como disjuntores e Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS). Um dos sistemas de aterramento mais amplamente utilizados em instalações de alta e baixa tensão é a malha de aterramento reticulada, conforme estabelecido em normas e padrões nacionais e internacionais, tais como ABNT NBR 5410 (2005), ABNT NBR 5419 (2015), IEC 60364-5 (2014), IEEE Std. 80 (2013) e a ABNT NBR 15751 (2013).

A malha de aterramento consiste em um arranjo de eletrodos enterrados no solo, projetada para controlar os gradientes potencial de superfície são constituídas por condutores de cobre ou aço cobreado com uma geometria reticulada. No geral, os projetos baseiam-se na condição de que a malha é submetida a correntes de baixa frequência, normalmente a da rede (60 Hz).

Se os retículos da malha não forem adequadamente projetados, a corrente dissipada no solo pode gerar tensões de passo e de toque, que podem expor as pessoas ao risco de choques elétricos (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

As correntes associadas às descargas atmosféricas geram a chamada impedância impulsiva, que geralmente apresenta valores mais baixos em módulo

que a resistência de aterramento, mas pode apresentar valores maiores a depender do tamanho do sistema. Isso ocorre porque as descargas atmosféricas são fenômenos que apresentam componentes de alta frequência que podem chegar faixa de megahertz. Em geral, os sistemas de aterramento são eficientes na proteção contra descargas atmosféricas, pois conseguem dispersar uma parte significativa da energia gerada pela corrente para terra (VISACRO, Silvério, 2007a).

O estudo do comportamento de malhas de aterramento frente às descargas elétricas, especialmente atmosféricas, baseia-se inicialmente na análise temporal da função que as descreve. Diferentes geometrias de malhas de aterramento influenciam a impedância, o que é um fator relevante na determinação da amplitude da tensão resultante.

## 1.1 Motivação

O raio é um fenômeno natural altamente perigoso, capaz de causar fatalidades e inúmeros prejuízos materiais a cada ano. De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o Brasil registra cerca de 77,8 milhões de raios anualmente, tornando-o o país com a maior incidência de raios no mundo. As descargas atmosféricas têm sido objeto de estudo por pesquisadores ao redor do globo, que investigam seus efeitos sobre pessoas, instalações e equipamentos. A norma NBR 5410 estabelece que as malhas de aterramento são projetadas para lidar principalmente com eventos de baixa frequência (60 Hz), como curto-circuito e fugas de corrente. No entanto, as correntes geradas por raios aumentam o risco de choque elétrico para as pessoas e podem causar danos aos equipamentos.

Com os avanços tecnológicos, tornou-se possível realizar análises mais detalhadas sobre o impacto das descargas atmosféricas em instalações elétricas. *Softwares* de simulação eletromagnética, baseados em algoritmos que utilizam, por exemplo, o Método de Elementos Finitos (MEF), permitem a análise precisa de qualquer tipo de corrente elétrica aplicada em pontos específicos de uma instalação. Isso facilita o estudo de estruturas complexas, que anteriormente dependiam de abordagens analíticas baseadas nas equações de Maxwell ou na Teoria de Circuitos Elétricos. O estudo das descargas atmosféricas em malhas de aterramento é não apenas viável, mas também essencial para prevenir danos a pessoas e equipamentos em instalações. O projeto de malhas de aterramento que possam

dissipar de forma eficiente a corrente gerada por um raio é um campo em constante evolução e aprimoramento.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é revisar os conceitos fundamentais sobre o desempenho de sistemas de aterramento em situações de descargas atmosféricas, avaliar a influência da geometria — especialmente das malhas de aterramento — nesse desempenho e propor uma metodologia de simulação computacional para a análise de sistemas de aterramento sujeitos a descargas atmosféricas. Para alcançar esses objetivos, foram analisados diversos parâmetros cruciais de projeto das malhas, como a tensão de passo, a distribuição de potencial e a impedância impulsiva, buscando compreender como alterações na geometria afetam a eficiência do sistema de aterramento diante desse tipo de solicitação.

## **1.3 Estrutura do Trabalho**

O trabalho está dividido em sete capítulos. Neste capítulo 1, é apresentado o objetivo geral do trabalho. O capítulo 2 traz o referencial teórico a respeito de descargas atmosféricas, introduzindo conceitos básicos, caracterização das descargas e noções do seu espectro de frequências. No capítulo 3 é feita uma revisão a respeito de sistemas de aterramento e proteção contra descargas, explicando a composição básica dos sistemas de aterramento e os principais efeitos causados por correntes impulsivas. Em seguida, no capítulo 4, são introduzidos conceitos de Engenharia Assistida por Computador (CAE – *Computer Aided Engineering*), representando a metodologia utilizada neste trabalho que, por sua vez, está detalhada no capítulo 5.

No capítulo 6 são apresentados os principais resultados obtidos, em que o desempenho de algumas geometrias de sistemas de aterramento é avaliado frente a descargas atmosféricas. Por fim, o trabalho é concluído no capítulo 7, destacando o alcance dos objetivos e os principais conhecimentos adquiridos com o estudo.

## 2 SOBRE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

### 2.1 Conceitos Básicos

As descargas atmosféricas, comumente conhecidas como raios, são fenômenos naturais de alta complexidade que têm despertado interesse de vários pesquisadores e institutos ao longo da história. Esses fenômenos ocorrem quando há uma separação de cargas elétricas nas nuvens, levando à formação de uma descarga elétrica para equilibrar essa diferença de potencial (LOURENÇO NOVO, 2009).

A formação dos raios está intrinsecamente ligada aos processos de eletrificação das nuvens. Esse processo ocorre principalmente em nuvens *cumulonimbus*, que se formam em condições de forte instabilidade atmosférica. A colisão e o congelamento de partículas de gelo dentro dessas nuvens geram a separação de cargas elétricas. Tipicamente, as cargas positivas se acumulam no topo da nuvem, enquanto as negativas se concentram na parte inferior (DEHN; SÖHNE, 2014). As descargas atmosféricas podem ser classificadas em diferentes tipos, dependendo de sua direção e do local onde ocorrem. Os principais tipos são: a descarga nuvem-solo, a descarga nuvem-nuvem e a descarga intranuvem. A descarga intranuvem acontece dentro de uma única nuvem, sendo o tipo mais comum de descarga, mas a menos perceptível do solo. A descarga nuvem-nuvem ocorre entre duas nuvens. Já a descarga nuvem-solo, objeto de estudo deste trabalho, é o tipo mais conhecido de descarga, onde a corrente de descarga vai da nuvem ao solo (ou vice-versa), ionizando o ar e rompendo sua rigidez dielétrica.

O desenvolvimento de uma descarga nuvem-solo se dá por meio da formação de *leaders*, que são canais ionizados no ar, responsáveis por preparar o caminho para a condução da corrente elétrica do raio. Esses *leaders* determinam a trajetória, a intensidade e os efeitos associados à descarga. Existem essencialmente dois tipos de *leaders*, classificados de acordo com sua polaridade:

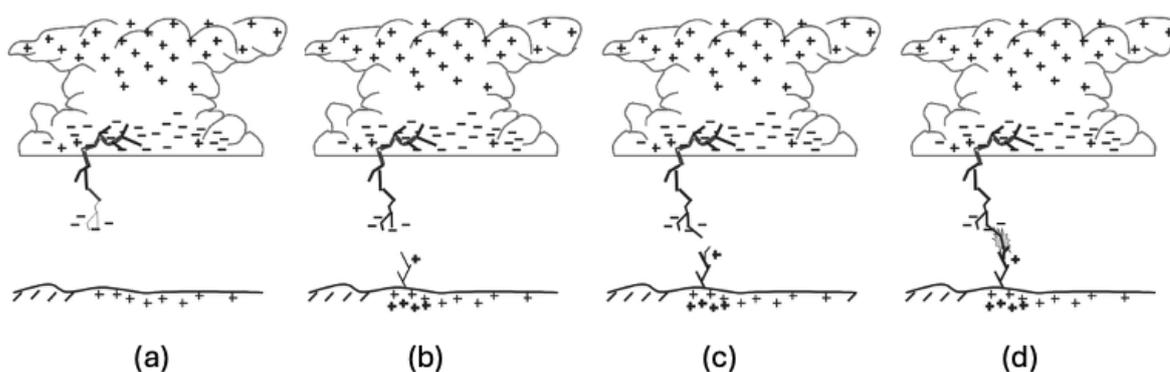
- i. *Leader* Negativo: sempre se propaga de forma escalonada, em pequenos saltos, produzindo um caminho ionizado parcialmente condutor. Esse tipo de *leader* pode ser tanto descendente (nuvem-solo) quanto ascendente (solo-nuvem), dependendo das condições locais do campo elétrico. No caso descendente,

é tipicamente iniciado na base da nuvem e avança em direção ao solo com incrementos da ordem de dezenas de metros, seguidos por breves pausas.

ii. *Leader* Positivo: propaga-se de forma contínua, sem os saltos característicos do *leader* negativo. Também pode ser tanto descendente quanto ascendente. Devido às características do meio, os *leaders* positivos tendem a se desenvolver de maneira mais lenta, porém podem gerar descargas mais intensas.

A Figura 1 exemplifica o processo de conexão dos canais ascendente e descendente de uma descarga atmosférica nuvem-solo: (a) Primeiramente, é iniciado um canal ionizado no ar devido ao acúmulo de cargas negativas na base da nuvem; (b) À medida que o canal carregado negativamente se aproxima do solo (*leader* negativo descendente), ocorre um aumento na densidade de cargas positivas induzidas na superfície terrestre, acompanhado de uma intensificação do campo elétrico na região abaixo do canal; (c) essa alta concentração de cargas positivas começa a gerar canais ionizados carregados positivamente que propagam-se para cima (*leader* positivo ascendente); (d) quando um dos canais ascendentes aproxima-se suficientemente do canal descendente, pode ocorrer uma descarga que os interliga por meio de um salto final. (VISACRO, 2005).

Figura 1: Processo de conexão dos canais ascendente e descendente.

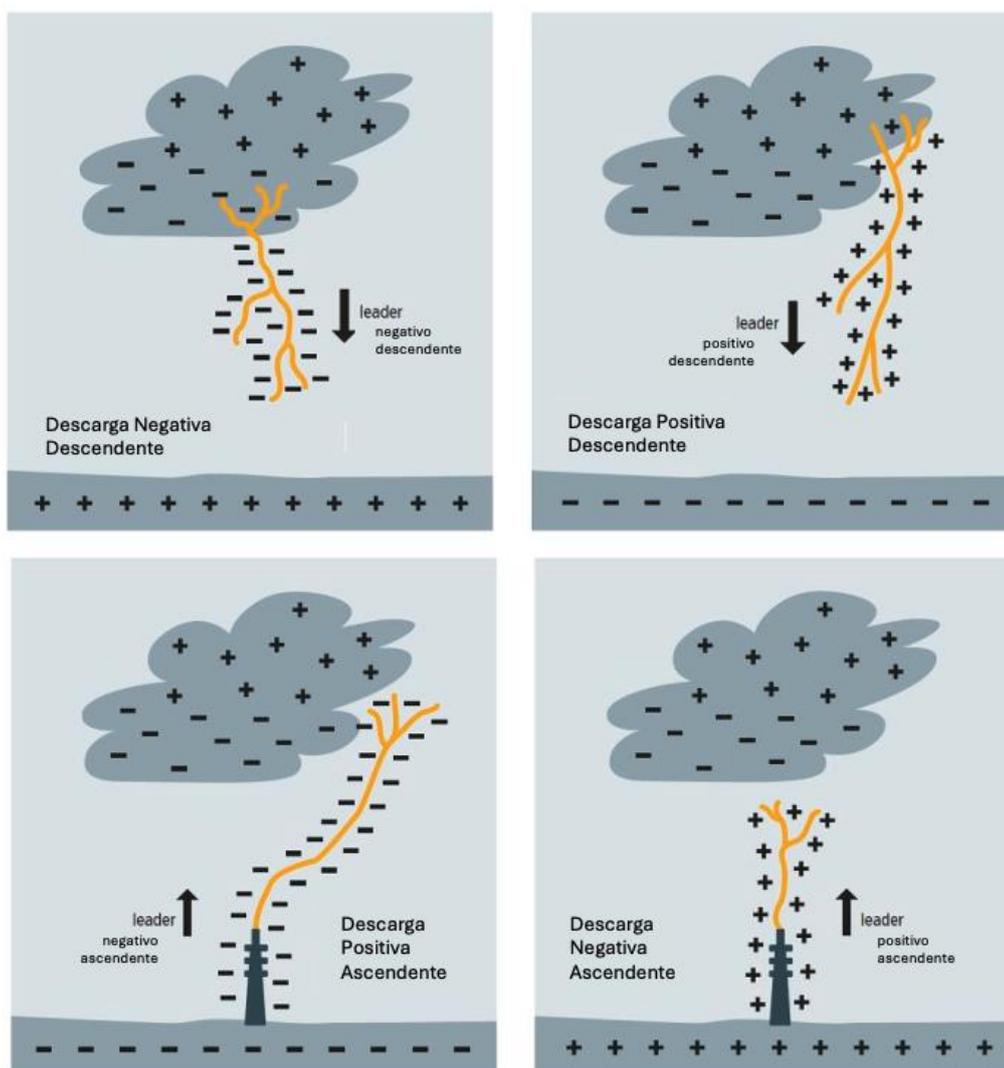


Fonte: (VISACRO, 2005).

Após o processo de conexão entre *leaders* ascendentes e descendentes (se houver), forma-se um canal condutor entre a nuvem e o solo, é constituída uma onda de corrente de alta intensidade, a chamada corrente de retorno (*return stroke current*), que neutraliza as cargas que estavam acumuladas.

No caso da Figura 1, como houve uma transferência de cargas negativas da nuvem para o solo, a descarga atmosférica é considerada negativa. Caso houvesse a transferência de cargas negativas do solo para a nuvem, esta seria uma descarga positiva, que poderia ser formada por um *leader* negativo ascendente e/ou um *leader* positivo descendente (VISACRO, 2005). A Figura 2 ilustra quatro tipos de descargas, classificadas quanto à direção e polaridade do *leader* principal.

Figura 2: Tipos de descarga atmosférica entre a nuvem e o solo.



Fonte: (DEHN; SÖHNE, 2014) Adaptada.

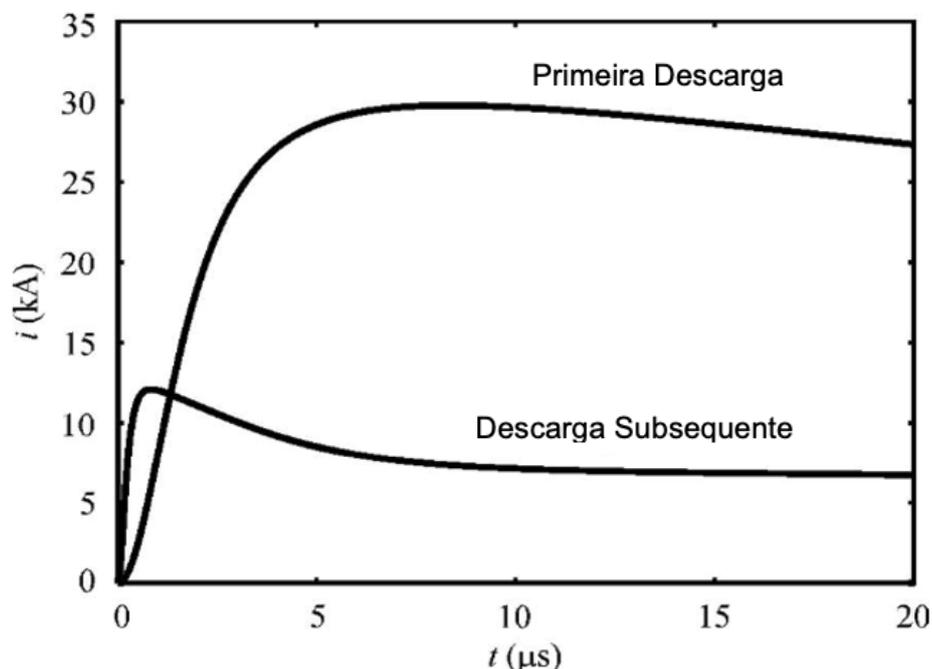
## 2.2 Caracterização das Descargas Atmosféricas

A descarga atmosférica é caracterizada a partir da primeira corrente de retorno e suas subsequentes. A primeira corrente de retorno (*first return stroke*), é a fase inicial do evento de descarga, ocorrendo após a formação do *leader* escalonado. Quando o *leader* escalonado se aproxima suficientemente do solo, um *leader* ascendente pode surgir de objetos altos ou do solo, e a conexão entre esses líderes estabelece um caminho ionizado contínuo. A corrente elétrica então flui rapidamente por este caminho, resultando na primeira emissão de luz visível (relâmpago) e som (trovão). Após a primeira corrente de retorno da descarga, podem ocorrer várias descargas subsequentes, também conhecidas como “segundos retornos” (*subsequent return strokes*). Essas descargas ocorrem no mesmo canal ionizado estabelecido pela primeira descarga. O canal permanece parcialmente ionizado por um curto período, permitindo que novas descargas ocorram.

As curvas de corrente de retorno associadas às primeiras descargas negativas nuvem-solo caracterizam-se por um início com formato côncavo, seguido de um crescimento abrupto após aproximadamente a metade do tempo até atingir o primeiro pico. Na sequência, é comum a ocorrência de um segundo pico, geralmente entre 15% e 30% superior ao primeiro, após alguns microssegundos. Após esse segundo pico, observa-se um decaimento lento da corrente, que pode apresentar pequenas ondulações. Por outro lado, as curvas de corrente de retorno das descargas subsequentes apresentam, em geral, um único pico, com tempo de subida e de decaimento significativamente mais curtos quando comparados às primeiras descargas.

Para fins de simulação, alguns autores, como Grcev (2009), representam de forma bastante simplificada as correntes de retorno de primeiras e subsequentes descargas, conforme ilustrado na Figura 3. São formas representativas para descargas atmosféricas, particularmente devido ao seu conteúdo espectral.

Figura 3: Primeira descarga e subsequente.



Fonte: (GRCEV, 2009) Adaptada.

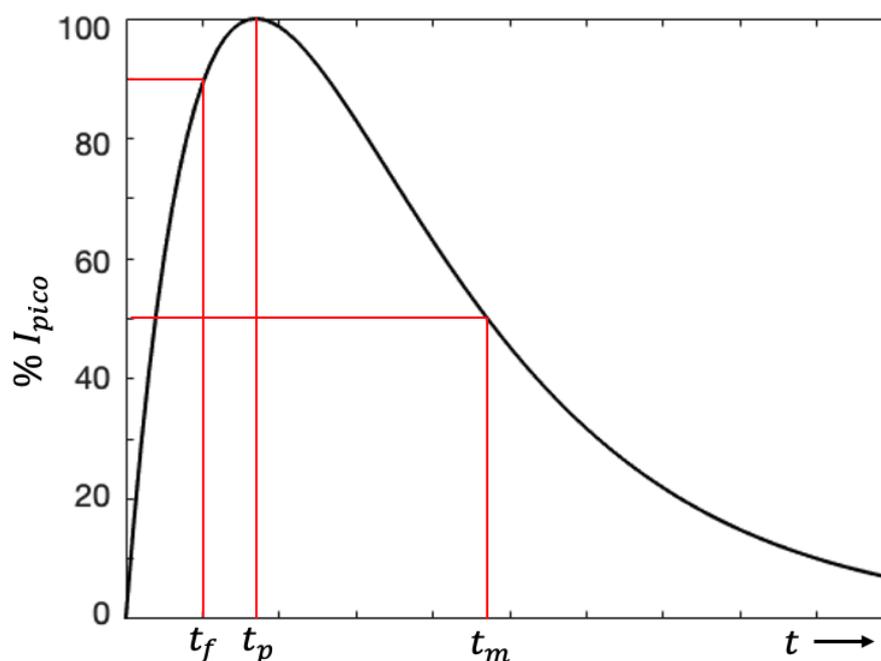
Os estudos que envolvem análises de sistemas submetidos a correntes impulsivas, como as associadas a descargas atmosféricas, vêm utilizando formas de ondas modeladas por meio de funções analíticas, tais como a Dupla-Exponencial, Heidler e a Triangular. A melhor função a ser utilizada depende do tipo de estudo que se deseja realizar:

i. Função Dupla-Exponencial: É representada pela equação (1), em que os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são obtidos de acordo com intervalo de tempo dado pelo tempo de pico ( $t_p$ ) e o tempo de meia onda ( $t_m$ ). A constante  $A$  é chamada de coeficiente de impulso e representa um fator de correção para o valor da corrente de pico ( $I_{pico}$ ). Esse tipo de função é muito utilizado em estudos analíticos, onde é necessário realizar manipulações algébricas com a corrente de descarga, devido a sua formulação simples. Esse modelo também é utilizado em testes experimentais, devido à sua facilidade de reprodução em laboratório. A forma de onda da corrente de descarga, caracterizada pela função dupla-exponencial, está apresentada na Figura 4, em que  $t_f$  é chamado de tempo de frente de onda e pode ser utilizado no lugar de  $t_p$  para o cálculo do parâmetro  $\beta$ . Nesse caso,  $\alpha$  e  $\beta$  podem ser aproximados pelo inverso de  $t_m$  e  $t_f$ , respectivamente. No entanto, essa aproximação torna-se imprecisa quando os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  são próximos

(FERNANDO, 1997), necessitando a aplicação de um método iterativo para obtenção dos valores precisos de  $\alpha$  e  $\beta$  (LEAL TARRAGÔ *et al.*, 2021).

$$I(t) = A I_{pico}(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

Figura 4: Forma de onda da Função Dupla Exponencial.

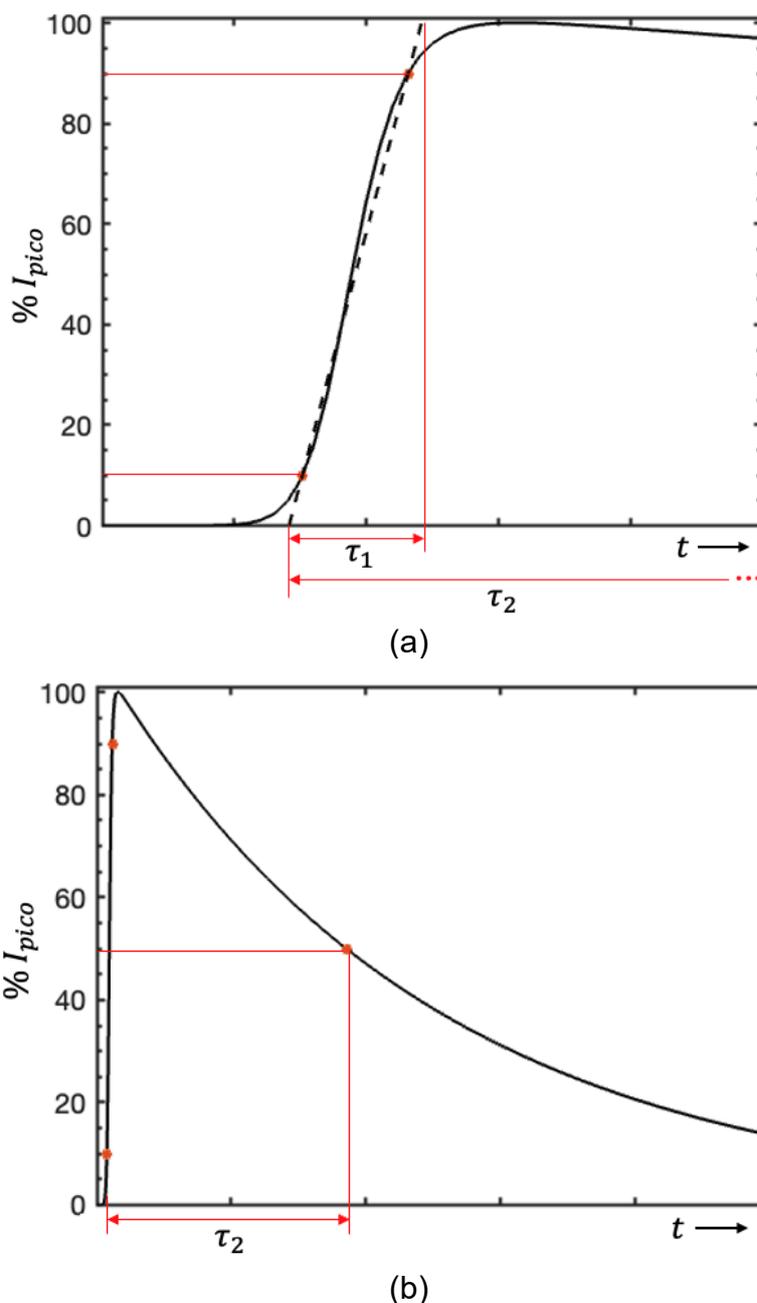


Fonte: Própria do autor.

ii. Função de Heidler: É representada pela equação (2), em que  $\tau_1$  é a constante de tempo para ascensão,  $\tau_2$  a constante de tempo para o decaimento, e  $n$  é um parâmetro que ajusta a forma da ascensão (quanto maior o valor de  $n$ , mais íngreme será a ascensão da curva.). Normalmente é utilizada em estudos de compatibilidade eletromagnética e coordenação de isolamento, pois representa a descarga atmosférica de forma mais detalhada, sendo o padrão adotada por normas técnicas, como a NBR 5419 (ABNT, 2015) e a IEC 62305 (2010). Embora também seja aplicada na representação da primeira corrente de retorno, a função de Heidler melhor representa descargas do tipo subsequente. A forma de onda da corrente de descarga, caracterizada pela função de Heidler, está apresentada na Figura 5.

$$I(t) = A I_{pico} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (2)$$

Figura 5: Forma de onda da Função de Heidler: (a) elevação e (b) cauda.

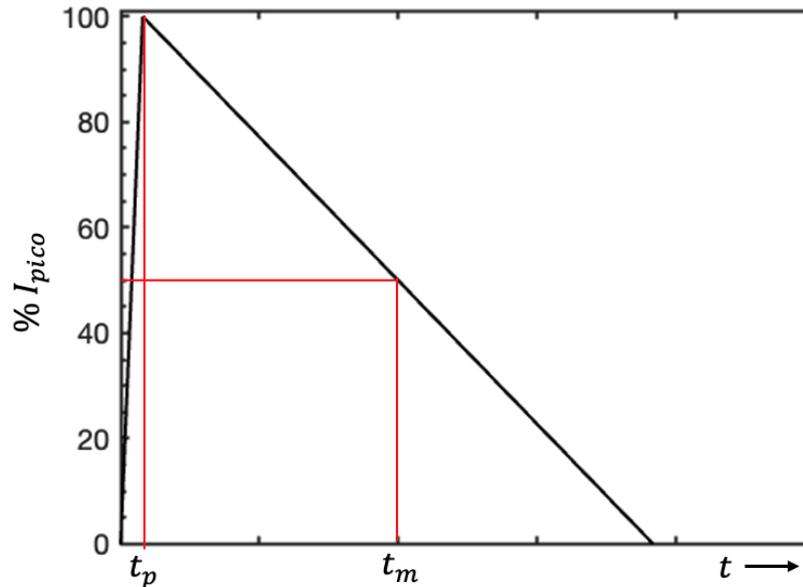


Fonte: Própria do autor.

iii. Função Triangular: É representada a partir de duas retas, uma ascendente e uma descendente, conforme mostrado pela equação (3). Trata-se de uma modelagem simplificada, então deve ser usada somente em análises preliminares ou quando a precisão não é um fator crítico ou em alguns estudos de sensibilidade. A forma de onda da corrente de descarga, caracterizada pela função triangular, está apresentada na Figura 6.

$$I(t) = \begin{cases} I_{pico} \left( \frac{t}{t_p} \right), & 0 \leq t \leq t_p \\ I_{pico} \left( 1 - \frac{t - t_p}{2t_m} \right), & t_p \leq t \leq 2t_m + t_p \\ 0, & t \geq 2t_m + t_p \end{cases} \quad (3)$$

Figura 6: Forma de onda da Função Triangular.



Fonte: Própria do autor.

iv. Outras representações relevantes: Além das funções acima exemplificadas, existem outras que são bastante utilizadas no meio técnico e acadêmico, como a forma de onda côncava proposta pelo CIGRÉ WG C4-407 (2013), ou a forma de onda duplo pico (RAKOV; UMAN, 2003). Esses modelos, inclusive, são melhores em representar a primeira corrente de retorno das descargas, pois o conteúdo espectral apresenta maior semelhança com descargas reais.

### 2.3 Espectro de Frequências de uma Descarga Atmosférica

O espectro de frequências das formas de onda associadas às descargas atmosféricas apresenta uma largura de faixa que depende, sobretudo, do seu tempo de frente, sendo determinada por meio da Transformada de Fourier (FIGUEIREDO, 1977), conforme a equação (4), em que  $\omega$  é a frequência angular, em radianos por segundo.

$$I(\omega) = \int_0^{\infty} I(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4)$$

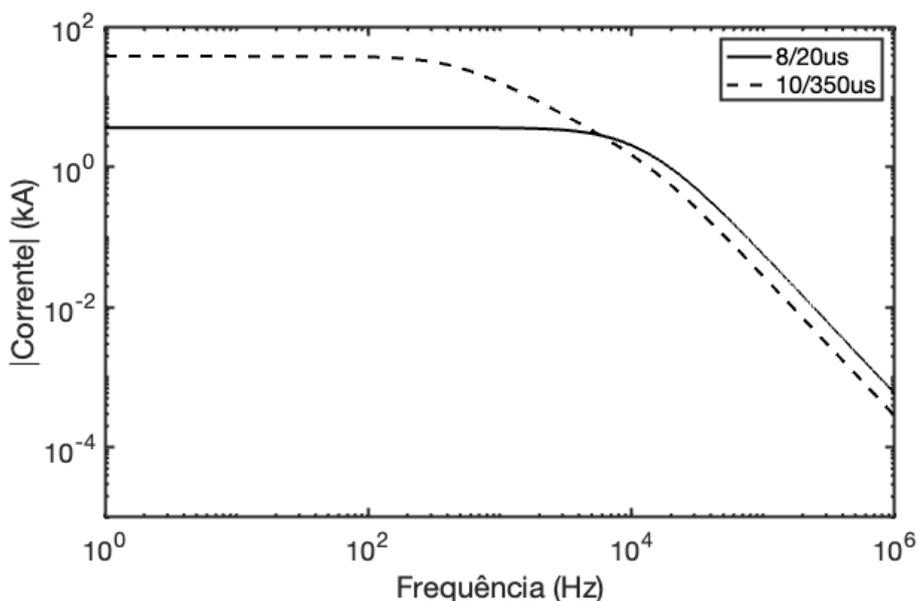
Na utilização da função dupla exponencial, o cálculo da Transformada de Fourier torna-se simples, resultando em uma integração de funções exponenciais, conforme apresentado na equação (5).

$$I(\omega) = \int_0^{\infty} A I_{pico} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) e^{-j\omega t} dt = A I_{pico} \left( \frac{1}{\alpha + j\omega} - \frac{1}{\beta + j\omega} \right) \quad (5)$$

A Figura 7 apresenta o espectro de frequências de duas formas de onda para corrente de descarga: 8/20  $\mu$ s e 10/350  $\mu$ s, ambas com pico de 100 kA. Estas ondas não representam correntes típicas de descargas atmosféricas, mas sim formas padronizadas adotadas em testes e normas técnicas, utilizadas como casos extremos para avaliação da resistência de equipamentos e sistemas. Observa-se que a maior parte da energia dessas correntes está concentrada em componentes de baixas frequências. No entanto, por tratar-se de fenômenos impulsivos, podem apresentar componentes significativas na faixa de MHz (VISACRO, Silvério, 2005).

Também é possível notar que a descarga 10/350  $\mu$ s possui maiores componentes de baixa frequência, enquanto a descarga 8/20  $\mu$ s possui componentes de alta frequência maiores. Ou seja, descargas mais impulsivas tendem a possuir componentes de alta frequência maiores.

Figura 7: Espectro de frequências das correntes 8/20  $\mu$ s e 10/350  $\mu$ s @ 100 kA.



Fonte: Própria do autor.

### 3 SISTEMA DE ATERRAMENTO E PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS

Um sistema de aterramento é composto por diversos elementos essenciais que garantem a segurança e o funcionamento adequado das instalações elétricas. Ele é projetado para conduzir correntes de falta para a terra, protegendo tanto os equipamentos, quanto as pessoas contra o choque elétrico. Nos tópicos a seguir será explorado a composição do sistema de aterramento, seus parâmetros de desempenho e sua importância na proteção contra descargas atmosféricas.

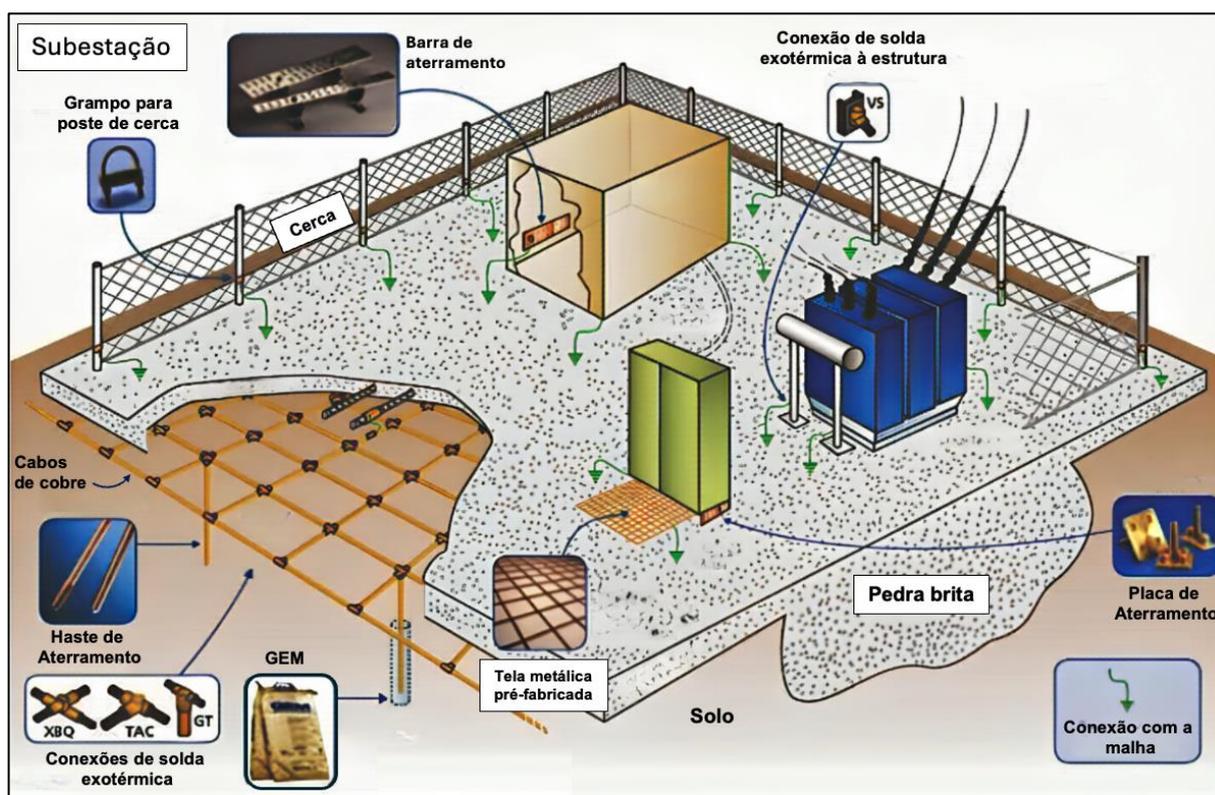
#### 3.1 Composição de um Sistema de Aterramento

Sistemas de aterramento devem ser dotados de três componentes fundamentais: os condutores de aterramento, os eletrodos e o solo. O termo “condutor de aterramento” é a denominação genérica para os cabos que interligam os diversos elementos do sistema elétrico aos eletrodos de aterramento. Dentro dessa definição, enquadram-se casos específicos, como os condutores de descida — utilizados no Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) — e os “rabichos”, que fazem a conexão dos equipamentos e estruturas de uma subestação ao sistema de aterramento. Esses condutores devem ser dimensionados para conduzir as correntes de falha e de descarga atmosférica sem riscos de danos térmicos ou mecânicos, além de serem devidamente protegidos contra corrosão e esforços mecânicos. Já os eletrodos de aterramento são os elementos que entram em contato direto com o solo, e podem ser constituídos por armaduras de concreto das fundações, fitas, barras ou cabos metálicos imersos no concreto, malhas metálicas enterradas ou anéis metálicos circundando o perímetro da edificação. Esses eletrodos são responsáveis por dispersar a corrente de falha para a terra de maneira eficiente (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

Quando os eletrodos de aterramento são dispostos em formato de malha, esta é a chamada malha de aterramento. Elas cobrem toda a área da instalação e podem ser complementadas por hastes verticais e cabos dispostos radialmente (chamados de “pés-de-galinha”) (ABNT, 2005). Na Figura 8 está apresentada uma ilustração de uma malha de aterramento em uma subestação típica. Essas malhas são cruciais para garantir uma baixa resistência de terra e uma distribuição uniforme das correntes de falha. Além disso, elas aumentam a área de contato com o solo,

melhorando a dissipação da corrente e reduzindo a impedância do sistema de aterramento. O sistema de aterramento também pode contar com alguns elementos auxiliares, que não fazem parte do sistema de aterramento em si, mas ajudam a melhorar sua viabilidade, confiabilidade e/ou segurança, como: conexões de solda exotérmica, utilizadas para conectar eletricamente os eletrodos e formar os retículos da malha; barras e placas de aterramento, utilizadas para conectar dispositivos e massas à malha; GEM (*Ground Enhancement Material*), utilizado para melhorar a condutividade do solo em torno das hastes de aterramento; pedra brita, utilizada para cobrir o solo nas áreas de subestação, oferecendo isolamento adicional e melhorando a drenagem; e a tela metálica pré-fabricada, utilizada para reforço do aterramento especialmente de dispositivos sensíveis presentes em painéis de controle, SCADA e Rack Telecom (DEHN; SÖHNE, 2014), (GHOLAMI FARKOUSH et al., 2018).

Figura 8: Sistema de aterramento de uma subestação típica.



Fonte: (GHOLAMI FARKOUSH et al., 2018) Adaptada.

A malha de aterramento deve ser projetada para garantir a segurança das pessoas e a integridade dos equipamentos. Ela deve ser capaz de conduzir correntes de falta sem causar danos térmicos ou mecânicos, além de atender aos

requisitos funcionais da instalação. As opções de eletrodos de aterramento, incluindo as malhas, também são reconhecidas pelas normas NBR 5419 e NBR 15751, da ABNT, e devem ser utilizadas conjuntamente pelo sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) da edificação. Os parâmetros e a condição do solo também são fatores cruciais para o melhor desempenho do sistema de aterramento (LOURENÇO NOVO, L. et al., 2018).

### 3.2 Parâmetros do Solo e a Dependência de Frequência

O estudo das propriedades elétricas do solo é fundamental para diversas aplicações de engenharia, como a análise de sistemas de aterramento e a propagação de ondas eletromagnéticas. Essas propriedades, incluindo a condutividade ( $\sigma$ ) e a permissividade elétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) do solo, variam com a frequência ( $f$ ) e são influenciadas por fatores como a composição do solo e o teor de umidade. Diversos modelos matemáticos foram desenvolvidos para representar essa dependência de frequência, incluindo o Modelo de Scott (S), o Modelo de Smith-Longmire (SL), o Modelo de Messier (M), o Modelo de Visacro-Alipio (VA), o Modelo de Visacro-Portela (VP) e o Modelo de Portela (P). Cada um desses modelos possui suas particularidades e aplicações específicas.

i. Modelo de Scott (1966): O modelo desenvolvido por Scott é baseado em medições de laboratório e campo de amostras de solo com diferentes teores de água, realizadas em uma faixa de frequência de 100 Hz a 1 MHz. Este modelo fornece expressões ajustadas para a permissividade relativa ( $\epsilon_r$ ) e a condutividade ( $\sigma$ ) em função da frequência. As equações (6) a (9) representam a modelagem de Scott para os parâmetros do solo  $\epsilon_r$  e  $\sigma$  dependentes de frequência, em que  $\sigma_{100\text{ Hz}}$  é a condutividade do solo medida na frequência de 100 Hz em milissiemens por metro.

$$\epsilon_r(f) = 10^D \quad (6)$$

$$D = 5.491 + 0.946 \log_{10}(\sigma_{100\text{ Hz}}) - 1.097 \log_{10}(f) + 0.069(\log_{10}(\sigma_{100\text{ Hz}}))^2 - 0.114 \log_{10}(f) \log_{10}(\sigma_{100\text{ Hz}}) + 0.067(\log_{10}(f))^2 \quad (7)$$

$$\sigma(f) = 10^K [mS/m] \quad (8)$$

$$K = 0.028 + 1.098 \log_{10}(\sigma_{100 \text{ Hz}}) - 0.068 \log_{10}(f) + 0.036(\log_{10}(\sigma_{100 \text{ Hz}}))^2 - 0.046 \log_{10}(f) \log_{10}(\sigma_{100 \text{ Hz}}) + 0.018(\log_{10}(f))^2 \quad (9)$$

ii. Modelo de Smith-Longmire (1975): O modelo foi desenvolvido usando dados experimentais obtidos de medições de solo com diferentes teores de umidade e em uma ampla faixa de frequências. Inicialmente, Longmire e Longley (1973) apresentaram um conjunto de expressões analíticas que cobriam uma faixa de frequência de 100 Hz a 1 MHz. Posteriormente, Smith e Longmire ampliaram este modelo para incluir frequências de até 1 GHz, utilizando dados de medições de outros materiais, como concreto, que apresentavam propriedades elétricas semelhantes às do solo. O modelo de Smith-Longmire descreve a permissividade relativa e a condutividade do solo em função da frequência, utilizando uma série de termos somatórios, conforme as equações (10) e (11), em que  $\sigma_{DC}$  é a condutividade do solo em corrente contínua (ou em baixas frequências),  $\varepsilon_{\infty}$  é a permissividade relativa na frequência máxima da amostragem e  $F_i$  é definido conforme equações (12) e (13). A Tabela 1 apresenta os coeficientes  $a_i$ .

$$\varepsilon_r(f) = \varepsilon_{\infty} + \sum_{i=1}^{13} \frac{a_i}{1 + (f/F_i)^2} \quad (10)$$

$$\sigma(f) = \sigma_{DC} + 2\pi\varepsilon_0 \sum_{i=1}^{13} \frac{a_i F_i}{1 + (f/F_i)^2} \quad [S/m] \quad (11)$$

$$F_i = F(\sigma_{DC}) 10^{i-1} \quad [Hz] \quad (12)$$

$$F(\sigma_{DC}) = (125 \sigma_{DC})^{0,8312} \quad (13)$$

Tabela 1: Coeficientes  $a_i$  do modelo de Smith-Longmire.

$i$	$a_i$	$i$	$a_i$
1	3400000	8	12,5
2	274000	9	4,8
3	25800	10	2,17
4	3380	11	0,98
5	526	12	0,392
6	133	13	0,173
7	27,2		

Fonte: (Cavka et al, 2014).

iii. Modelo de Messier (1980): O Modelo de Messier é derivado de estudos experimentais que medem a resposta do solo a diferentes frequências, variando de baixas a altas frequências. Messier focou em fornecer uma descrição simplificada, mas precisa, que pudesse ser utilizada em simulações de sistemas elétricos que interagem com o solo. As expressões de Messier estão apresentadas nas equações (14) e (15), em que  $\sigma_{DC}$  é a condutividade do solo em corrente contínua (ou em baixas frequências) e  $\varepsilon_{\infty}$  é a permissividade relativa na frequência máxima da amostragem.

$$\varepsilon_r(f) = \varepsilon_{\infty} \left( 1 + \sqrt{\frac{\sigma_{DC}}{\pi f \varepsilon_{\infty}}} \right) \quad (14)$$

$$\sigma(f) = \sigma_{DC} \left( 1 + \sqrt{\frac{4\pi f \varepsilon_{\infty}}{\sigma_{DC}}} \right) \quad (15)$$

iv. Modelo de Visacro-Portela (1987): O modelo foi desenvolvido por Visacro e Portela a partir de medições experimentais realizadas em laboratórios, onde diferentes tipos de solo foram testados para determinar como suas propriedades elétricas variam com a frequência. A análise abrangeu uma faixa de frequência significativa (40 Hz a 2 MHz), que é relevante para aplicações de engenharia elétrica, como a análise de sistemas de aterramento sob condições de alta frequência. O modelo utiliza expressões empíricas para descrever a dependência de frequência da permissividade relativa e da condutividade. As expressões de Visacro-Portela são apresentadas em (16) e (17), em que  $\sigma_{100\text{Hz}}$  é a condutividade do solo medida na frequência de 100 Hz em [mS/m].

$$\varepsilon_r(f) = 2.34 \times 10^6 \left( \frac{1}{\sigma_{100\text{Hz}}} \right)^{-0.535} f^{-0.597} \quad (16)$$

$$\sigma(f) = \sigma_{100\text{Hz}} \left( \frac{f}{100} \right)^{0.072} \quad (17)$$

v. Modelo de Portela (1999): O modelo foi desenvolvido para fornecer uma representação mais detalhada das propriedades elétricas do solo em uma ampla faixa de frequências (100 Hz até 2 MHz). Ele considera a natureza complexa da resposta do solo, que pode incluir comportamentos tanto resistivos quanto reativos (capacitivos ou indutivos). Este modelo é baseado em dados empíricos e em teorias de eletromagnetismo aplicadas ao solo. A expressão de Portela (18)

utiliza uma abordagem que integra tanto a condutividade elétrica quanto a permissividade do solo, expressando-as como uma impedância complexa que varia com a frequência, em que  $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular,  $\Delta_i$  é o valor de  $\omega\varepsilon$  em 1 MHz e  $\alpha$  é um parâmetro ajustável do solo.

$$\sigma(f) \pm j\omega\varepsilon(f) = \sigma_{100Hz} + \Delta_i \left[ \cot\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right) \pm j \right] \left(\frac{\omega}{2\pi \cdot 10^6}\right)^\alpha \quad (18)$$

vi. Modelo de Visacro-Alípio (2012): Visacro e Alípio realizaram medições em mais de 30 locais diferentes para determinar a dependência da frequência dos parâmetros elétricos dos solos. Com base nos dados obtidos, eles propuseram as expressões (19) e (20) para a dependência da frequência da permissividade relativa e da condutividade do solo. A equação (19) é válida para frequências que variam de 10 kHz a 4 MHz, enquanto a equação (20) é válida para frequências de 100 Hz a 4 MHz. Para expressar a permissividade relativa abaixo de 10 kHz, Visacro e Alípio sugerem usar o valor dado pela equação (19) a 10 kHz. A metodologia de Visacro-Alípio se destaca por realizar medições em campo e por sua consistência, comprovada pela boa concordância entre os resultados experimentais e os obtidos por simulação eletromagnética, utilizando parâmetros determinados para os solos onde os eletrodos estavam instalados. Porém, trata-se de um modelo não causal. Em um trabalho posterior, Alípio e Visacro (2014) propuseram um modelo causal, também consistente quando comparado com resultados experimentais e apresentando boa correlação com o modelo Visacro-Alípio de 2012 (ALIPIO; VISACRO, 2014; CIGRÉ WG C4.33, 2019; ALIPIO, 2013).

$$\varepsilon_r(f) = 7.6 \times 10^3 f^{-0.4} + 1.3 \quad (19)$$

$$\sigma(f) = \sigma_{100Hz} \left\{ 1 + \left[ 1.2 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{\sigma_{100Hz}}\right)^{0.73} \right] (f - 100)^{0.65} \right\} \quad (20)$$

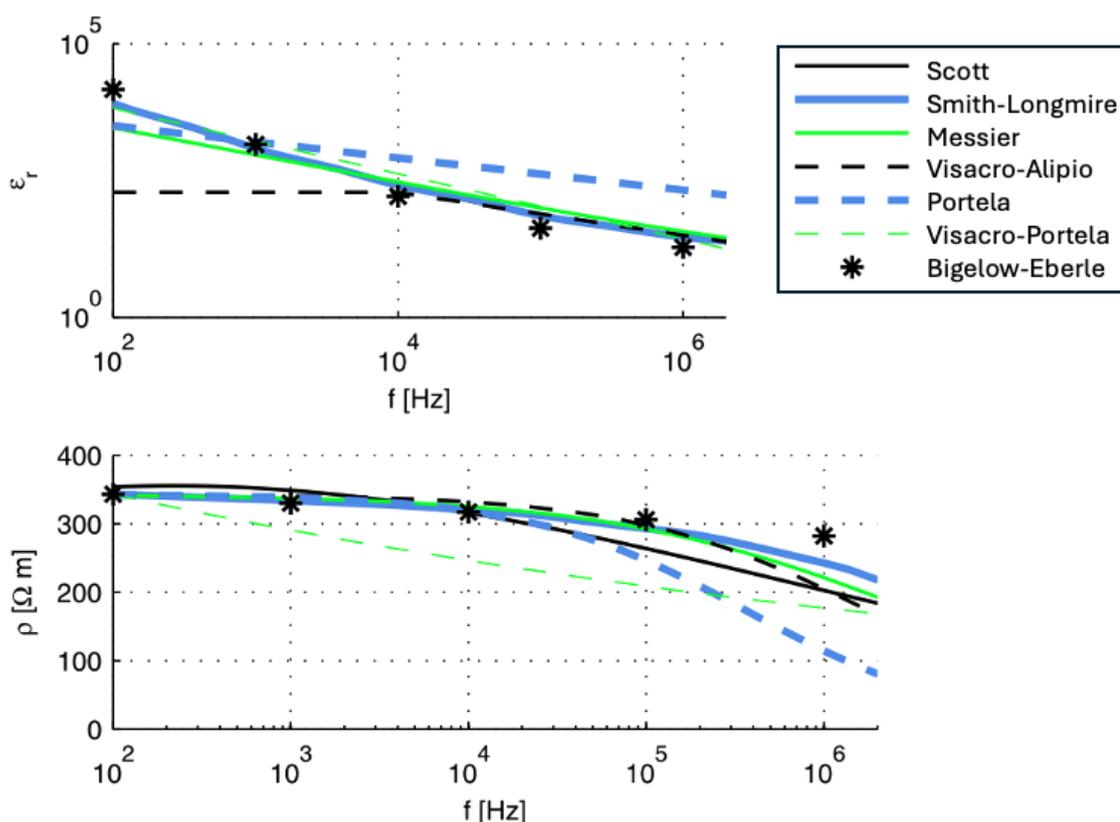
Na Figura 9, é apresentada uma comparação, realizada por Cavka et al. (2014), entre os modelos de solo citados e resultados de medição obtidos por Bigelow e Eberle (1972). A Figura 10 apresenta a comparação entre diferentes modelos de solo em termos de impedância de entrada, considerando um condutor horizontal de 10 metros de comprimento e 5 mm de raio, enterrado a uma profundidade de 1 metro em um solo de resistividade 1000  $\Omega.m$ . Os resultados obtidos para os diferentes modelos de solo são comparados com aqueles de um

modelo de solo com parâmetros constantes, permitindo avaliar as variações na impedância em função das características do solo.

É possível notar que os modelos apresentam respostas razoavelmente próximas para os parâmetros de condutividade e permissividade medidos, sendo os modelos de Portela e Visacro-Portela os que apresentaram maior divergência.

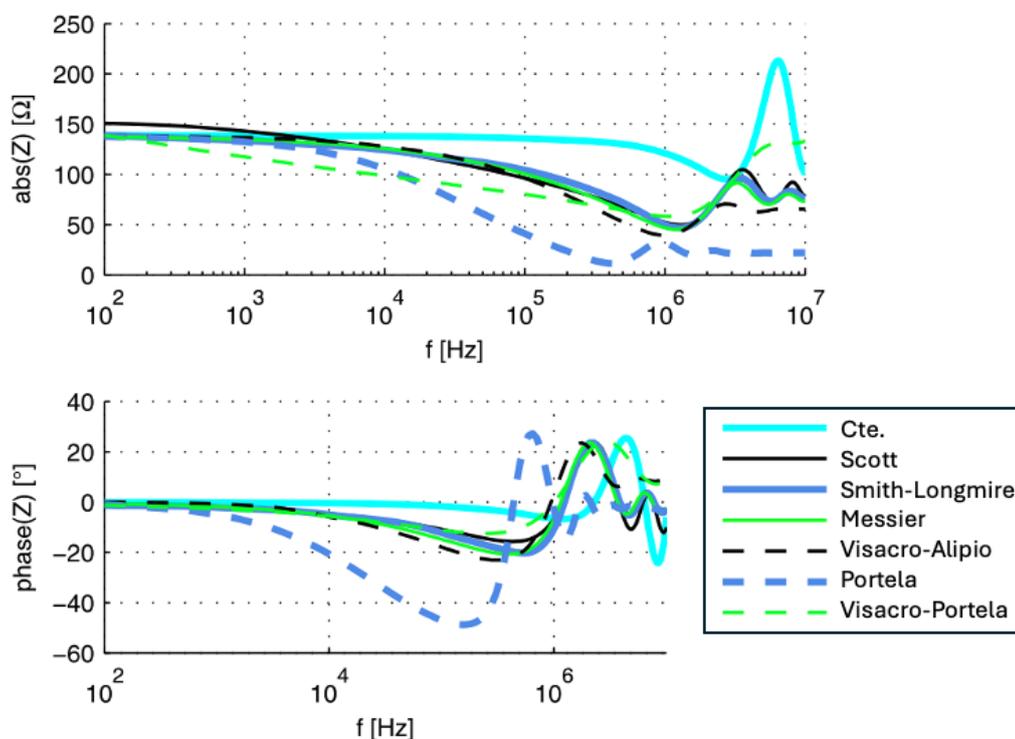
Para este trabalho, adotou-se o modelo de Messier, visto que possui equações relativamente simples de serem implementadas, resposta similar aos demais modelos, e ser considerado um modelo causal, isto é, sua resposta em frequência pode ser convertida para o domínio do tempo (através da Transformada Inversa de Fourier, por exemplo) respeitando o princípio de causa e efeito.

Figura 9: Resposta em frequência da permissividade e resistividade elétricas dos modelos de solo apresentados e dos dados de medição de BE (Bigelow e Eberle, 1972).



Fonte: (CAVKA; MORA; RACHIDI, 2014) Adaptada.

Figura 10: Resposta em frequência da impedância de entrada ( $Z$ ) dos modelos de solo apresentados e de solo de parâmetros constantes (Cte), considerando condutor horizontal.



Fonte: (CAVKA; MORA; RACHIDI, 2014) Adaptada.

### 3.3 Efeitos de Correntes Impulsivas em Sistemas de Aterramento

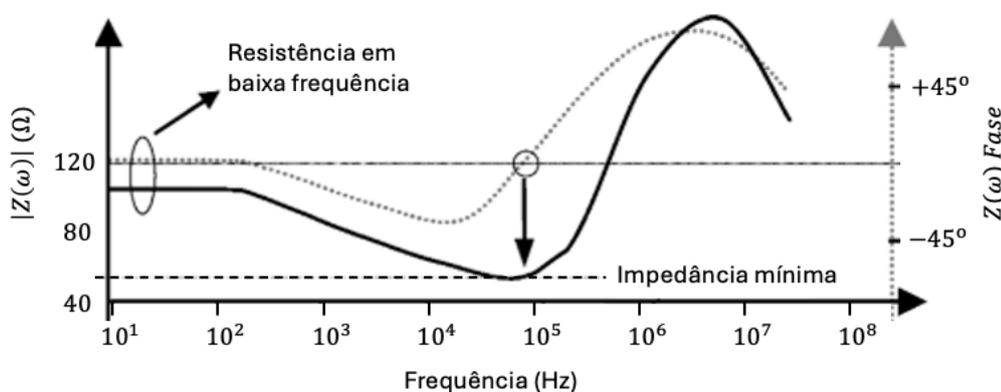
Correntes impulsivas, como das descargas atmosféricas, são caracterizadas por tempos de subida muito pequenos, na ordem de unidades de microssegundos ( $\mu\text{s}$ ), e valores elevados de picos de corrente, na ordem de até centenas de quiloampères (kA). Como visto na Seção 2.3, essas correntes impulsivas apresentam componentes de frequência na ordem de MHz. Quando essas correntes fluem através de um sistema de aterramento, podem gerar efeitos significativos, que precisam ser considerados no projeto de sistemas de proteção. O efeito mais comum é relacionado à impedância impulsiva que, diferentemente da resistência de aterramento, leva em conta os parâmetros indutivos e capacitivos do solo, devido às componentes de alta frequência do sinal impulsivo (VISACRO, Silvério, 2007).

Para faltas de baixa frequência, na ordem de grandeza da frequência da rede elétrica (60 Hz), o sistema de aterramento promove uma baixa resistência de aterramento. No entanto, projetar um sistema de aterramento que leve em consideração a impedância impulsiva pode ser uma tarefa desafiadora a qual

depende da amplitude e parâmetros temporais da forma de onda da corrente (VISACRO, 2005).

À medida que a frequência do sinal de corrente aumenta, o valor da impedância diverge do valor da resistência de baixas frequências, tornando-se mais baixa devido a efeitos capacitivos. A impedância continua diminuindo até que o efeito indutivo comece a influenciar. Ela atinge um valor mínimo em torno de uma frequência onde os efeitos capacitivos e indutivos se compensam (ressonância). Depois disso, o efeito indutivo prevalece e a impedância aumenta, conforme mostrado na Figura 11. Dependendo das características do sistema de aterramento, a dinâmica da impedância pode ser diferente, onde os efeitos capacitivos podem surgir depois dos efeitos indutivos, ou até mesmo, não se apresentarem. Para as componentes de altas frequências da descarga atmosférica, por exemplo, a impedância de aterramento pode ser bem alta, caracterizando uma impedância de surto (VISACRO, 2007).

Figura 11: Resposta em frequência de dada impedância de aterramento.



Fonte: (VISACRO, 2007) Adaptada.

Um condutor enterrado no solo tem sua resistência de aterramento diminuída conforme seu comprimento aumenta (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995). Isso também é válido para a impedância de surto até certo ponto. Existe um comprimento limite para o qual a impedância de surto não é mais diminuída. Esse comprimento é chamado de comprimento efetivo, e não é um parâmetro constante para uma dada configuração de eletrodos enterrados em um determinado solo (LIMA, A. B. 2010).

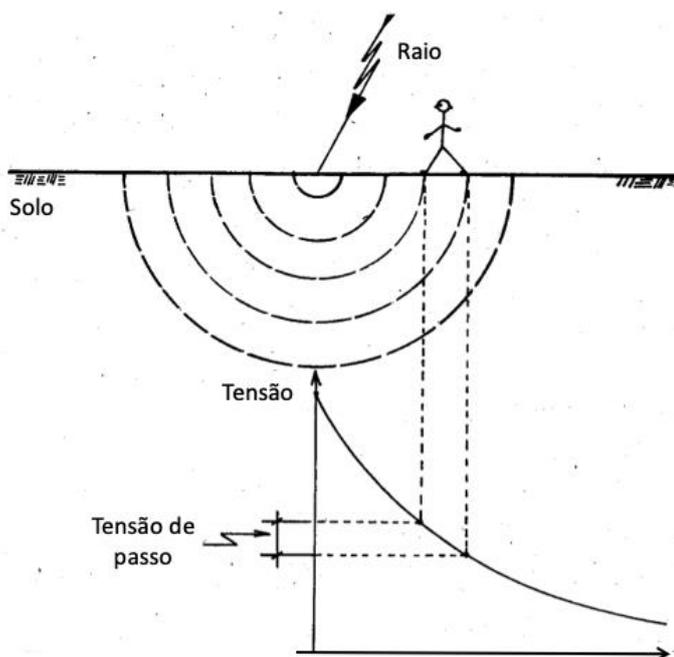
Ondas com tempos de frente diferentes levam a comprimentos efetivos diferentes. Ondas rápidas, cujas componentes de frequência são tipicamente altas,

têm um comprimento efetivo mais curto, pois estão associadas a efeitos de atenuação mais pronunciados no solo (VISACRO, Silvério, 2007).

Dessa forma, a corrente de uma descarga atmosférica, que flui para o solo, pode gerar altas tensões de passo nas proximidades do eletrodo onde a corrente é injetada. Isso acontece porque, com a ocorrência de uma descarga atmosférica, o potencial elétrico nas proximidades do ponto de injeção de corrente é máximo e, conforme o aumento da distância, o potencial elétrico diminui. Então, o sistema de aterramento deixa de ser equipotencial na região próxima ao ponto de injeção de corrente, pois passa a haver uma diferença de potencial (d.d.p.) no solo. Isso é também chamado de GPR (*Ground Potential Rise*). Um passo humano, que possui uma distância aproximada de 1 metro, estará sujeito a uma d.d.p. nesse solo e, conseqüentemente, ao choque elétrico.

Portanto, é desejável especificar o projeto de uma malha de aterramento que possa suportar não apenas as ocorrências de baixas frequências, mas também as de altas frequências, como uma descarga atmosférica. A Figura 12 apresenta uma ilustração da tensão de passo causada por um raio que atinge o solo. Portanto, a tensão de passo é causada pelo GPR, que é o aumento do potencial elétrico do solo em relação a um ponto de referência distante, em consequência da circulação de uma corrente impulsiva no solo, como a descarga atmosférica.

Figura 12: Tensão de passo devido a uma corrente de raio



Fonte: (KINDERMANN, 1995) Adaptada.

## 4 ENGENHARIA ASSISTIDA POR COMPUTADOR

### 4.1 Definição

A Engenharia Assistida por Computador (CAE – *Computer Aided Engineering*) é uma área que se baseia no uso de *softwares* para auxiliar em tarefas de análise e simulação no campo da engenharia. Os sistemas de CAE são fundamentais para reduzir o tempo e os custos de desenvolvimento de produtos, além de aumentar a precisão e a eficiência no processo de *design*. Entre as diversas aplicações de CAE, destacam-se a análise estrutural, a dinâmica dos fluidos, a análise térmica e a eletromagnética. Ferramentas CAE, como os *softwares* da Ansys, possuem o papel de resolver numericamente as equações que regem o fenômeno físico que se deseja estudar, utilizando métodos que discretizam o domínio do problema, como Método dos Elementos Finitos (MEF) ou Método dos Momentos (*MoM – Method of Moments*), por exemplo. Porém, outros tipos de métodos podem ser aplicados numa análise CAE, a depender do nível de complexidade do fenômeno físico, como a Modelagem por Linha de Transmissão (TLM – *Transmission Line Modelling*) e a Teoria de Circuitos Elétricos (LI; GUAN, 2022).

A utilização de ferramentas de CAE permite a realização de simulações complexas em que cujos cálculos seriam inviáveis de serem feitos manualmente. Essas ferramentas proporcionam um ambiente virtual onde os engenheiros podem testar e validar diferentes cenários de operação, identificar possíveis falhas e otimizar o desempenho dos produtos. A CAE é, portanto, uma parte essencial do ciclo de vida do produto, desde sua concepção até a fase de testes e fabricação (ESSS, 2022).

Diversos trabalhos já foram desenvolvidos pelo autor e parceiros no segmento de CAE, em que alguns métodos foram utilizados em aplicações específicas do setor elétrico. Um dos destaques envolve a utilização do MEF (através de *softwares* como o Ansys) em conjunto com a TLM para modelagem da ancoragem de torres transmissoras (LEAL TARRAGÔ *et al.*, 2022) e modelagem de arranjos de antenas 5G (SANTOS, R. G. M. DOS *et al.*, 2023), inclusive com aplicação de ferramentas de aprendizado de máquina e/ou otimização (ALVES *et al.*, 2020; BARBOSA *et al.*, 2019; COUTINHO *et al.*, 2021). Outro exemplo é a aplicação da Teoria dos Circuitos para análises de fluxo de potência no setor elétrico (LEAL TARRAGÔ *et al.*, 2023).

Além disso, em trabalhos anteriores do autor, o MoM também foi aplicado através do *software CST Microwave Studio* para análises de sistemas de aterramento (LOURENÇO NOVO, L. R. G. Da S. *et al.*, 2018). No presente trabalho, apenas o MEF será utilizado, através do *software Ansys HFSS*.

## 4.2 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos é uma das técnicas mais utilizadas dentro da CAE. Trata-se de um método numérico para a solução de problemas complexos de engenharia e física, particularmente aqueles que envolvem campos contínuos como tensão, temperatura e campos eletromagnéticos. O MEF divide um grande problema em pequenos elementos finitos, onde cada elemento é resolvido individualmente. A combinação das soluções desses elementos fornece uma solução aproximada para o problema original (SOBRINHO, 2006).

A aplicação do MEF envolve várias etapas: a discretização do domínio do problema, a seleção de funções de forma, a montagem das equações do sistema, a aplicação de condições de contorno e a solução do sistema de equações. A precisão e a eficiência do MEF dependem fortemente da qualidade da discretização e da capacidade computacional disponível (CLEMENS; WEILAND, 2001).

Para solução de problemas de origem eletromagnética, o sistema de equações a serem resolvidas pelo MEF são as equações de Maxwell, que são expressas em termos dos vetores de campos elétrico ( $\mathbf{E}$ ) e magnético ( $\mathbf{B}$ ), e descrevem a relação entre as cargas, correntes e os campos. As equações (21) a (24) apresentam as equações de Maxwell na forma diferencial no domínio do tempo ( $t$ ), em que  $\rho$  é a densidade de cargas,  $\epsilon_0$  é a permissividade elétrica do vácuo,  $\mathbf{J}$  é o vetor densidade de corrente, e  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo (POZAR, 2012).

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (21)$$

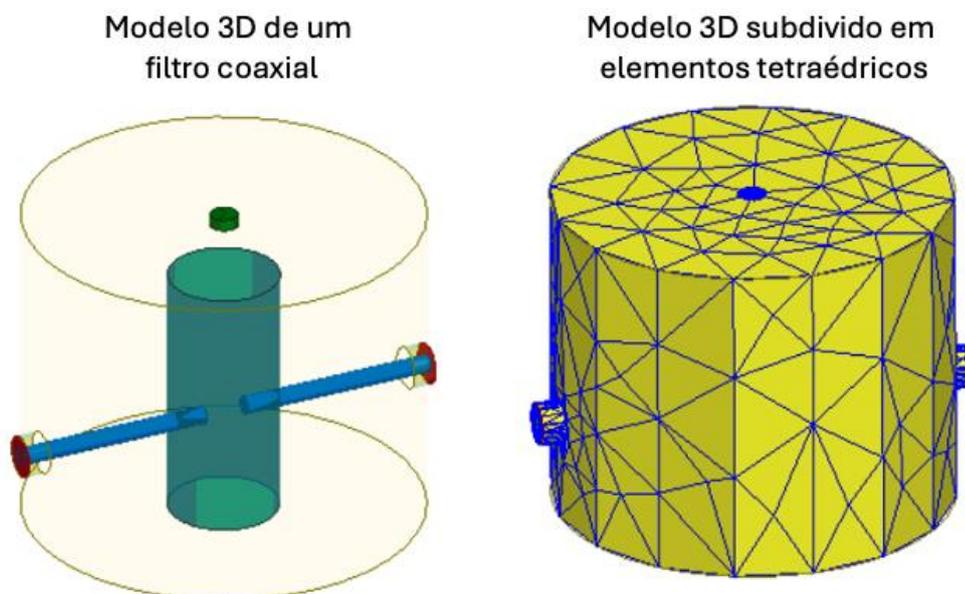
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (22)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (23)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (24)$$

Então, o domínio contínuo onde o problema ocorre é discretizado em pequenos elementos, geralmente triangulares (2D) ou tetraédricos (3D), conforme mostrado na Figura 13. Cada elemento contém nós em seus vértices, que são os pontos onde o *software* vai calcular os valores das variáveis (campo elétrico, magnético etc.).

Figura 13: Exemplo da discretização em elementos finitos.



Fonte: (ANSYS, 2024) Adaptada.

Para aplicar o MEF, as equações de Maxwell são primeiro reformuladas usando uma abordagem variacional (ou método dos resíduos ponderados). Isso é feito multiplicando as equações por uma função de teste (geralmente uma função polinomial definida em cada elemento) e integrando sobre o domínio. Essa reformulação converte o problema diferencial em um sistema de equações integrais (WEILAND, 1977). Por exemplo, para a Lei de Faraday (23), a equação pode ser expressa de forma integral para ser resolvida numericamente, conforme (25), onde  $\mathbf{W}$  é a função de teste e  $V$  é seria o volume do domínio (ou elemento) a ser integrado:

$$\int_V (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot \mathbf{W} dV = - \int_V \frac{\partial B}{\partial t} \cdot \mathbf{W} dV \quad (25)$$

A função teste possui o objetivo de representar as condições de contorno definidas. Com a formulação variacional, o *software* monta um grande sistema de

equações algébricas. As variáveis (valores do campo elétrico ou magnético) em cada nó do elemento são desconhecidas e precisam ser determinadas (ANSYS, 2024).

### 4.3 O Software Ansys HFSS

O HFSS (*High Frequency Structure Simulator*) é um dos *softwares* de simulação mais avançados que utilizam o MEF para análise eletromagnética. Desenvolvido pela *Ansys*, o HFSS é amplamente utilizado em várias indústrias, incluindo telecomunicações, automotiva, aeroespacial e defesa, para a simulação de dispositivos que operam em altas frequências, como antenas, filtros, guias de onda e outros componentes de micro-ondas (ANSYS, 2024).

O HFSS utiliza o MEF para resolver as equações (26) e (27), que são baseadas nas equações de Maxwell no domínio da frequência ( $\omega$ ), onde  $k_0^2 = \frac{\omega^2}{c^2}$ ,  $J_{source}$  representa a fonte de sinal eletromagnético,  $\mu_r$  e  $\epsilon_r$  são a permeabilidade e a permissividade relativas ao vácuo, respectivamente.

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_r} \nabla \times \mathbf{E} \right) - k_0^2 \epsilon_r \mathbf{E} = -j\omega\mu_0 \mathbf{J}_{source} \quad (26)$$

$$\mathbf{B} = \frac{j}{\omega} \nabla \times \mathbf{E} \quad (27)$$

Com base nas grandezas eletromagnéticas utilizadas nas equações (26) e (27), fica claro que, no HFSS, o problema é tratado em termos de campos elétricos e magnéticos, em vez de tensões e correntes. Consequentemente, é fundamental que uma simulação no HFSS inclua um volume onde existam campos elétricos e magnéticos. Esses volumes geralmente compreendem materiais dielétricos e condutores, incluindo o ar que envolve os condutores. O HFSS utiliza as equações de campo para derivar uma matriz de elementos finitos, calculando assim os campos eletromagnéticos e a matriz de parâmetros *S* (*scattering parameters*) associada a uma estrutura excitada por portas.

O processo de simulação no HFSS pode ser descrito nas seguintes etapas:

i. Modelagem do problema: O usuário cria um modelo geométrico tridimensional do dispositivo a ser analisado. Isso pode incluir a definição de materiais, geometrias complexas e interfaces.

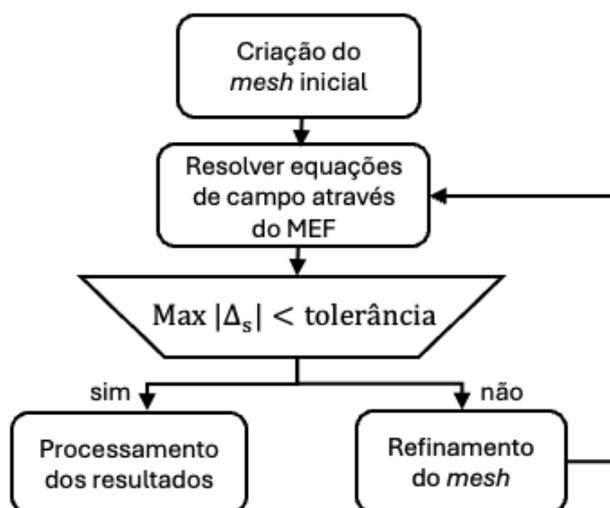
ii. Discretização do domínio: O *software* divide o modelo geométrico em pequenos elementos finitos. A discretização deve ser refinada o suficiente para capturar as variações dos campos eletromagnéticos, mas não tão refinada que torne o problema computacionalmente impraticável. O *software* HFSS consegue realizar essa tarefa de maneira automática e otimizada, através da ferramenta *Adaptive Refinement*, que refina a discretização do domínio (*mesh*) até que o erro máximo entre os resultados ( $\text{Max } |\Delta_s|$ ) seja menor que uma tolerância especificada, conforme mostrado no fluxograma da Figura 14.

iii. Definição das condições de contorno e excitações: O usuário define as condições de contorno, como paredes metálicas ou superfícies abertas, e as excitações, como fontes de sinal ou cargas.

iv. Solução das Equações de Maxwell: O HFSS resolve numericamente as equações de Maxwell para cada elemento da discretizado. O *software* utiliza técnicas avançadas de solução, como métodos iterativos e diretos, para lidar com os grandes sistemas de equações gerados.

v. Análise dos Resultados: Após a solução, o HFSS fornece uma variedade de resultados, como distribuições de campos elétricos e magnéticos, parâmetros S, perdas de retorno, impedâncias, e muitos outros. Esses resultados são fundamentais para avaliar o desempenho do dispositivo e identificar áreas para melhorias.

Figura 14: Fluxograma simplificado do *Adaptive Refinement*.



Fonte: (ANSYS, 2024) Adaptada.

## 5 MODELO DE SIMULAÇÃO NO SOFTWARE ANSYS HFSS

Para a que o *software* seja capaz de retornar resultados confiáveis, é necessário configurar corretamente alguns aspectos da simulação, são eles: excitação, modelo geométrico, definição dos materiais e as condições de contorno. Na excitação, é necessário inserir os dados da forma de onda desejada, no caso, a corrente de descarga atmosférica. A definição dos materiais depende do modelo geométrico, mas também do que se pretende analisar, como a dependência de frequência. Já as condições de contorno devem garantir o retorno da corrente e evitar reflexões desnecessárias que possam influenciar no resultado.

### 5.1 Modelagem da Corrente de Descarga Atmosférica

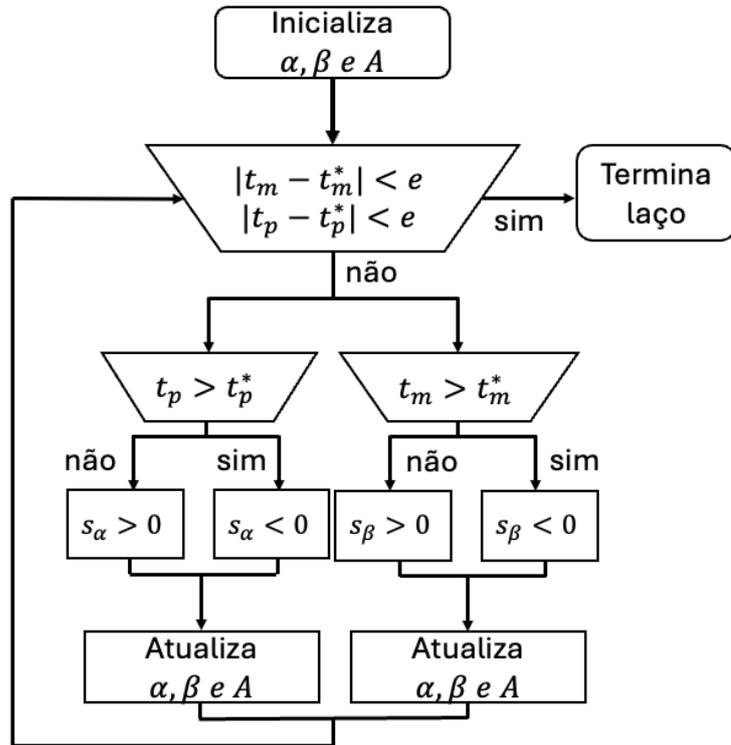
A corrente de descarga atmosférica foi modelada através da forma de onda dupla exponencial, representada pela equação (1). Os parâmetros  $A$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  podem ser definidos através da corrente de pico ( $I_p$ ), do tempo decorrido para que a corrente crescente atinja o valor de pico ( $t_p$ ), e do tempo decorrido para que a corrente decrescente atinja a metade do valor do pico ( $t_m$ ). Porém, é necessário utilizar um método iterativo para definir os parâmetros  $A$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  a partir dos parâmetros  $t_p$ ,  $t_m$ , e  $I_p$ , pois não existe uma relação direta entre eles. Portanto, foi utilizado o método iterativo de autoria própria (LEAL TARRAGÔ *et al.*, 2021), publicado na edição de 2021 da *INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS*, uma importante conferência internacional sobre aterramento e descargas atmosféricas, organizada pelo Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos (CIGRÉ).

O método iterativo está descrito na Figura 15, em que a inicialização é definida a partir das equações (28), (29) e (30) e a atualização dos parâmetros  $A$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  é realizada a partir das equações (30), (31) e (32), respectivamente, na iteração  $k$ .

Os parâmetros  $t_p^*$  e  $t_m^*$  são os valores de  $t_p$  e  $t_m$  desejados, enquanto  $s_\alpha$  e  $s_\beta$  são os passos da iteração, que podem ter módulo constante durante todo o processo iterativo e os seus sinais definidos através dos testes  $t_p > t_p^*$  e  $t_m > t_m^*$ , respectivamente. Por exemplo, caso os valores de  $t_p$  e  $t_m$  na iteração  $k$  estejam

maiores que os valores desejados ( $t_p^*$  e  $t_m^*$ ), os sinais de  $s_\alpha$  e  $s_\beta$  devem ser negativos, podendo fazer com que os valores de  $t_p$  e  $t_m$  tornem-se menores que  $t_p^*$  e  $t_m^*$ , devendo-se atualizar os sinais de  $s_\alpha$  e  $s_\beta$  para positivos na iteração  $k+1$ . Os módulos de  $s_\alpha$  e  $s_\beta$  podem ser otimizados dependendo do tipo descarga atmosférica que se deseja obter. Porém, testes realizados sugerem que o valor de  $|s_\alpha| = |s_\beta| = 0,005$  atende uma vasta quantidade de sinais (LEAL TARRAGÔ *et al.*, 2021).

Figura 15: Fluxograma do método iterativo.



Fonte: Adaptada de (LEAL TARRAGÔ *et al.*, 2021).

$$\beta_{(0)} = \frac{1}{t_m^*} \quad (28)$$

$$\alpha_{(0)} = \frac{1}{t_p^*} \quad (29)$$

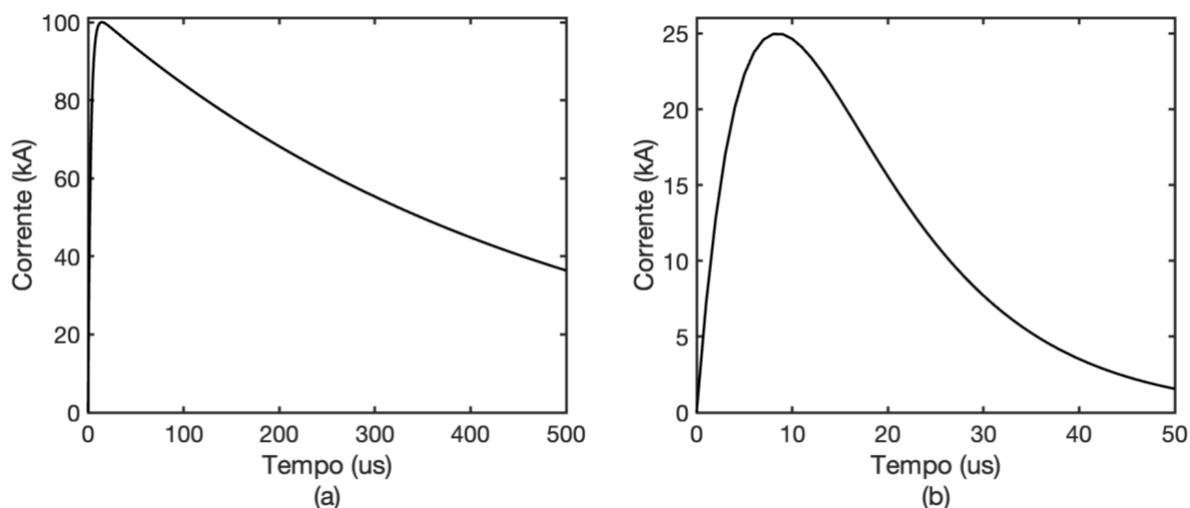
$$A_{(0)} = \left( e^{-\alpha_{(0)} \frac{\ln \beta_{(0)} - \ln \alpha_{(0)}}{\beta_{(0)} - \alpha_{(0)}}} - e^{-\beta_{(0)} \frac{\ln \beta_{(0)} - \ln \alpha_{(0)}}{\beta_{(0)} - \alpha_{(0)}}} \right)^{-1} \quad (30)$$

$$\alpha_{(k)} = \frac{\alpha_{(k-1)}}{1 + s_\alpha} \quad (31)$$

$$\beta_{(k)} = \frac{\beta_{(k-1)}}{1 + s_\beta} \quad (32)$$

Neste trabalho, foram utilizadas duas formas de onda de corrente nas simulações: 10/350  $\mu\text{s}$  com 100 kA de pico e 8/20  $\mu\text{s}$  com 20 kA de pico, conforme mostrado na Figura 16. Na Tabela 2, estão apresentados os valores de  $A$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  obtidos através do método iterativo para ambos os tipos de correntes de descarga.

Figura 16: Correntes de descarga utilizadas na simulação.



Fonte: Própria do autor.

Tabela 2: Parâmetros das descargas utilizadas na simulação.

Tipo de descarga	$I_p$	$A$	$\alpha$	$\beta$
10/350 $\mu\text{s}$	100 kA	1,0285	0,4758	0,0021
8/20 $\mu\text{s}$	25 kA	3,8377	0,1652	0,0801

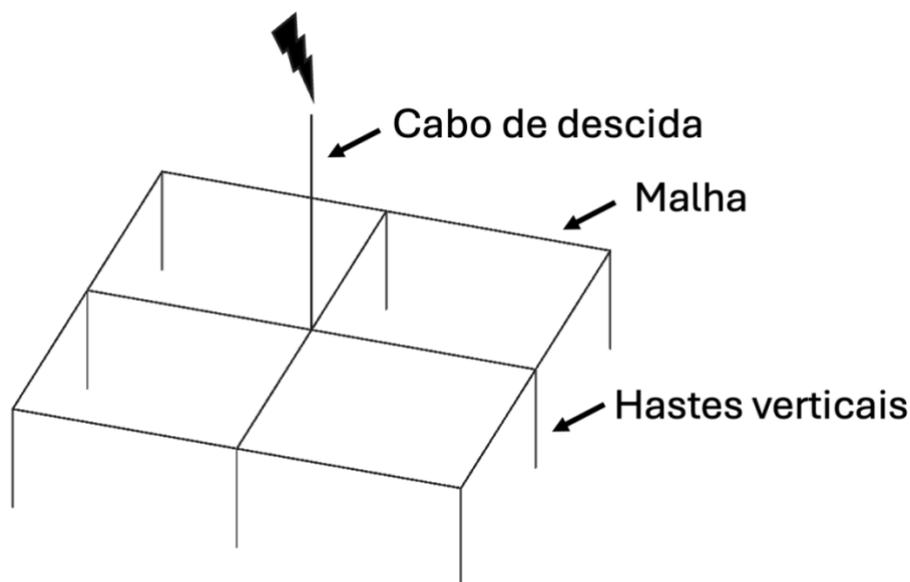
Fonte: Própria do autor.

## 5.2 Modelagem do Sistema de Aterramento

O sistema de aterramento é composto pela malha de aterramento e pelo cabo de descida. Este último é responsável por conectar a malha de aterramento à porta de corrente e possui 12 mm de diâmetro. A malha de aterramento é composta por condutores horizontais com 50 mm<sup>2</sup> de seção transversal (que é o mínimo exigido por norma) e por hastes de aterramento verticais de 12 mm de diâmetro que podem ser conectadas em diversos pontos da malha. A Figura 17 ilustra um diagrama esquemático do sistema de aterramento utilizado. Porém, vários tamanhos de malha foram considerados nas simulações: 10 m x 10 m, 20 m x 20 m e 30 m x 30 m, todas

com retículos de área 5 m x 5 m, a uma profundidade de 50 cm da superfície do solo. O material de todos os condutores do sistema de aterramento foi definido como cobre, que possui condutividade elétrica de  $5,8 \times 10^7$  S/m no *software* da Ansys.

Figura 17: Diagrama esquemático do sistema de aterramento utilizado.



Fonte: Própria do autor.

### 5.3 Modelagem do Solo

As características elétricas do solo influenciam diretamente no desempenho do aterramento. Para eventos em baixas frequências, o solo pode ser modelado através de valores constantes para a permissividade elétrica ( $\epsilon$ ) e resistividade ( $\rho$ ). Porém, esses parâmetros não são constantes. Os parâmetros do solo podem mudar significativamente de acordo com a frequência do sinal eletromagnético que se propaga no solo. Como descargas atmosféricas apresentam componentes de alta frequência, um modelo de solo com parâmetros dependentes de frequência se faz necessário. Portanto, para modelagem do solo foram utilizadas as equações (14) e (15), que descrevem a permissividade elétrica relativa e a condutividade elétrica do solo em função da frequência. Essas equações são inseridas diretamente na configuração do material do solo, respeitando a sintaxe do Ansys HFSS.

Foi escolhido, portanto, um solo com resistividade em baixa frequência de  $1000 \Omega \cdot m$  (que representa uma condutividade  $\sigma_{DC} = 0,001 S/m$ ) e permissividade de alta frequência  $\epsilon_{\infty} = 8\epsilon_0$ . Esse valor de permissividade foi o mesmo utilizado por

Messier (1980) em sua amostragem e representa um valor característico para solos mais secos, sendo uma condição mais crítica e desejável para as análises. Na Tabela 3, estão representadas as equações (14) e (15) na sintaxe do Ansys HFSS, de acordo com os valores de  $\epsilon_{\infty}$  e  $\sigma_{DC}$  escolhidos.

Tabela 3: Equações de Messier na sintaxe do Ansys.

Permissividade Relativa	$8 * (1 + \sqrt{0.001 / (3.1416 * \text{Freq} * 8 * (8.85e-12))})$
Condutividade Elétrica	$0.001 * (1 + \sqrt{4 * 3.1416 * \text{Freq} * 8 * (8.85e-12) / 0.001})$

Fonte: Própria do autor.

Ainda, é necessário definir a geometria do solo, na qual a malha de aterramento será enterrada. Correntes injetadas no solo possuem um comportamento radial, isto significa que a corrente que flui pelo solo não possui uma direção preferencial e propaga-se em todas as direções, desde que o solo seja homogêneo. Por isso, o solo foi modelado como uma semiesfera, promovendo certa simetria em torno dos condutores de aterramento e evitando que a corrente que flui pelo solo seja forçada a uma direção indesejada. Na Figura 18, está ilustrada uma configuração de simulação com solo centralizado no cabo de descida que conecta a excitação (porta de corrente) à malha de aterramento. O raio do solo semiesférico foi definido em 90 metros, que é suficiente para a malha de maior tamanho utilizado, conforme será explicado na análise de sensibilidade presente na Seção 5.6.

Figura 18: Configuração com malha de aterramento e cabo de descida em solo semiesférico.



Fonte: Própria do autor.

## 5.4 Condições de Contorno

As condições de contorno definem que situações esperar no limite do domínio da simulação. Para o solo, por exemplo, espera-se que a corrente flua de maneira radial, conforme discutido na Seção 5.3. Na casca da semiesfera, portanto, faz-se necessário definir o retorno da corrente. No HFSS, essa definição é realizada a partir da condição de contorno  $E = 0$ , em que o campo elétrico da superfície é nulo, tornando-a um condutor perfeito. Essa condição de contorno também foi utilizada por B. Salarieh (2019; 2020) em análises similares. A Figura 19 mostra a condição de contorno definida nas cascas do solo semiesférico e de um bloco de ar cilíndrico que encaixa na superfície da casca esférica. Essa superfície cilíndrica garante o retorno da corrente à porta de injeção.

Figura 19: Condição de contorno em que  $E=0$  para o retorno da corrente.

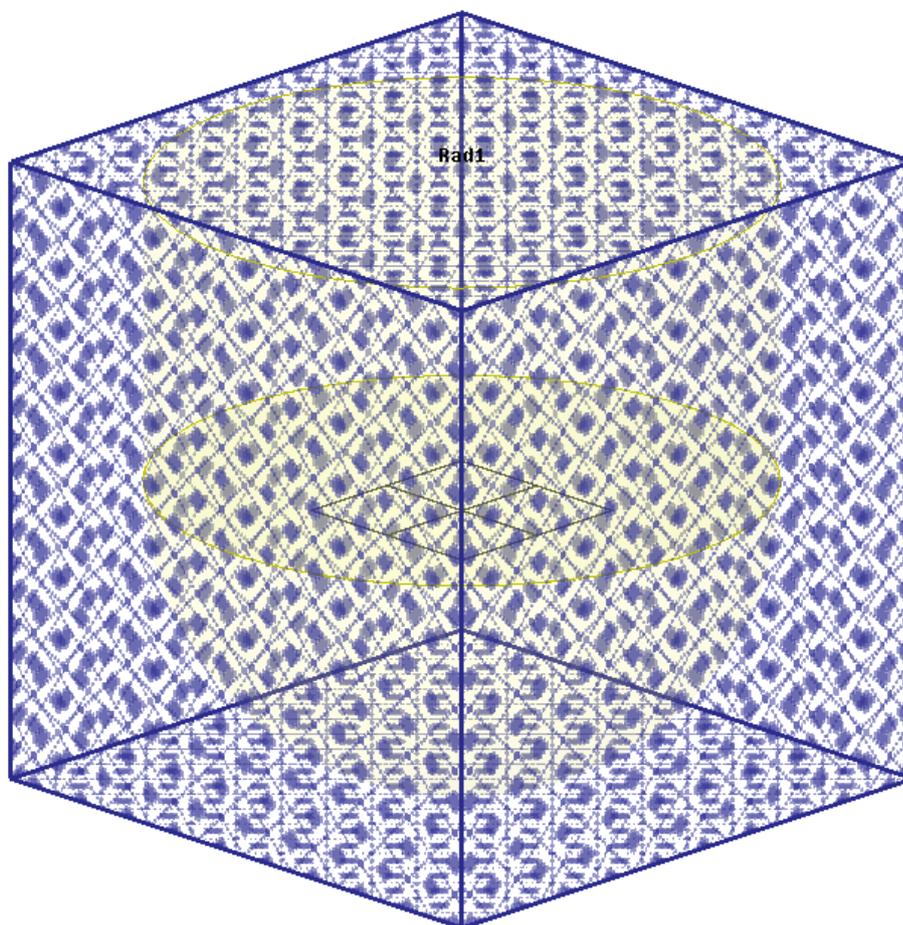


Fonte: Própria do autor.

Além disso, as correntes de descarga geram ondas eletromagnéticas que se propagam por todo o espaço livre. Por isso, em volta de todo o domínio da simulação foi definida uma condição de *Open Region*, em que todas as ondas eletromagnéticas são 100% absorvidas. Dessa forma, é possível garantir que não

haja reflexões indesejadas. Na Figura 20, está apresentada essa condição de contorno definida na superfície do bloco que delimita o domínio da simulação.

Figura 20: Condição de contorno *Open Region* para evitar reflexões.



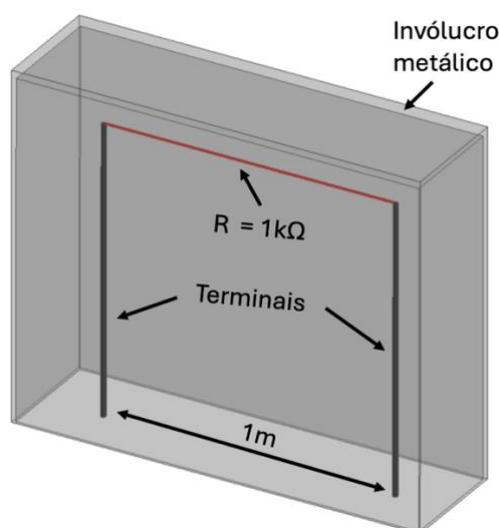
Fonte: Própria do autor.

Para que os valores das tensões de passo possam ser determinados, um elemento de dois terminais foi modelado para ser colocado na superfície do solo. Esse elemento está apresentado na Figura 21, possuindo uma distância de 1 metro entre seus terminais, e uma resistência fixa de  $1\text{ k}\Omega$ , que são, respectivamente, os valores de passo e resistência padrão adotada para o corpo humano (ABNT, 2005). Além disso, foi colocada uma casca metálica em volta do elemento de dois terminais, para evitar interferência eletromagnética (EMI) com a corrente que flui através do cabo de descida, baseado no efeito da gaiola de Faraday (POZAR, 2012).

Para a análise de EMI, um outro elemento foi pensado. Um circuito em *loop*, paralelo à superfície do solo, posicionado a uma altura de 1 metro, conforme

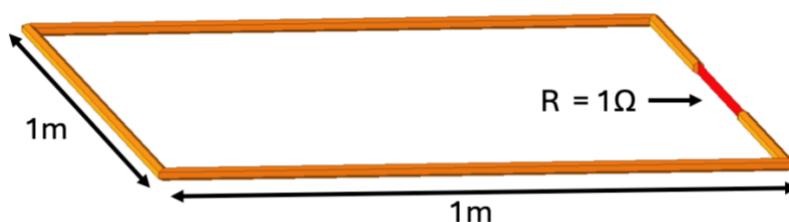
mostrado na Figura 22. O elemento EMI possui uma resistência de  $1\ \Omega$  e nenhuma alimentação auxiliar. Portanto, toda e qualquer corrente que for detectada circulando o *loop* será de origem externa, representando a interferência. O valor de  $1\ \Omega$  foi escolhido para que o valor da corrente de interferência possa ser diretamente convertido em tensão.

Figura 21: Elemento para simular passo humano e extrair a tensão de passo.



Fonte: Própria do autor.

Figura 22: Loop para simular um circuito de interferência (EMI).



Fonte: Própria do autor.

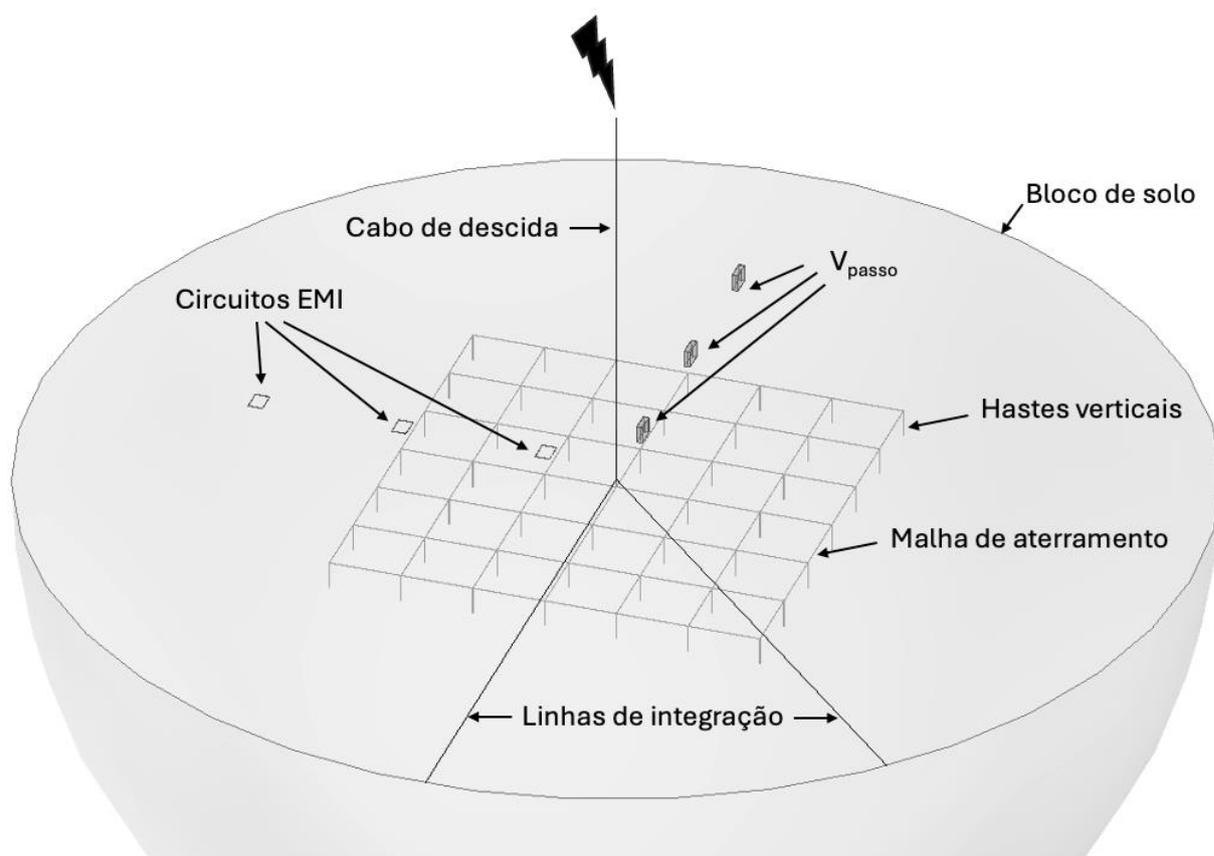
## 5.5 Pós-processamento

Alguns parâmetros devem ser analisados em estudos de sistemas de aterramento, como a distribuição de potencial no solo, por exemplo. No entanto, o HFSS não fornece diretamente a distribuição de potencial, sendo necessário processar os valores do campo elétrico, o qual é disponibilizado pelo *software* como resposta. O potencial elétrico ( $V$ ) pode ser obtido pela integral do vetor campo

elétrico ( $E$ ) ao longo de uma distância, conforme a equação (33). Para isso, é necessário definir uma linha de integração na superfície do solo, sobre a qual são calculados os valores de potencial com base nos dados de campo elétrico gerados pela simulação.

A Figura 23 ilustra o modelo de simulação completo, em que é possível notar as linhas de integração definidas no HFSS, que vão do centro até à borda na superfície do solo. Duas linhas de integração foram definidas, uma na direção da lateral da malha, e outra na direção diagonal. A função dessas linhas é exclusivamente coletar os valores do campo elétrico ao longo dela. Após a coleta e exportação dos dados em um arquivo \*.csv, por exemplo, a equação (33) deve ser aplicada numericamente para calcular a distribuição do potencial (SADIKU, 2000).

Figura 23: Modelo de simulação completo e indicação das linhas de integração.



Fonte: Própria do autor.

Na equação (33), o potencial de referência  $V(a)$  é o obtido na referida borda e é igual a zero, fazendo com que a equação possa ser simplificada para a equação (34), e  $r$  é o vetor distância entre um determinado ponto da linha de integração e a

borda do solo. Além disso, apenas as componentes de  $E$  na direção de  $r$  interessam, pois o produto escalar será igual à zero para as outras componentes.

$$V(b) - V(a) = - \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (33)$$

$$V(r) = - \int_0^r \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} \quad (34)$$

Outro parâmetro importante é a impedância impulsiva, que é definida como o valor de pico da tensão da malha, dividida pelo valor de pico da corrente injetada (LIMA, 2010; WENRONG, S. et al., 2015). Neste trabalho, a impedância impulsiva será sempre avaliada com relação ao centro da malha, ou seja, a tensão é calculada considerando o potencial entre o centro da malha ( $V(b)$ , em que  $b$  é a posição central da malha) e a borda do solo ( $V(a) = 0$ ).

## 5.6 Análise de Sensibilidade do Domínio de Simulação

O tamanho do domínio da simulação é um aspecto importante do modelo, visto que domínios de tamanho muito pequeno podem gerar reflexões que afetem diretamente o resultado, enquanto domínios de tamanho muito grande implicam em esforços computacionais desnecessários (SALARIEH, Bamdad *et al.*, 2019; SALARIEH, Bamdad; SILVA, J. DE; KORDI, Behzad, 2020).

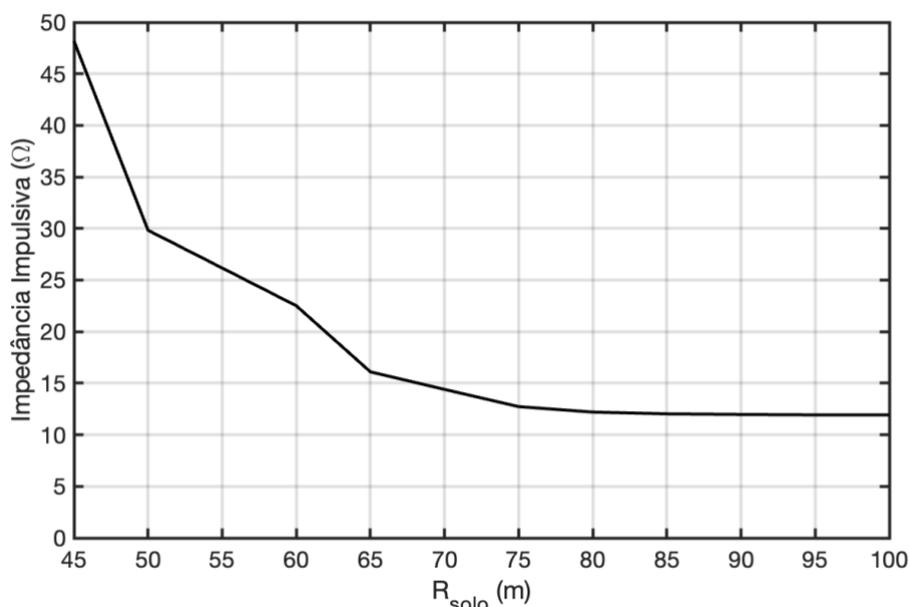
O tamanho do domínio de simulação é definido, neste caso, pelo raio do solo semiesférico. Para definir o tamanho ideal do domínio, foi realizada uma análise de sensibilidade sobre o raio do solo semiesférico, variando-o de 40 a 100 metros.

Para isso, a malha de maior tamanho foi considerada (30 m x 30 m), pois, se o domínio é suficiente para a malha de maior tamanho, também será suficiente para as outras malhas (10 m x 10 m e 20 m x 20 m). Além disso, para essa análise, a descarga do tipo 10/350  $\mu\text{s}$  foi escolhida, pois ela apresenta maiores componentes de baixa frequência com relação à descarga 8/20  $\mu\text{s}$ . Então, se o tamanho do domínio for suficiente para uma análise com a descarga 10/350  $\mu\text{s}$ , também será suficiente para a descarga 8/20  $\mu\text{s}$ , pois a profundidade de penetração ( $\delta$ ) da onda eletromagnética é inversamente proporcional à raiz quadrada de sua frequência ( $f$ ), conforme equação (35), em que  $\mu$  e  $\sigma$  são a permeabilidade magnética e condutividade elétrica, respectivamente (POZAR, 2012).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (35)$$

A Figura 24 apresenta o resultado da impedância impulsiva da malha 30 m x 30 m, para cada valor de raio do solo semiesférico entre 45 m e 100 metros. É possível notar que há uma tendência de a impedância impulsiva manter-se constante a partir de um raio de solo de 90 metros, mostrando esta sensibilidade para o domínio de simulação proposto.

Figura 24: Impedância impulsiva da malha relativa ao raio de solo semiesférico.



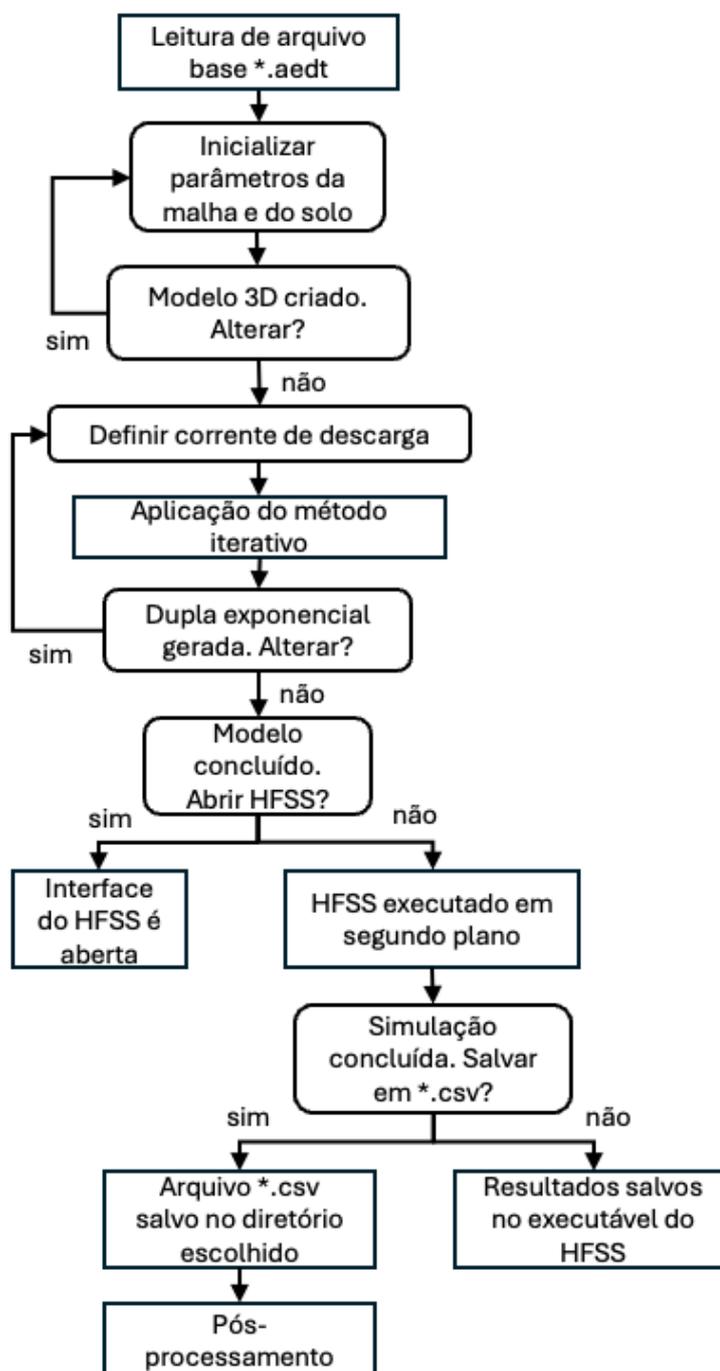
Fonte: Própria do autor.

## 5.7 Automatização do Modelo de Simulação

Com os modelos definidos de cada parte da simulação, também foi desenvolvido um algoritmo de automatização da modelagem no HFSS, baseado no Trabalho de Conclusão de Curso de F. Lopes (2024), e conforme fluxograma da Figura 25. O algoritmo foi desenvolvido na linguagem Python com auxílio da biblioteca *subprocess*, que viabiliza o acesso ao arquivo executável de simulação do HFSS permitindo a alteração do modelo de maneira externa. Dessa forma, é possível gerar um modelo de simulação de malha de aterramento sem necessariamente abrir a interface gráfica do HFSS, tornando a modelagem mais simples e intuitiva. Ainda, é possível variar parâmetros e utilizar algoritmos de otimização para encontrar o melhor modelo de malha de aterramento para uma determinada instalação elétrica ou subestação.

Na inicialização do algoritmo, os parâmetros da malha definidos são a sua dimensão, seção transversal e quantidade de condutores, quantidade e angulação das hastes adicionais. Já os parâmetros do solo são a condutividade ( $\sigma_{DC}$ ) e a permissividade ( $\epsilon_{\infty}$ ), em que as equações da Tabela 3 são implementadas. As condições de contorno da simulação são definidas em um arquivo base o qual será editado pelo código através da biblioteca *subprocess*.

Figura 25: Fluxograma do algoritmo de automatização do modelo.



## 6 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO SISTEMA DE ATERRAMENTO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Neste capítulo, são apresentados os principais resultados de simulação para o desempenho de algumas geometrias de sistemas de aterramento contra descargas atmosféricas. Inicialmente é apresentada a análise de um sistema de aterramento de apenas um condutor enterrado vertical ou horizontalmente. Em seguida, é realizada a análise para diferentes tamanhos de malhas de aterramento.

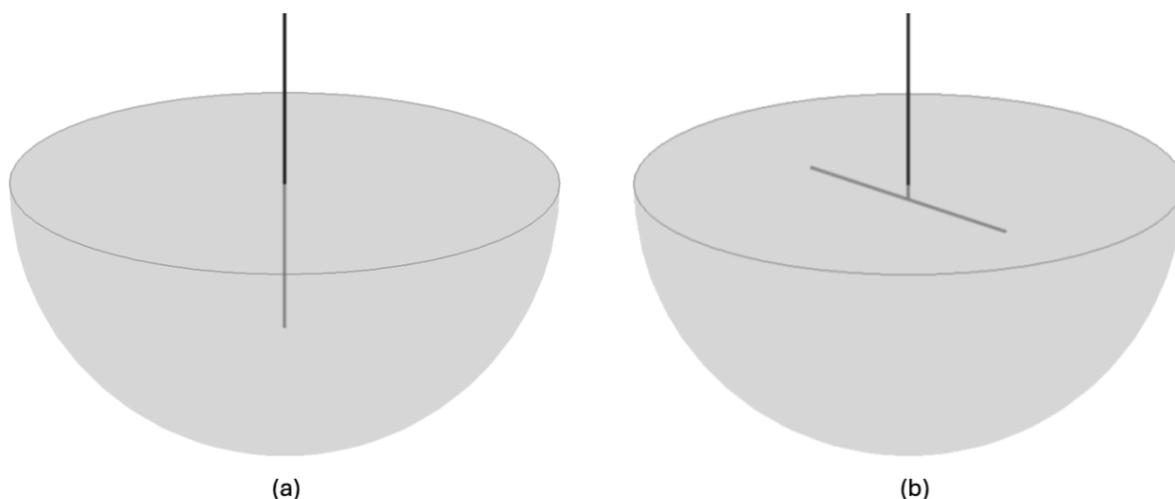
### 6.1 Sistema de Aterramento de Condutor Único

Os sistemas de aterramento que utilizam apenas um condutor enterrado, também conhecidos como aterramento por haste única ou eletrodo de aterramento, são comumente empregados em instalações de menor porte, como residências, pequenos comércios e em áreas rurais, onde as exigências de dissipação de corrente não são tão elevadas quanto em grandes instalações industriais ou de infraestrutura crítica. A análise de um condutor único de aterramento também pode ser aplicada no estudo de aterramentos de fios contrapesos em torres de transmissão. Nesse caso, os condutores são enterrados horizontalmente e conectados à estrutura da torre, que, por sua vez, está ligada aos cabos para-raios das linhas de transmissão.

A Figura 26 (a) mostra o modelo de simulação de um condutor vertical de comprimento inicial 1 m, inteiramente abaixo da superfície do solo. Já a Figura 26 (b) mostra um condutor horizontal, de comprimento inicial também de 1 metro, a uma profundidade de 50 cm da superfície do solo. Esses condutores estão conectados a um cabo de 2 m em que é realizada a injeção de corrente da descarga atmosférica.

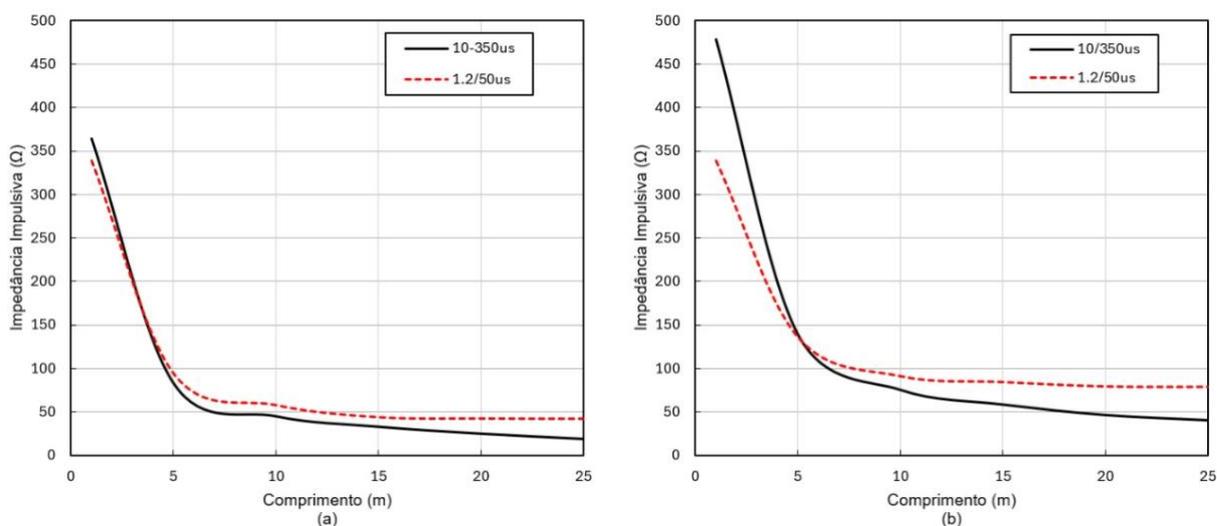
Duas correntes de descarga foram consideradas,  $10/350 \mu\text{s}$  e  $1.2/50 \mu\text{s}$ , ambas de 1 kA de pico. O comprimento dos condutores foi variado de 1 m a 25 metros e seu comportamento frente às descargas foram avaliados quanto à sua impedância impulsiva. Os resultados desta para o condutor vertical estão apresentados na Figura 27 (a), enquanto os resultados para o condutor horizontal estão apresentados na Figura 27 (b). Foi utilizado modelo de solo descrito na Seção 5.3, porém, considerando a resistividade de baixa frequência em  $500 \Omega\cdot\text{m}$ .

Figura 26: Sistema de aterramento de condutor único. (a) vertical. (b) horizontal.



Fonte: Própria do autor.

Figura 27: Impedância impulsiva relativa ao comprimento dos condutores. (a) vertical e (b) horizontal.



Fonte: Própria do autor.

Pode-se observar que, à medida que o comprimento dos condutores aumenta, a impedância impulsiva tende a diminuir. No entanto, existe um ponto em que o aumento do comprimento do condutor deixa de ser eficaz, pois, a partir desse limite, a impedância impulsiva atinge seu valor mínimo. Esse comprimento limite é chamado de comprimento efetivo (LIMA, 2010).

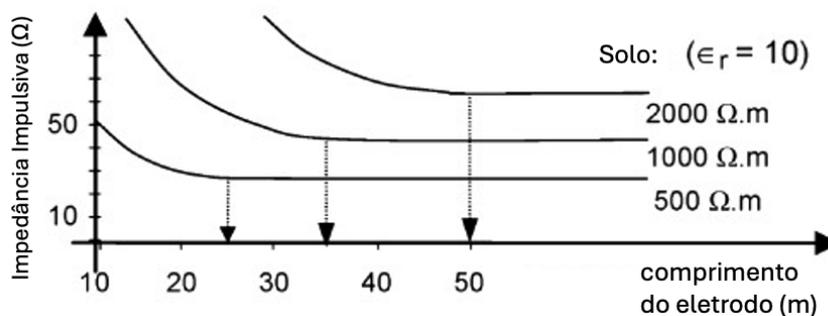
Comparando as duas formas de onda, nota-se que a descarga 10/350  $\mu\text{s}$  — que possui frente de onda mais lenta, ou seja, é menos impulsiva — resulta em um comprimento efetivo maior para as hastes. Isso fica evidente ao analisar o comportamento das curvas próximo aos 25 metros de comprimento: enquanto a

curva da descarga 1,2/50  $\mu$ s já se estabiliza, indicando que a adição de comprimento não gera redução significativa na impedância, a curva correspondente à descarga 10/350  $\mu$ s ainda apresenta uma leve inclinação descendente, indicando que o aumento do comprimento continua contribuindo para a redução da impedância.

A descarga 1,2/50  $\mu$ s, por ser mais impulsiva e ter maior conteúdo de altas frequências, apresenta um efeito de corrente mais concentrado nas regiões próximas ao ponto de injeção, o que limita a efetividade do aumento do comprimento do condutor em reduzir a impedância além de determinado ponto. Portanto, é de se esperar que descargas com menores componentes de alta frequência, como a 10/350  $\mu$ s, permitam um maior comprimento efetivo (VISACRO, Silvério, 2007).

Para efeito comparativo, a Figura 28 apresenta resultados de impedância impulsiva em função do comprimento de um eletrodo horizontal enterrado, extraído do trabalho de Visacro (2007). O eletrodo foi submetido a uma corrente de descarga do tipo 1.2/50  $\mu$ s. Na Figura 28, é possível notar que o comprimento efetivo do eletrodo é de aproximadamente 25 metros, considerando  $\rho_{DC} = 500 \Omega.m$ , resultado bem próximo do obtido através do modelo proposto no HFSS (Figura 27).

Figura 28: Impedância impulsiva relativa ao comprimento de eletrodo horizontal enterrado em solos com diferentes resistividades.



Fonte: (VISACRO, Silvério, 2007)

## 6.2 Sistema com Malha de Aterramento

As malhas de aterramento são mais utilizadas em subestações, instalações industriais e grandes edificações, que representam exigências de dissipação de corrente mais elevada. Por norma, a malha de aterramento deve cobrir toda a área da instalação. Neste trabalho, foram escolhidos três tamanhos de malhas de terra: 10 m x 10 m, 20 m x 20 m e 30 m x 30 m, todas com retículos de área de 5 m x 5 m.

Nesse caso, além da impedância impulsiva, foram avaliadas as tensões de passo nas proximidades do ponto de injeção da corrente impulsiva, distribuição de campo elétrico e de potencial no solo, interferência eletromagnética (EMI) em circuitos próximos à descarga e a densidade de corrente em suas hastes verticais.

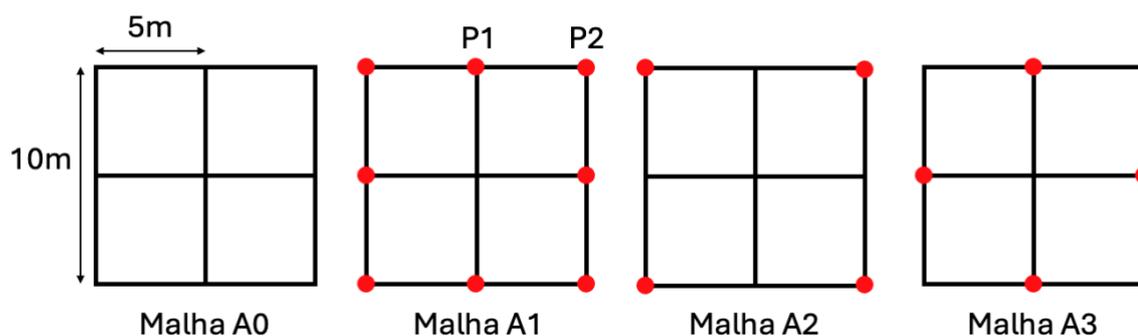
Também foram consideradas duas formas de onda nas análises: 10/350  $\mu\text{s}$  com 100 kA de pico e 8/20  $\mu\text{s}$  com 20 kA de pico.

### 6.2.1 Malha de aterramento 10 m x 10 m

Para a malha de aterramento 10 m x 10 m, foram adotadas quatro geometrias diferentes, em que a posição e a quantidade de hastes verticais foram variadas. A Figura 29 apresenta os diferentes modelos de malhas considerados, em que os pontos vermelhos indicam as posições de conexão das hastes verticais.

Como exemplo, na Figura 17 está apresentado o modelo de simulação da Malha A1, em que as hastes verticais estão conectadas em todos os pontos de interseção externos. Cada haste vertical, seja qual for o modelo de malha, possui um comprimento de 2 metros e diâmetro de 12 mm. P1 e P2, indicados na Malha A1, representam pontos para coleta do valor da densidade de corrente.

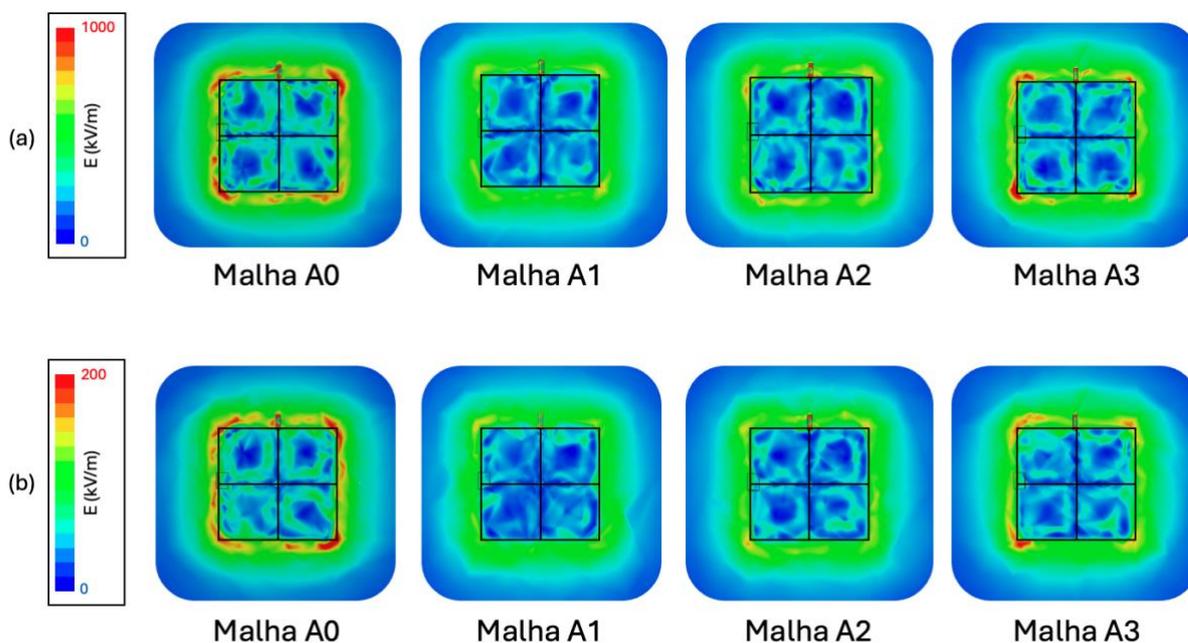
Figura 29: Geometrias das malhas de aterramento 10 m x 10 m.



Fonte: Própria do autor.

A Figura 30 (a) e (b) apresenta os resultados de distribuição de campo elétrico no solo, para as correntes de descarga 10/350  $\mu\text{s}$  e 8/20  $\mu\text{s}$ , respectivamente. É possível notar uma maior concentração de campo elétrico nas bordas das malhas. Esse efeito é conhecido como efeito de borda que, além do campo elétrico, também leva a uma maior intensidade da densidade de corrente nas bordas da malha (HEFNY; DEIN, EL; EL-TAYEB, 2024).

Figura 30: Distribuição de campo elétrico na superfície do solo para a malha 10 m x 10 m considerando as correntes de descarga (a) 10/350  $\mu$ s e (b) 8/20  $\mu$ s.



Fonte: Própria do autor.

Na Figura 31, estão apresentados os resultados de densidade de corrente na extremidade das hastes verticais da Malha A1, em que já é possível perceber que as hastes verticais posicionadas nas quinas (P2) possuem maior densidade de corrente, quando comparadas com as hastes verticais posicionadas nas laterais (P1). Isso quer dizer que, em geral, a Malha A2 deve ter um comportamento mais próximo da Malha A1, pois a maior densidade de corrente da Malha A1 está em hastes verticais que a Malha A2 também possui. O contrário é válido para a Malha A3, que possui hastes verticais posicionadas nos locais onde a Malha A1 tem menor densidade de corrente.

Para elucidar isso, a Figura 32 apresenta as tensões no ponto central das malhas (ponto de injeção da descarga), considerando a referência de potencial nulo no infinito (borda do domínio de simulação). É possível notar que a tensão obtida pela Malha A2 está mais próxima da tensão da Malha A1.

Para encontrar o valor da impedância impulsiva, portanto, basta dividir o pico da tensão do centro da malha (Figura 32) pelo pico da corrente injetada (Figura 16), em cada instante de tempo. As impedâncias impulsivas das malhas estão apresentadas na Tabela 4.

Além disso, com os valores de campo elétrico foi calculada a distribuição de potencial no solo nas duas linhas de integração definidas na Seção 5.5. A Figura 33 apresenta os resultados de distribuição de potencial no solo para as duas linhas de integração definidas no modelo (ver Figura 23). Nota-se mais uma vez que a Malha A2 apresenta comportamento mais próximo ao comportamento da Malha A1. Nos resultados da Figura 33 é possível perceber um decaimento exponencial do potencial elétrico a partir de 5 metros da origem, que é o limite das malhas 10 m x 10 m, semelhante àquele apresentado na Figura 12. Isso significa que, a partir deste ponto, as tensões de passo devem ser mais elevadas.

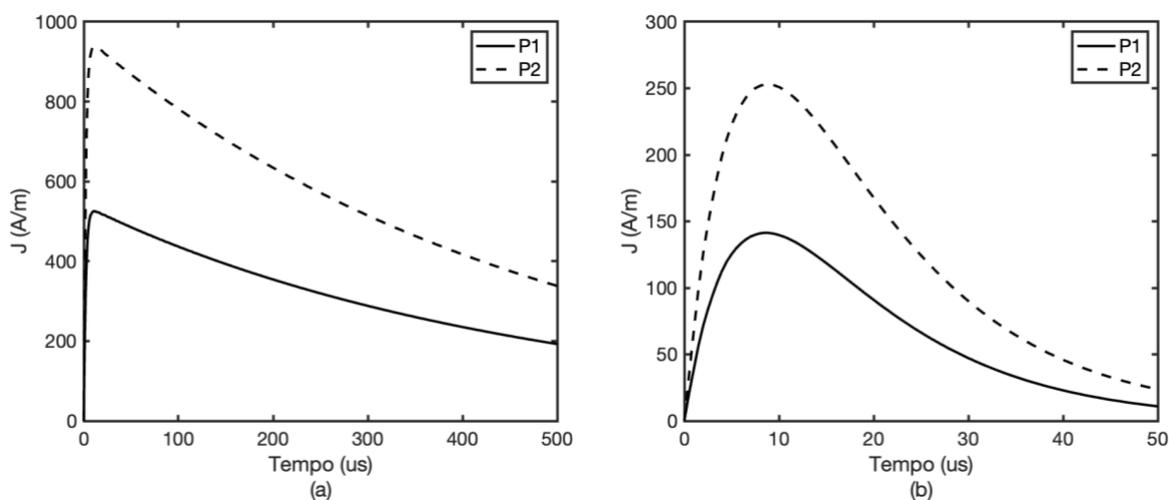
Para avaliação da tensão de passo, foram considerados três elementos de medição de 1 k $\Omega$  (conforme apresentado na Seção 5.4) a uma distância de 5, 10 e 25 metros do centro da malha (origem), e os resultados estão mostrados na Figura 34. Já para a avaliação do efeito de EMI, três circuitos foram posicionados a uma distância de 5, 10 e 25 metros do centro da malha (origem) e os respectivos resultados estão apresentados na Figura 35.

Tabela 4: Impedâncias impulsivas das malhas 10 m x 10 m.

Tipo de descarga	Malha A0	Malha A1	Malha A2	Malha A3
100 kA – 10/350 $\mu$ s	37,90 $\Omega$	33,14 $\Omega$	34,69 $\Omega$	35,65 $\Omega$
25 kA – 8/20 $\mu$ s	37,25 $\Omega$	32,28 $\Omega$	33,73 $\Omega$	35,26 $\Omega$

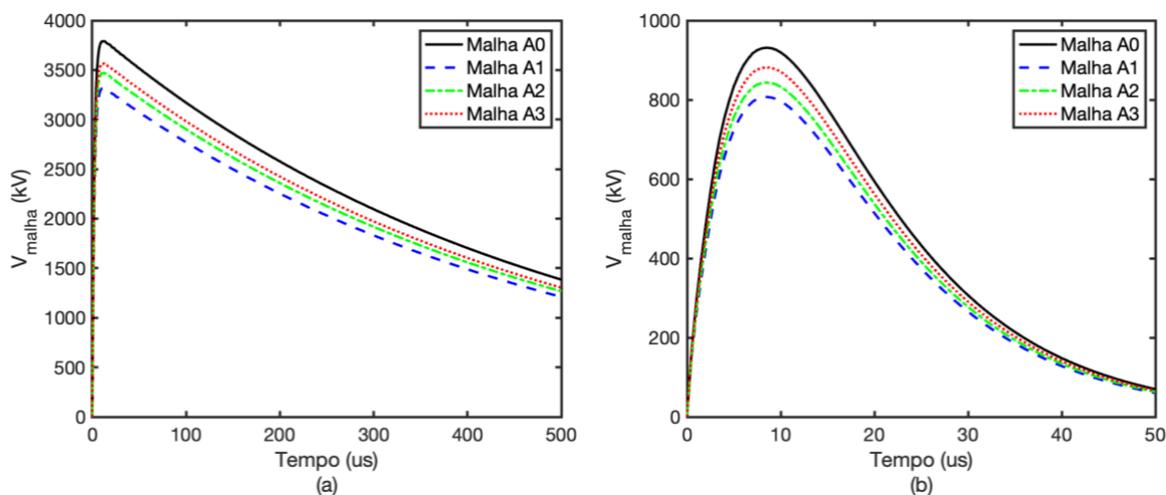
Fonte: Própria do autor.

Figura 31: Densidade de corrente nas hastes P1 e P2 da Malha A1 para as correntes de descarga (a) 10/350  $\mu$ s e (b) 8/20  $\mu$ s.



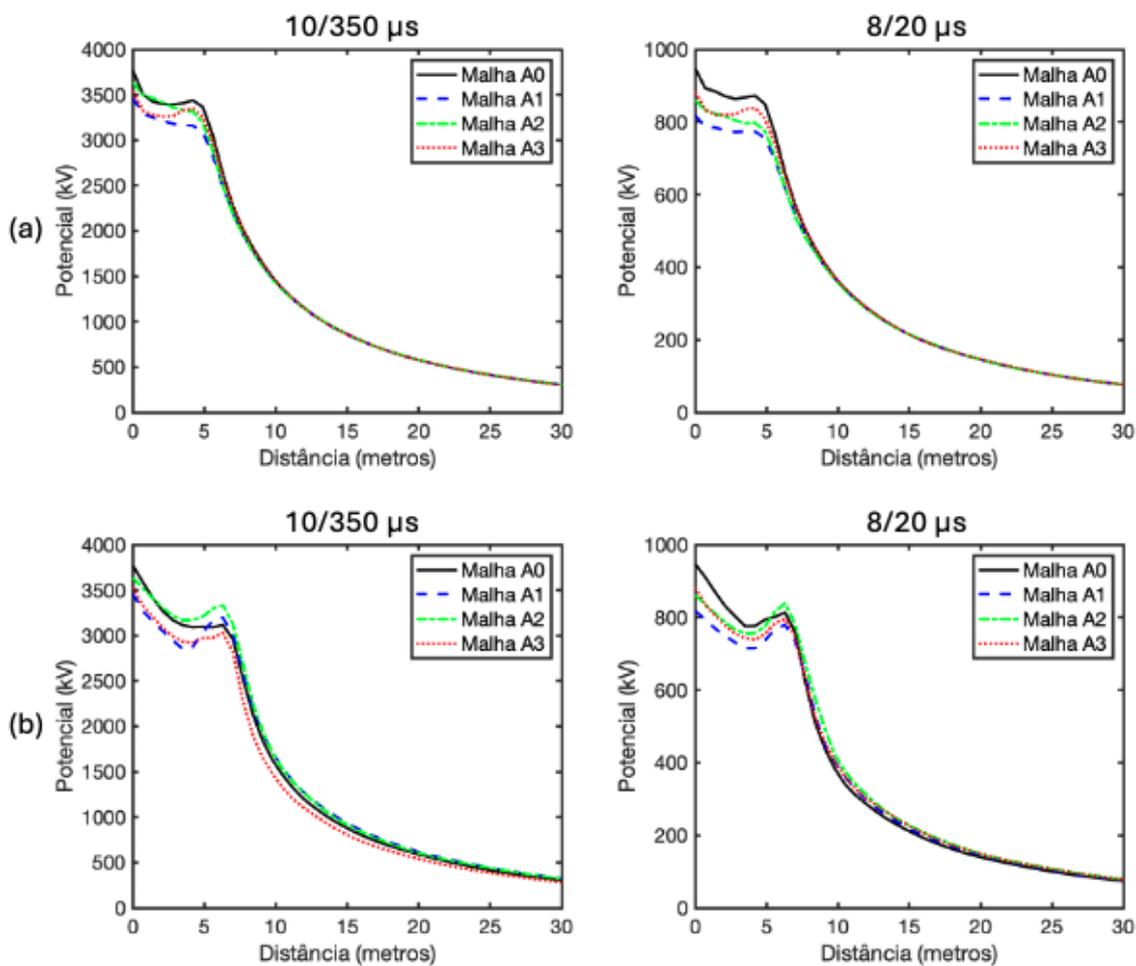
Fonte: Própria do autor.

Figura 32: Tensões apresentadas pelas malhas 10 m x 10 m para as correntes de descarga (a) 10/350  $\mu$ s e (b) 8/20  $\mu$ s.



Fonte: Própria do autor.

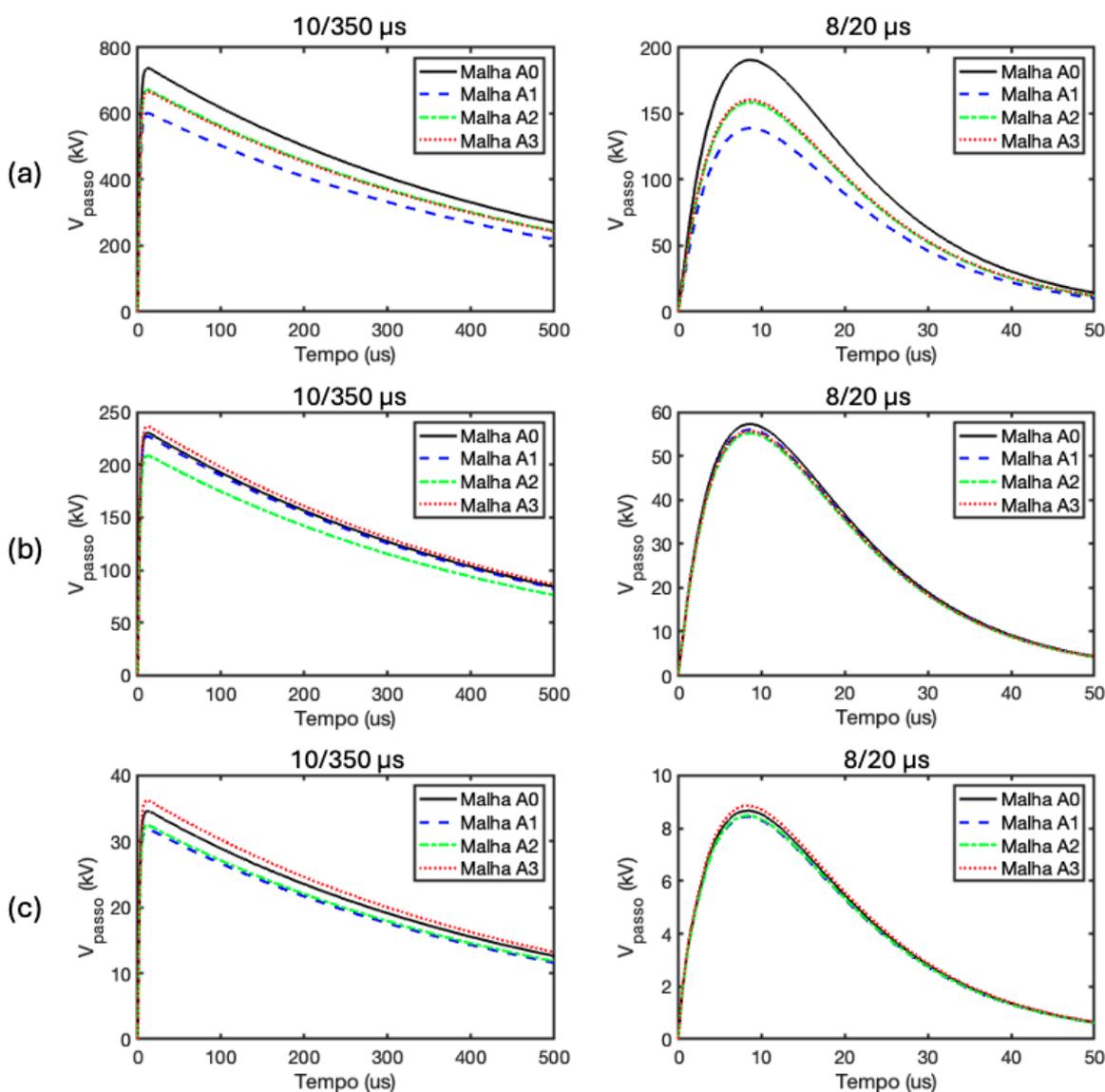
Figura 33: Distribuição de potencial para as malhas 10 m x 10 m considerando as correntes de descarga 10/350 $\mu$ s e 8/20 $\mu$ s e as linhas de integração nas direções (a) lateral e (b) diagonal à malha.



Fonte: Própria do autor.

Nota-se que à determinadas distâncias do cabo de descida, diferentes malhas apresentam o melhor desempenho relacionado à tensão de passo e ao efeito EMI. Para a tensão de passo, por exemplo, a malha com melhor desempenho foi a Malha A1 para um passo a 5 metros do ponto de injeção da descarga. A 10 metros, a malha com melhor desempenho foi a Malha A2. Porém, a malha de menor impedância impulsiva (Malha A1) tende a apresentar menores tensões de passo no geral (VISACRO, Silvério, 2002).

Figura 34: Tensões de passo para as malhas 10 m x 10 m a uma distância de (a) 5, (b) 10 e (c) 25 metros da origem, considerando as descargas 10/350  $\mu$ s e 8/20  $\mu$ s.

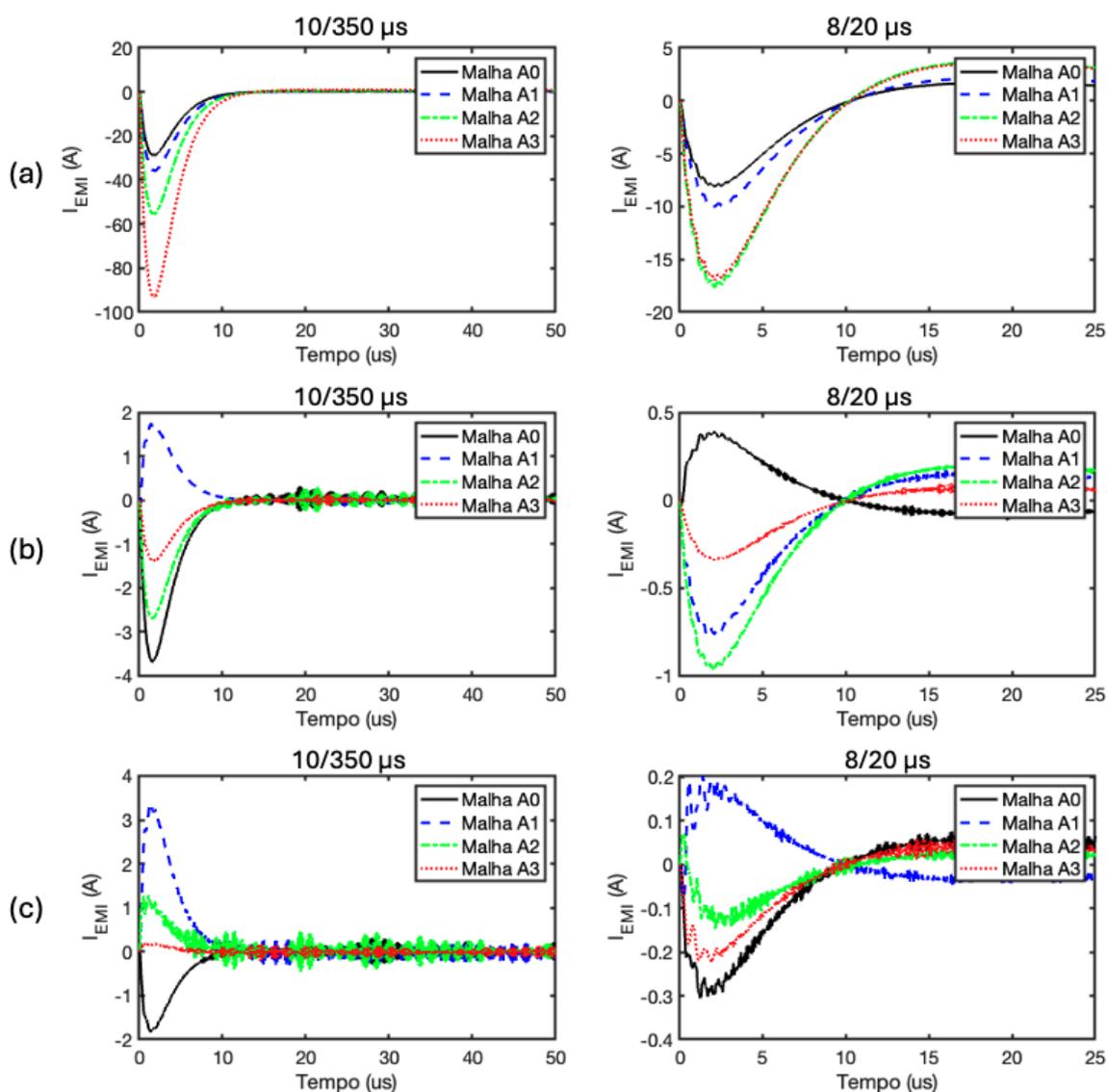


Fonte: Própria do autor.

O efeito de EMI está relacionado com o acoplamento da corrente no cabo de descida com os condutores do circuito. Logo, a corrente que flui através do cabo de

descida possui componentes refletidas pela malha de aterramento. Se a corrente refletida gera uma interferência destrutiva com a corrente incidente, o pico da corrente resultante no cabo de descida é reduzido, gerando menor interferência no circuito. O contrário é verdadeiro para uma interferência construtiva, em que o pico da corrente resultante sendo maior resulta em maior EMI no circuito (POZAR, 2012).

Figura 35: Correntes nos circuitos EMI das malhas 10 m x 10 m posicionados a uma distância de (a) 5, (b) 10 e (c) 25 metros da origem, considerando as descargas 10/350  $\mu$ s e 8/20  $\mu$ s.



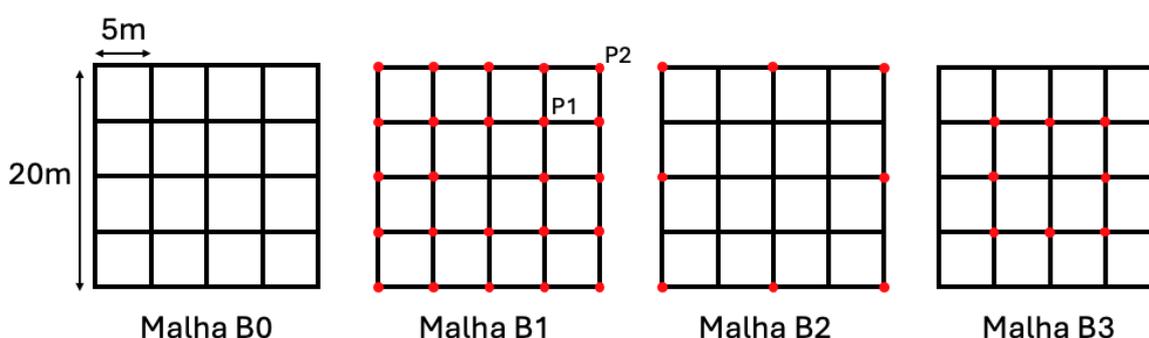
Fonte: Própria do autor.

### 6.2.2 Malha de aterramento 20 m x 20 m

Assim como nos modelos de malha 10 m x 10 m, quatro modelos de malha 20 m x 20 m foram considerados, conforme apresentado na Figura 36, em que os pontos vermelhos indicam as posições de conexão das hastes verticais.

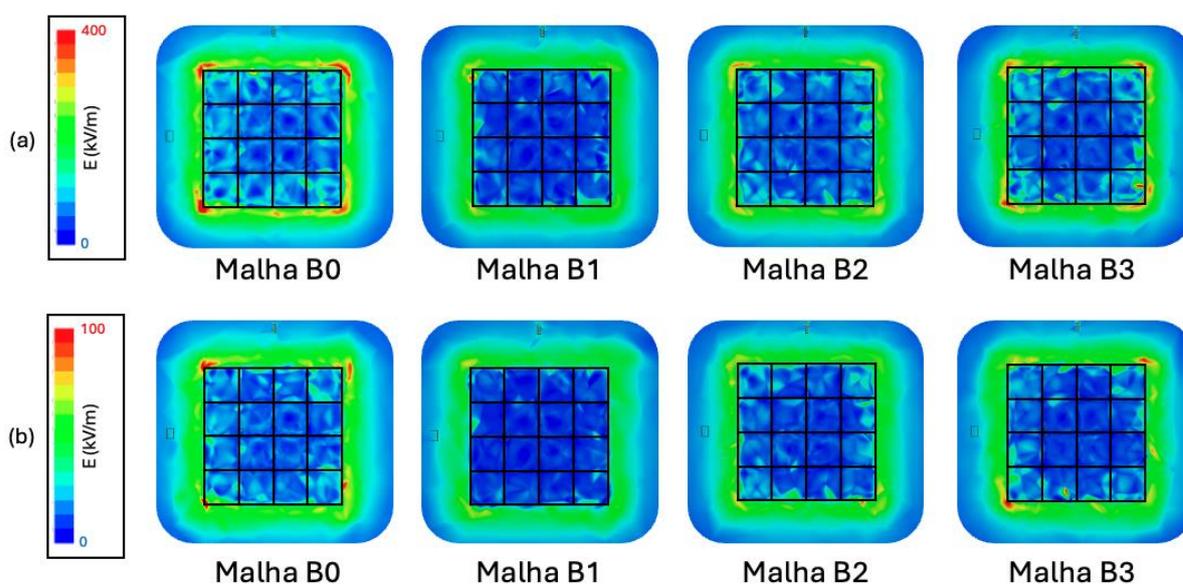
A Figura 37 apresenta os resultados de distribuição de campo elétrico no solo, evidenciando novamente o efeito de borda. A Malha B1 apresentou uma distribuição de campo mais homogênea, tanto para descarga 10/350  $\mu$ s quanto para a 8/20  $\mu$ s.

Figura 36: Geometrias consideradas para a malha de aterramento 20 m x 20 m.



Fonte: Própria do autor.

Figura 37: Distribuição de campo elétrico no solo para a malha 20 m x 20 m considerando as correntes de descarga (a) 10/350  $\mu$ s e (b) 8/20  $\mu$ s.

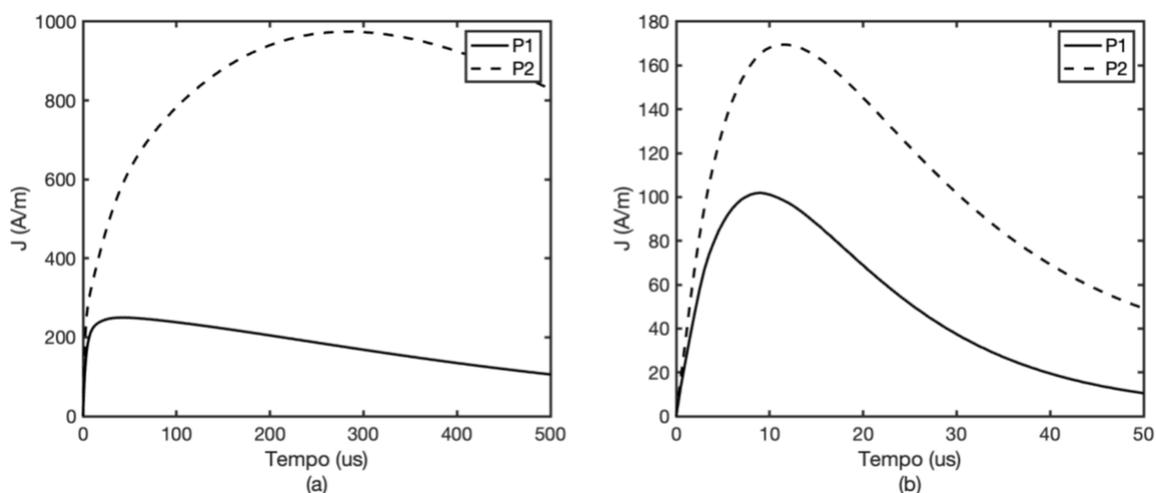


Fonte: Própria do autor.

Na Figura 38 estão apresentados os resultados de densidade de corrente nas hastes verticais P1 e P2 da Malha B1, em que é possível notar uma maior densidade

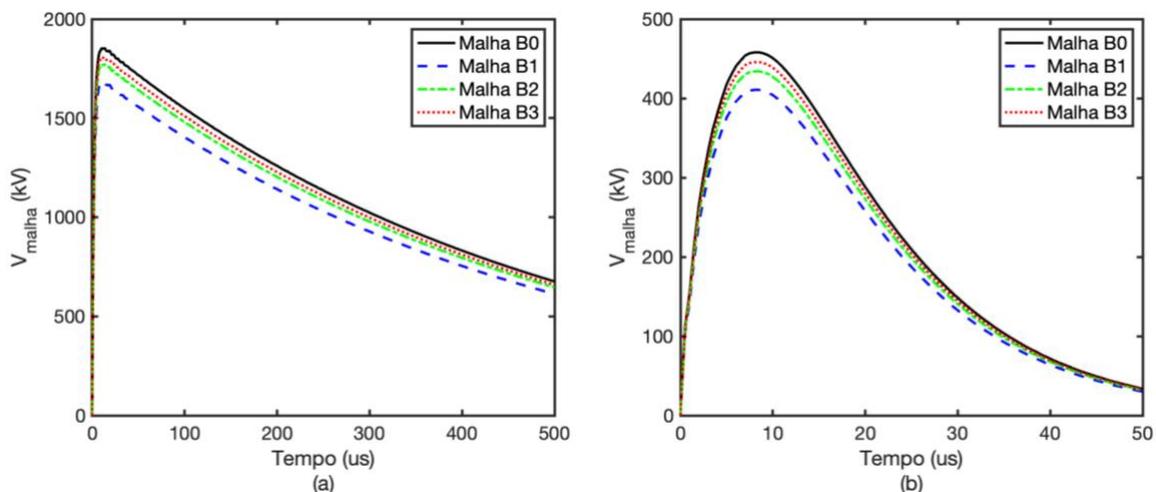
de corrente nas hastes mais distantes do ponto de injeção de corrente. Ou seja, malhas que possuem mais hastes verticais posicionadas nas suas extremidades devem apresentar melhor desempenho no geral, quando comparadas com aquelas que possuem mais hastes fora da extremidade. Para elucidar isso, a Figura 39 apresenta as tensões no ponto central das malhas (ponto de injeção da corrente), considerando a referência de potencial nulo no infinito (borda do domínio de simulação). Nota-se que a tensão obtida pela Malha B2 (que possui hastes verticais posicionadas nas extremidades) é menor que a tensão da Malha B3 (que possui hastes verticais posicionadas fora da extremidade), o que também é verdadeiro para a impedância impulsiva, e cujos resultados estão presentes na Tabela 5.

Figura 38: Densidade de corrente nas hastes P1 e P2 da Malha B1 para as correntes de descarga (a) 10/350  $\mu\text{s}$  e (b) 8/20  $\mu\text{s}$ .



Fonte: Própria do autor.

Figura 39: Tensões apresentadas pelas malhas 20 m x 20 m para as correntes de descarga (a) 10/350  $\mu\text{s}$  e (b) 8/20  $\mu\text{s}$ .



Fonte: Própria do autor.

Tabela 5: Impedâncias impulsivas das malhas 20 m x 20 m.

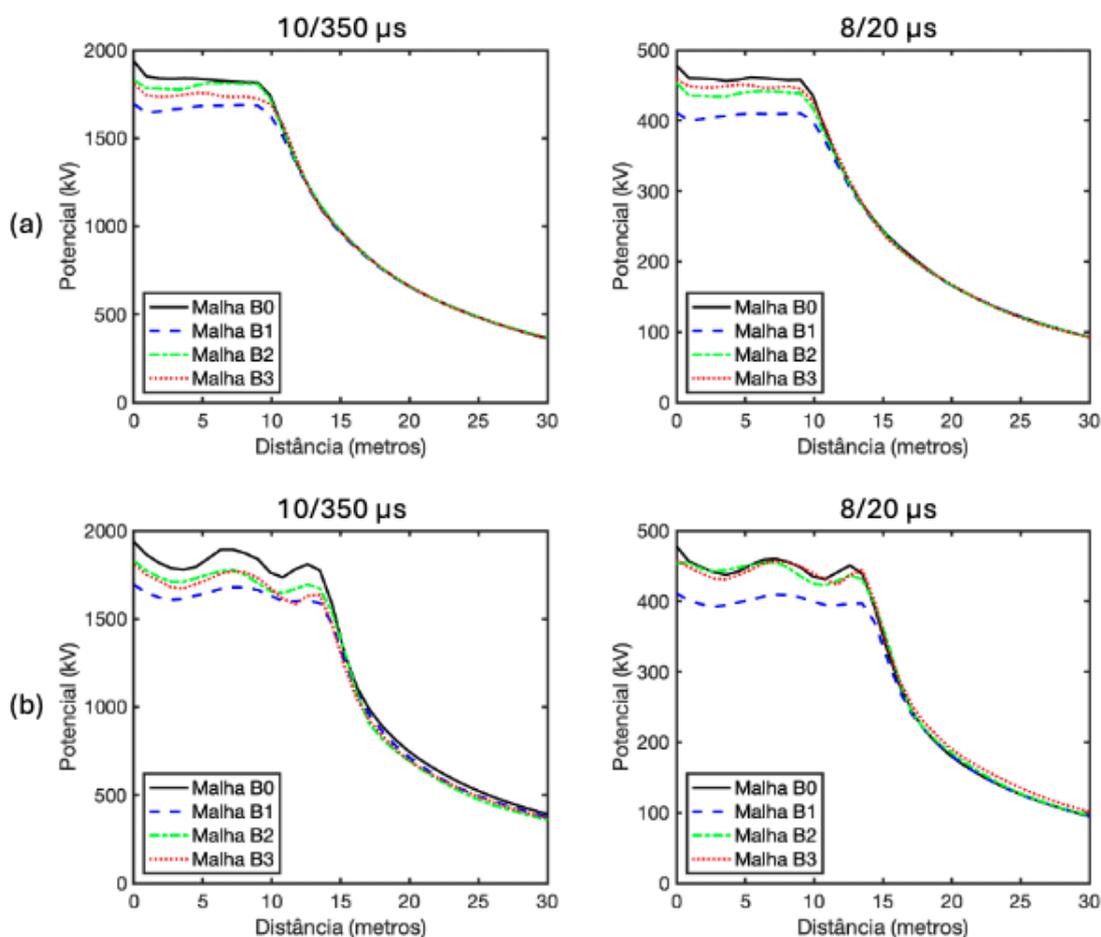
Tipo de descarga	Malha B0	Malha B1	Malha B2	Malha B3
100 kA – 10/350 $\mu$ s	18,53 $\Omega$	16,80 $\Omega$	17,71 $\Omega$	18,07 $\Omega$
25 kA – 8/20 $\mu$ s	18,31 $\Omega$	16,42 $\Omega$	17,35 $\Omega$	17,82 $\Omega$

Fonte: Própria do autor.

Com os valores de campo elétrico, foi calculada a distribuição de potencial no solo em uma das linhas de integração definidas na Seção 5.5. A Figura 40 apresenta os resultados de distribuição de potencial no solo para as duas linhas de integração definidas no modelo. Para a Malha B1, é possível notar menores níveis de potencial e uma menor variação no potencial com a distância, indicando uma distribuição de potencial mais homogênea, que está relacionada com a distribuição de campo elétrico também mais homogênea dessa malha com relação as demais.

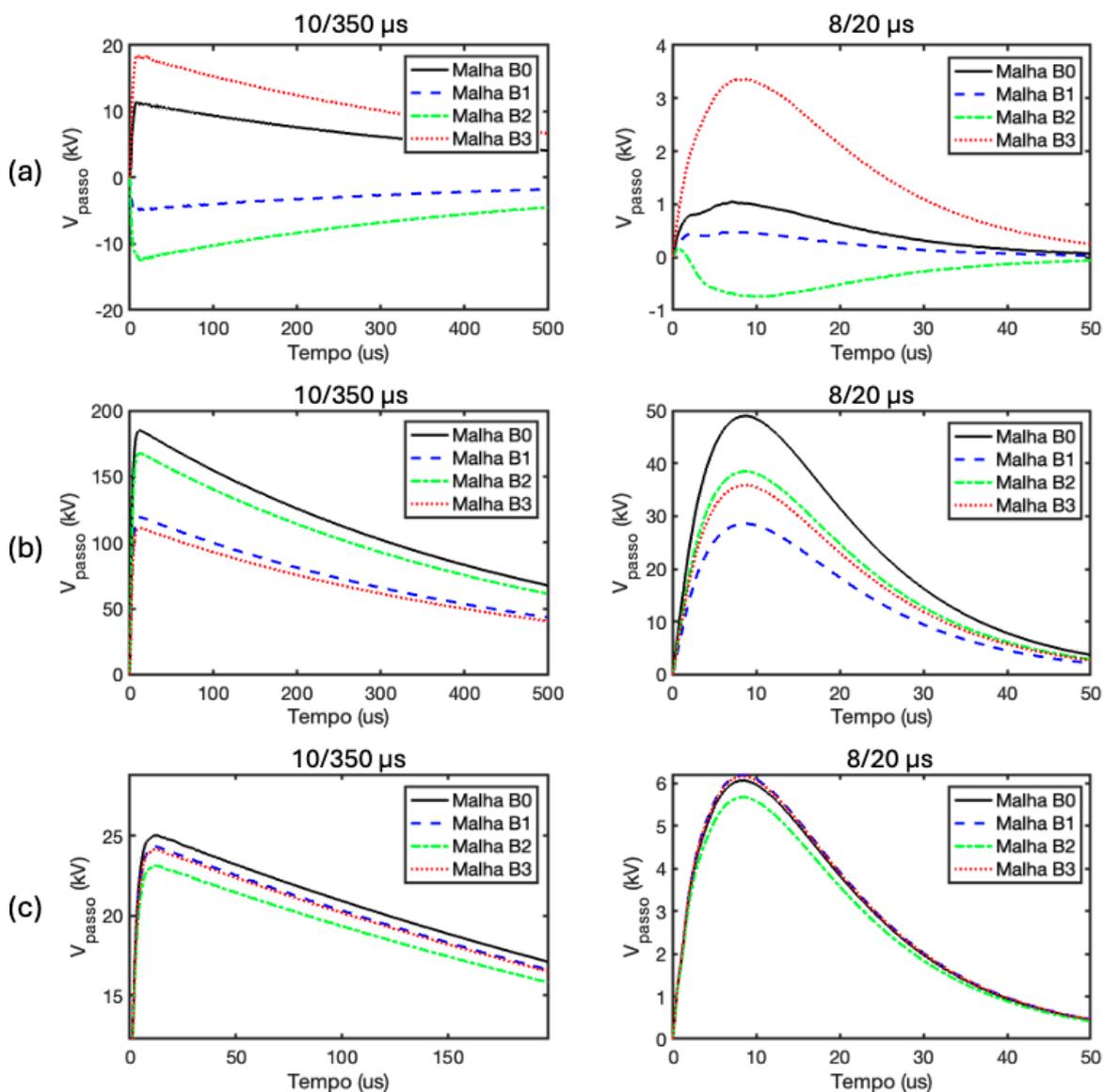
A Figura 41 e a Figura 42 apresentam os resultados relativos às tensões de passo e efeito de EMI obtidos, respectivamente.

Figura 40: Distribuição de potencial para as malhas 20 m x 20 m considerando as correntes de descarga 10/350 $\mu$ s e 8/20 $\mu$ s e as linhas de integração nas direções (a) lateral e (b) diagonal à malha.



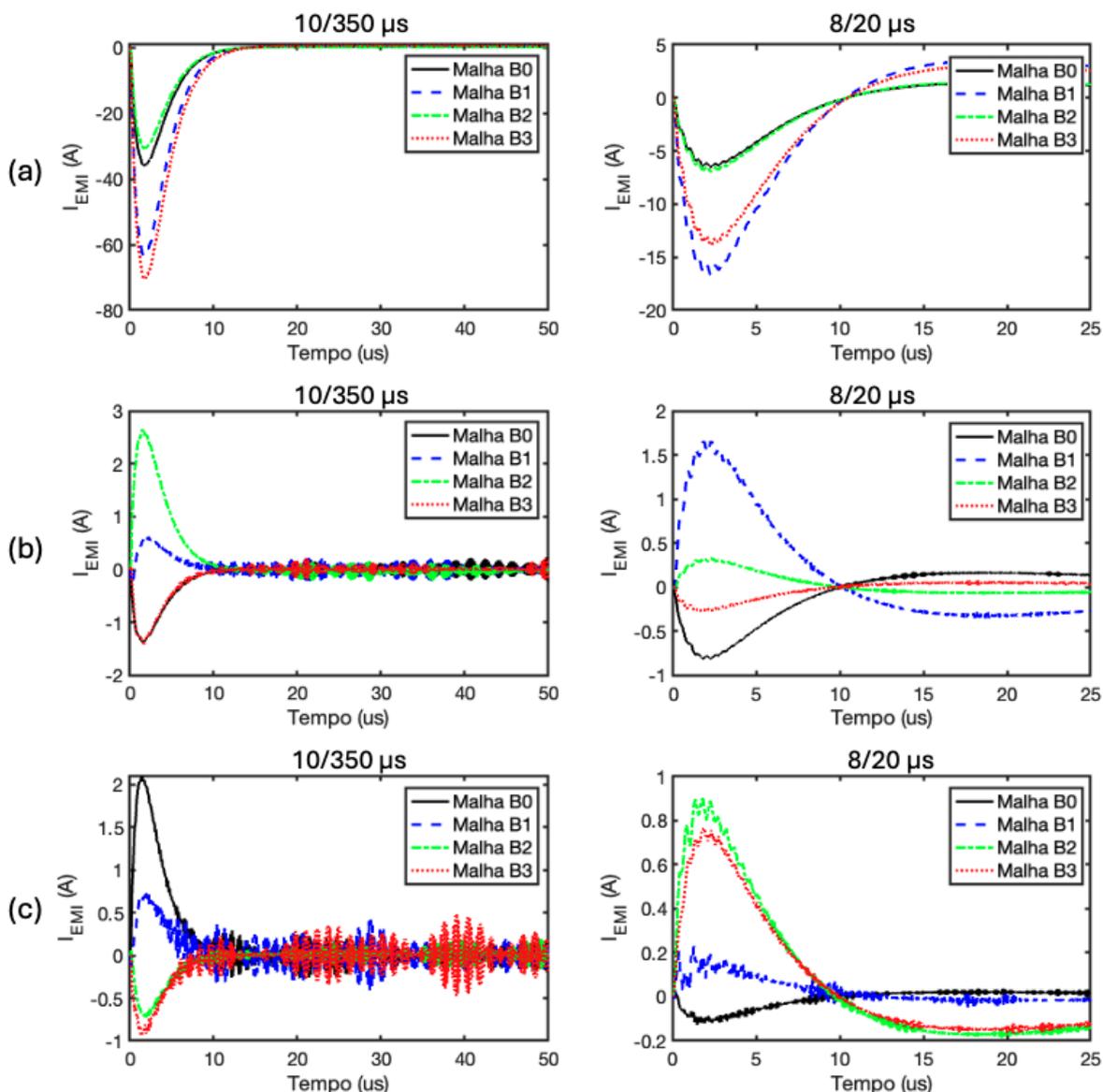
Fonte: Própria do autor.

Figura 41: Tensões de passo para as malhas 20 m x 20 m a uma distância de (a) 5, (b) 10 e (c) 25 metros da origem, considerando as descargas 10/350  $\mu$ s e 8/20  $\mu$ s.



Fonte: Própria do autor.

Figura 42: Correntes nos circuitos EMI das malhas 20 m x 20 m posicionados a uma distância de (a) 5, (b) 10 e (c) 25 metros da origem, considerando as descargas 10/350  $\mu$ s e 8/20  $\mu$ s.



Fonte: Própria do autor.

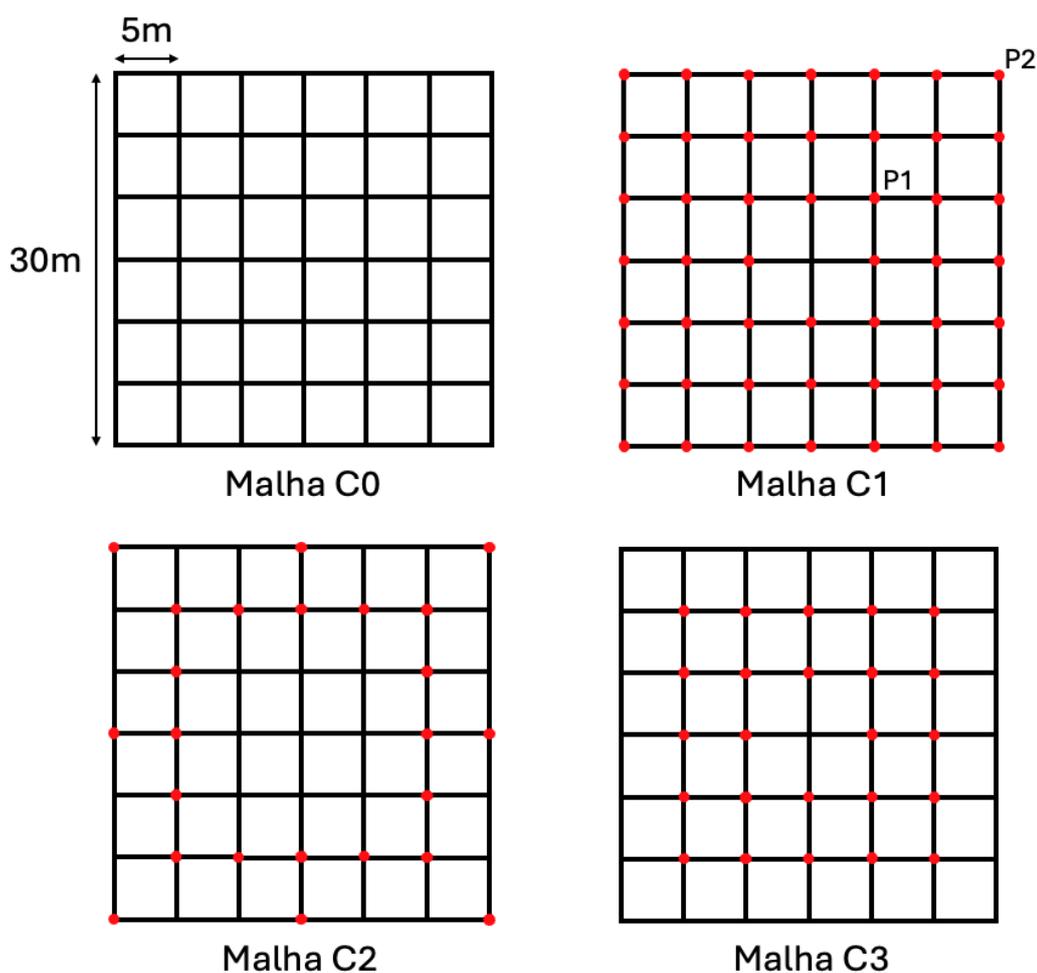
As malhas 20 m x 20 m, no geral, apresentaram melhor desempenho em relação às malhas 10 m x 10 m. A distribuição mais homogênea de campo elétrico levou a uma distribuição também mais homogênea do potencial elétrico na superfície do solo, resultando em menores impedâncias impulsivas e menores tensões de passo.

Além disso, foi notada uma menor corrente de interferência nos circuitos próximos para as malhas 20 m x 20 m, indicando que as malhas 20 m x 20 m apresentaram maiores interferências destrutivas (ou menores interferências construtivas) entre a corrente de descarga incidente e a corrente refletida.

### 6.2.3 Malha de aterramento 30 m x 30 m

Assim como nos modelos de malha 10 m x 10 m e 20 m x 20 m, quatro modelos de malha 30 m x 30 m foram considerados, conforme apresentado na Figura 43, em que os pontos vermelhos indicam as posições de conexão das hastes verticais.

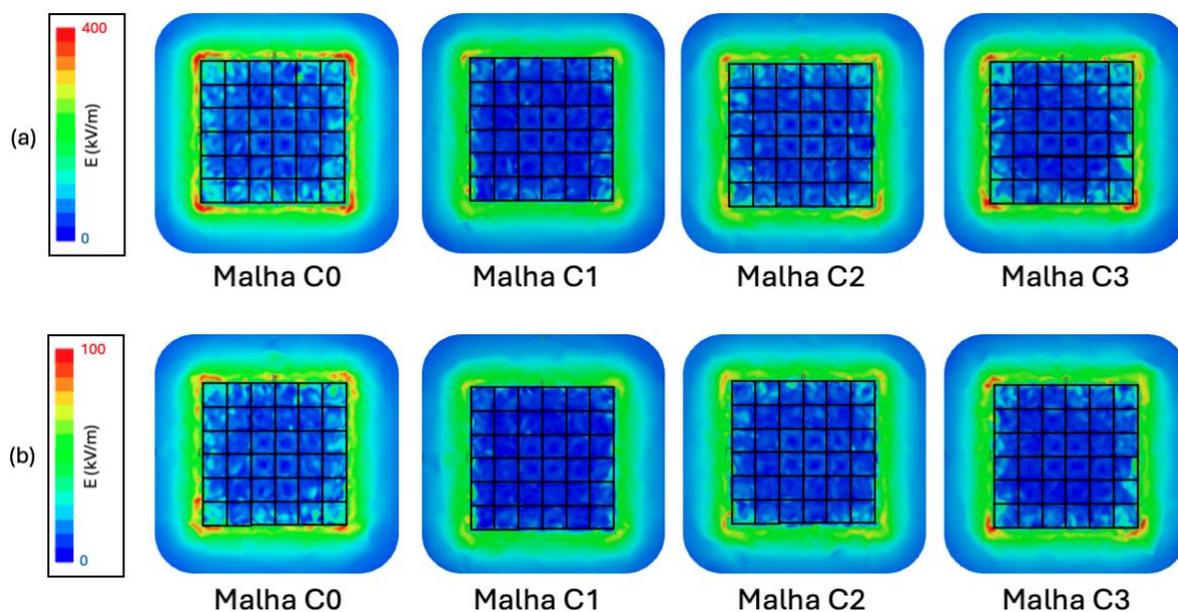
Figura 43: Geometrias consideradas para a malha de aterramento 30 m x 30 m.



Fonte: Própria do autor.

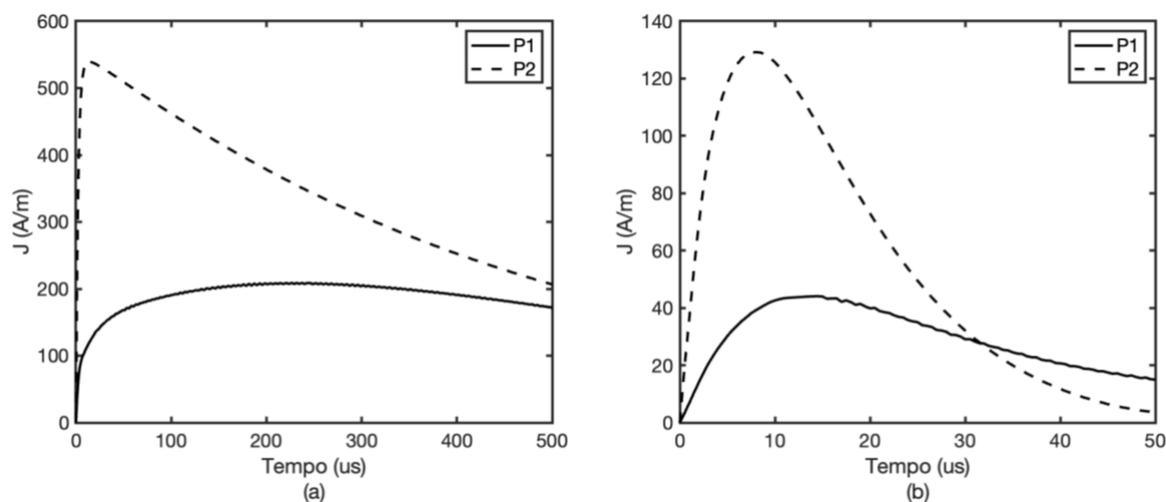
A Figura 44 apresenta os resultados de distribuição de campo elétrico no solo, enquanto a Figura 45 apresenta os resultados de densidade de corrente nas extremidades das hastes verticais P1 e P2, para a Malha C1. Aqui, novamente é notado o efeito de borda das malhas e uma maior densidade de corrente nas hastes verticais que estão posicionadas nas extremidades da malha.

Figura 44: Distribuição de campo elétrico no solo para a malha 30 m x 30 m considerando as correntes de descarga (a) 10/350  $\mu\text{s}$  e (b) 8/20  $\mu\text{s}$ .



Fonte: Própria do autor.

Figura 45: Densidade de corrente nas hastes P1 e P2 da Malha C1 para as correntes de descarga (a) 10/350  $\mu\text{s}$  e (b) 8/20  $\mu\text{s}$ .



Fonte: Própria do autor.

Na Figura 46, estão apresentadas as tensões no ponto central das malhas (ponto de injeção da descarga), considerando a referência de potencial zero no infinito (borda do domínio de simulação), levando aos resultados de impedância impulsiva da Tabela 6. Já a Figura 47 mostra os resultados de distribuição de potencial elétrico no solo. Conforme esperado, a Malha C2 apresentou melhor

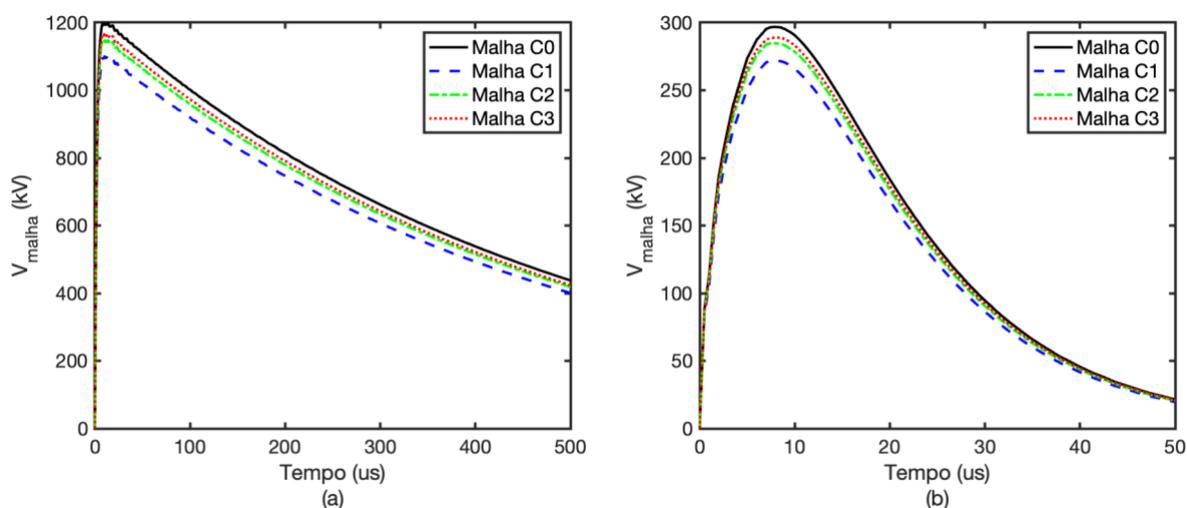
desempenho com relação à Malha C3, tanto em termos de impedância impulsiva como em termos de potencial.

Ainda, a Malha C1 apresentou uma menor e mais homogênea distribuição de potencial com relação às demais malhas, corroborando com os resultados da sua distribuição de campo elétrico (Figura 44) e com os resultados das Malhas 10 m x 10 m e 20 m x 20 m, em que as malhas com mais hastes verticais apresentaram melhor desempenho (A1 e B1) no geral.

A Figura 48 e a Figura 49 apresentam os resultados relativos às tensões de passo e efeito de EMI obtidos, respectivamente, em que é possível notar que as Malhas 30 m x 30 foram capazes de reduzir ainda mais a tensão de passo, mas não necessariamente reduzir o efeito de EMI nos circuitos próximos, quando comparadas com as malhas 10 m x 10 m e 20 m x 20 m.

O resultado para a tensão de passo era esperado, visto que distribuições mais homogêneas de potencial tendem a reduzir as tensões de passo nas proximidades da descarga. O resultado para o efeito de EMI pode parecer contraintuitivo, já que algumas correntes detectadas nos circuitos chegam a ser maiores para as malhas 30 m x 30 m do que para as malhas 10 m x 10 m ou 20 m x 20 m. Mas isso é justificado, pois não necessariamente uma menor impedância significa uma menor interferência construtiva (ou maior interferência destrutiva) entre as correntes incidente e refletida.

Figura 46: Tensões apresentadas pelas malhas 30 m x 30 m para as correntes de descarga (a) 10/350  $\mu$ s e (b) 8/20  $\mu$ s.

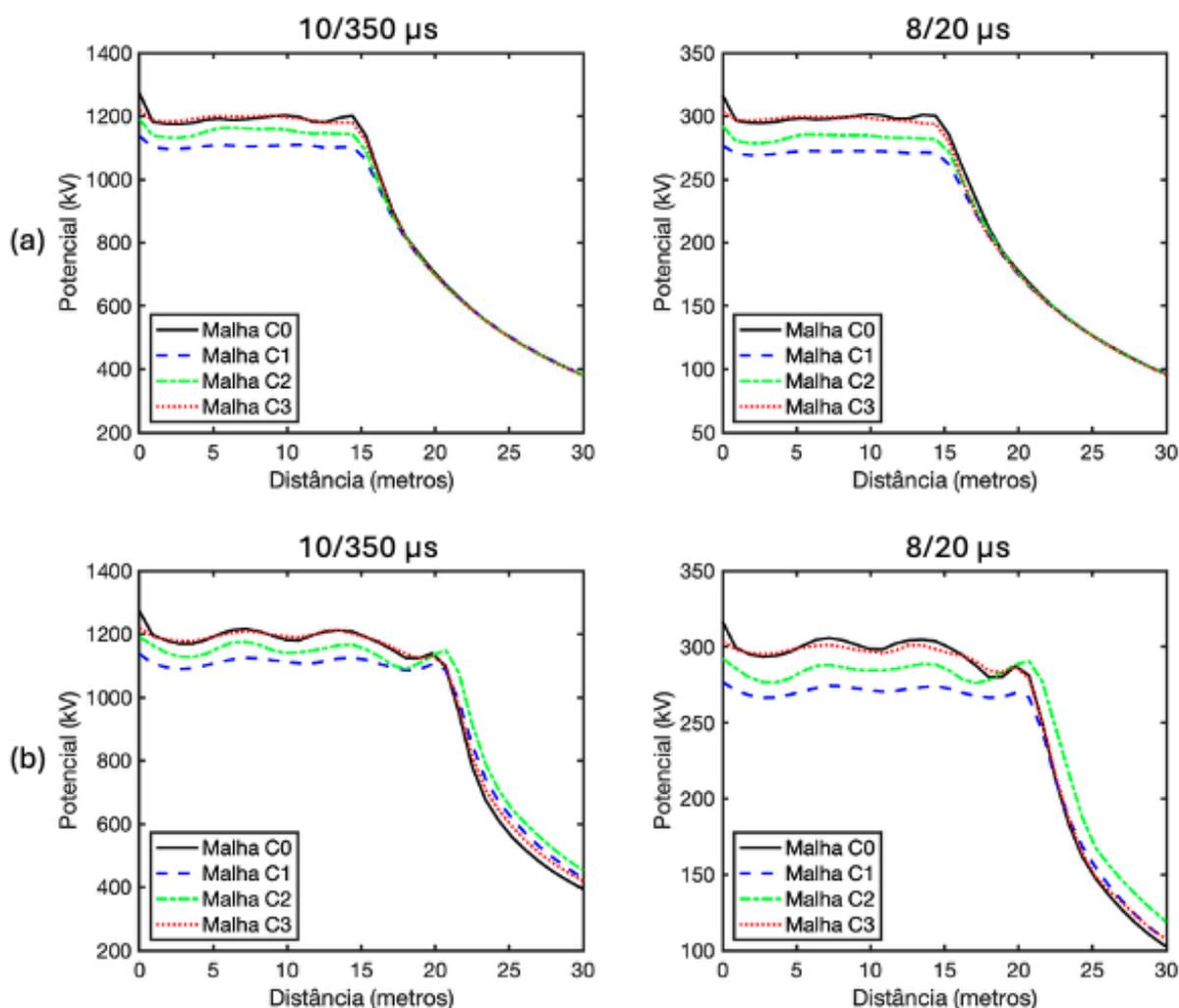


Fonte: Própria do autor.

Tabela 6: Impedâncias impulsivas das malhas 30 m x 30 m.

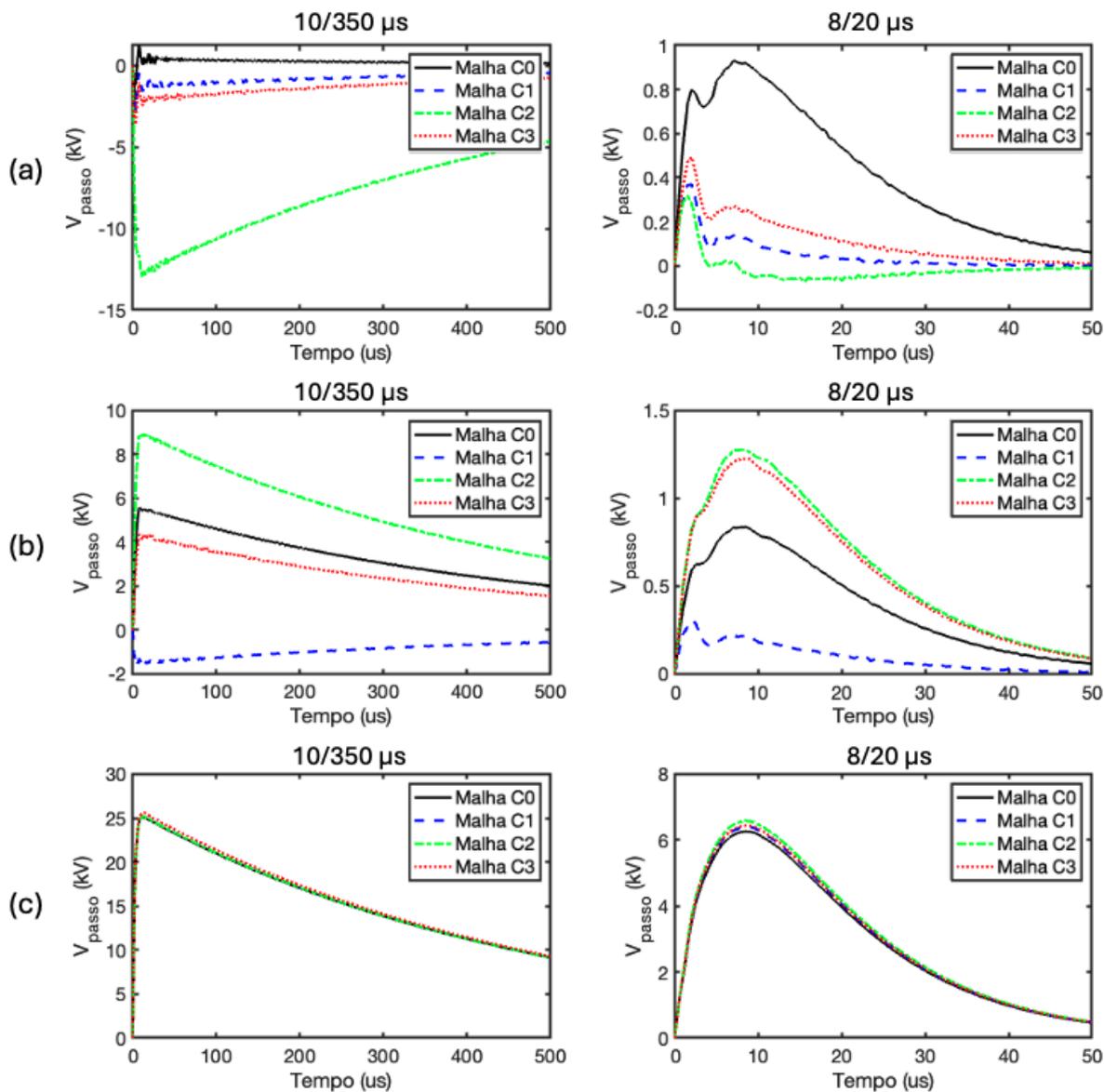
Tipo de descarga	Malha C0	Malha C1	Malha C2	Malha C3
100kA – 10/350 $\mu$ s	11,98 $\Omega$	11,00 $\Omega$	11,48 $\Omega$	11,66 $\Omega$
25 kA – 8/20 $\mu$ s	11,87 $\Omega$	10,87 $\Omega$	11,39 $\Omega$	11,55 $\Omega$

Fonte: Própria do autor.

Figura 47: Distribuição de potencial para as malhas 30 m x 30 m considerando as correntes de descarga 10/350 $\mu$ s e 8/20 $\mu$ s e as linhas de integração nas direções (a) lateral e (b) diagonal à malha.

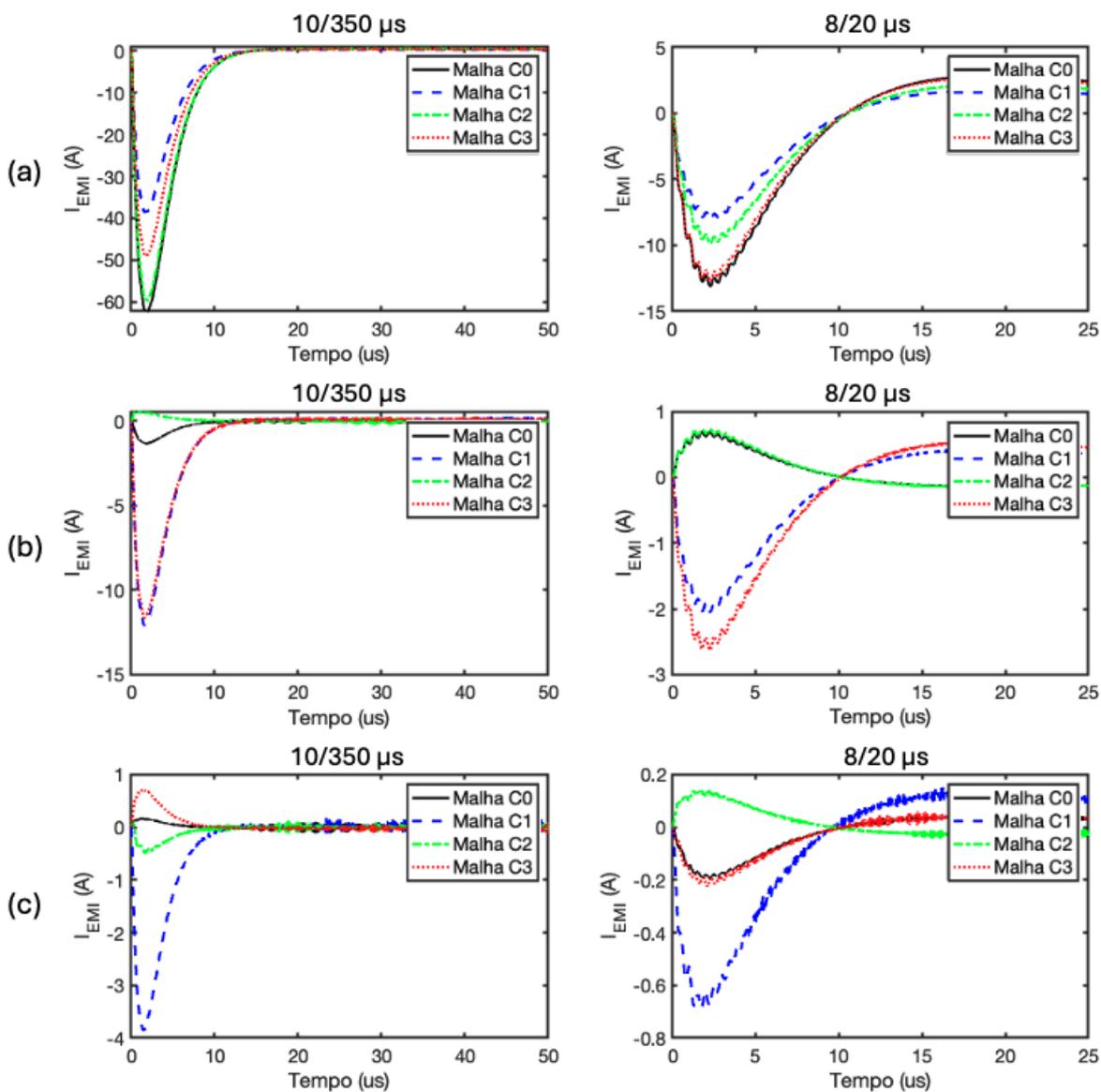
Fonte: Própria do autor.

Figura 48: Tensões de passo para as malhas 30 m x 30 m a uma distância de (a) 5, (b) 10 e (c) 25 metros da origem, considerando as descargas 10/350  $\mu$ s e 8/20  $\mu$ s.



Fonte: Própria do autor.

Figura 49: Correntes nos circuitos EMI das malhas 30 m x 30 m posicionados a uma distância de (a) 5, (b) 10 e (c) 25 metros da origem, considerando as descargas 10/350  $\mu$ s e 8/20  $\mu$ s.



Fonte: Própria do autor.

#### 6.2.4 Análise comparativa dos resultados entre as malhas.

Nas Tabela 7 e Tabela 8 estão apresentados todos os resultados dos parâmetros: impedância impulsiva ( $Z_{IMPULSO}$ ), pico de tensão de passo ( $V_{PASSO}$ ) e pico de corrente de EMI ( $I_{EMI}$ ) deste capítulo, para as respectivas formas de onda 10/350  $\mu$ s e 8/20  $\mu$ s.

Tabela 7: Resultados para todas as malhas de aterramento simuladas @ 10/350  $\mu$ s e 100 kA de pico.

	Malha	$Z_{IMPULSO}$ ( $\Omega$ )	$V_{PASSO}$ 5 m (kV)	$V_{PASSO}$ 10 m (kV)	$V_{PASSO}$ 25 m (kV)	$I_{EMI}$ 5 m (A)	$I_{EMI}$ 10 m (A)	$I_{EMI}$ 25 m (A)
Malhas 10 m x 10 m	A0	37,90	720,0	231,9	34,2	-28,4	-3,8	-1,9
	A1	33,14	602,7	229,9	32,1	-38,8	1,9	3,2
	A2	34,69	690,1	210,4	32,7	-59,2	-2,8	1,2
	A3	35,65	691,3	233,1	35,6	-95,2	-1,4	0,2
Malhas 20 m x 20 m	B0	18,53	10,9	180,8	25,0	-34,6	-1,3	2,1
	B1	16,80	-5,0	115,4	24,7	-62,3	0,5	0,7
	B2	17,71	-12,3	160,7	23,0	-30,5	2,6	-0,8
	B3	18,07	19,8	110,0	24,1	-70,2	-1,3	-0,9
Malhas 30 m x 30 m	C0	11,98	1,8	5,9	25,7	-61,0	-1,8	0,1
	C1	11,00	-1,9	-1,8	25,5	-39,6	-12,4	-3,9
	C2	11,48	-12,5	8,8	26,2	-60,0	0,5	-0,5
	C3	11,66	-2,5	4,2	26,5	-49,5	-12,1	0,5

Fonte: Própria do autor.

Tabela 8: Resultados para todas as malhas de aterramento simuladas @ 8/20  $\mu$ s e 25 kA de pico.

	Malha	Z <sub>IMPULSO</sub> ( $\Omega$ )	V <sub>PASSO</sub> 5 m (kV)	V <sub>PASSO</sub> 10 m (kV)	V <sub>PASSO</sub> 25 m (kV)	I <sub>EMI</sub> 5 m (A)	I <sub>EMI</sub> 10 m (A)	I <sub>EMI</sub> 25 m (A)
Malhas 10 m x 10 m	A0	37,25	190,3	58,0	8,7	-7,5	0,3	-0,3
	A1	32,28	145,4	57,5	8,3	-10,0	-0,8	0,2
	A2	33,73	156,1	56,7	8,4	-18,1	-1,0	-0,1
	A3	35,26	156,8	56,9	9,0	-17,8	-0,3	-0,2
Malhas 20 m x 20 m	B0	18,31	1,1	49,2	5,8	-6,2	-0,8	-0,1
	B1	16,42	0,4	37,0	6,0	-15,4	1,7	0,2
	B2	17,35	-0,9	39,5	5,5	-6,2	0,3	0,9
	B3	17,82	3,5	28,9	5,9	-13,8	-0,3	0,7
Malhas 30 m x 30 m	C0	11,87	0,9	0,9	6,0	-14,0	0,5	-0,2
	C1	10,87	0,4	0,3	6,1	-7,9	-2,0	-0,7
	C2	11,39	0,3	1,3	6,3	-9,8	0,5	0,15
	C3	11,55	0,5	1,2	6,2	-14,0	-2,6	-0,2

Fonte: Própria do autor.

A análise dos resultados demonstra que a impedância impulsiva nas malhas de aterramento apresenta uma leve diferença entre os tipos de descargas atmosféricas aplicadas. A descarga atmosférica 8/20  $\mu$ s resulta em uma impedância impulsiva aproximadamente 2% menor do que a obtida com a descarga 10/350  $\mu$ s, devido à menor impulsividade desta última. Essa diferença, entretanto, não é tão significativa, dada a proximidade dos tempos de frente de onda (WENRONG *et al.*, 2015).

Ao comparar os tamanhos das malhas, observa-se uma clara tendência de redução da impedância impulsiva com o aumento da área. A malha de maior dimensão, C0 (30x30 m), apresentou uma impedância até 68% menor em relação à malha A0 (10x10 m) e 35% menor quando comparada à malha B0 (20x20 m). A redução na malha B0 em relação à A0 foi de 51%, indicando que o aumento do tamanho da malha tem um efeito decrescente na diminuição da impedância impulsiva, ou seja, a efetividade do aumento de área diminui conforme o tamanho da malha se expande (VISACRO, Silverio *et al.*, 2015).

A quantidade de hastes verticais conectadas à malha também influencia a impedância impulsiva. Para malhas de mesmo tamanho, a maior redução percentual relacionada à quantidade de hastes foi de 13,3%, verificada entre as Malhas A1 e A0 sob a corrente de descarga de 8/20  $\mu$ s. Foi observado que, quanto maior a malha de aterramento, menor a efetividade da adição de mais hastes, o que provavelmente está relacionado ao comprimento efetivo dos eletrodos e/ou ao raio efetivo da malha.

Além disso, considerando malhas com a mesma quantidade de hastes, aquelas em que as hastes estão posicionadas mais longe do ponto de injeção da descarga apresentam menores valores de impedância impulsiva. Por exemplo, a malha A2 possui uma impedância impulsiva menor do que a malha A3, o mesmo ocorrendo com as malhas B2 e C2 em relação às suas correspondentes B3 e C3. Esse comportamento se deve à maior densidade de corrente nas hastes mais afastadas (HEFNY; DEIN, EL; EL-TAYEB, 2024).

Os resultados também evidenciam que a malha de aterramento consegue reduzir a tensão de passo dentro de sua área. No entanto, quando submetida a uma descarga atmosférica, a malha não pode ser considerada um sistema equipotencial, pois a distribuição de potencial se apresenta irregular, conforme ilustrado nas Figura 33, Figura 40 e Figura 47. No limite da área da malha, o potencial decresce exponencialmente, levando a tensões de passo maiores (VISACRO *et al.*, 2015).

Em relação aos efeitos de interferência eletromagnética (EMI), as malhas maiores, de 30x30 m, apresentaram correntes de interferência menores nos circuitos próximos, especialmente sob a corrente de descarga de 8/20  $\mu$ s. Contudo, foram identificados modelos de malhas 20x20 m e 10x10 m com interferências EMI mais baixas que algumas malhas 30x30 m, o que sugere que a avaliação dos efeitos de EMI deve ser conduzida caso a caso. No entanto, fica claro que a geometria da malha exerce influência significativa sobre os efeitos de EMI.

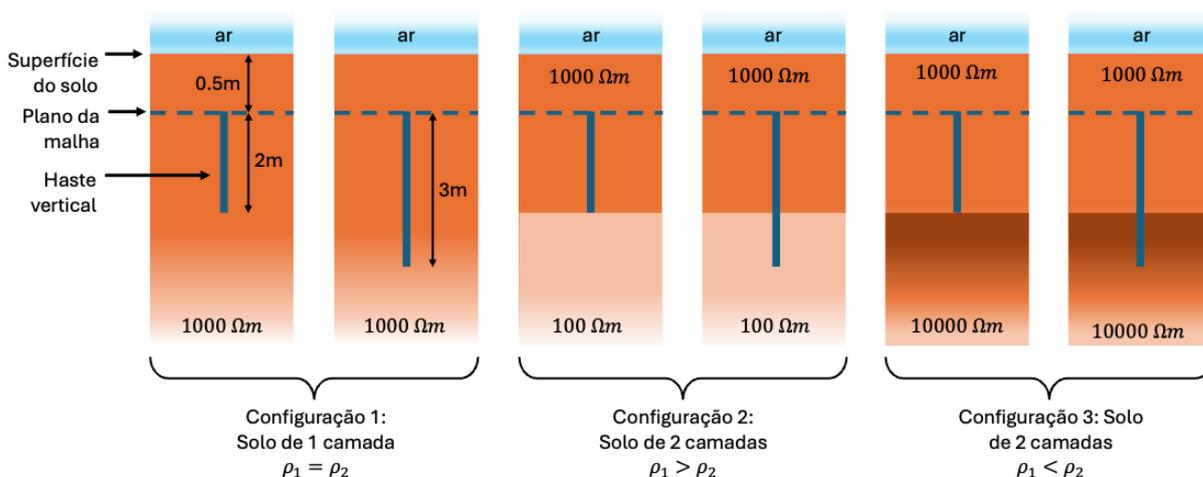
### 6.3 Sistema de Aterramento em Solo de Dupla Camada

Em sistemas de aterramento, a escolha da configuração e da profundidade das hastes verticais é influenciada pelas características do solo, sendo especialmente importante em solos de dupla camada. Em ambientes onde o solo é composto por diferentes camadas de resistividade – por exemplo, uma primeira camada de argila e uma segunda camada de areia –, o comportamento do sistema de aterramento pode variar consideravelmente. Uma questão que pode surgir em tais cenários é a viabilidade da utilização de hastes de verticais mais profundas, que atravessam a primeira camada para alcançar a segunda, especialmente quando esta possui resistividade diferente da camada inicial.

No caso de solos em que a segunda camada apresenta uma resistividade mais elevada do que a primeira, a eficiência do sistema de aterramento tende a ser limitada, uma vez que a corrente encontra mais resistência ao penetrar essa camada inferior. Nesses casos, o uso de hastes emendadas pode não trazer os resultados desejados e, do ponto de vista econômico, pode até não ser viável, a menos que fatores como saturação de água na segunda camada favoreçam a condução. Por outro lado, em solos onde a segunda camada apresenta resistividade menor, o sistema de aterramento se beneficia de uma melhor condução e redução da resistência, o que reforça a eficiência do aterramento ao possibilitar uma dissipação mais eficaz de correntes de surto (VISACRO, Silvério, 2005).

Para elucidar essa situação, foram realizadas simulações com a Malha A2, variando o comprimento de suas hastes verticais em solos de dupla camada, conforme as configurações apresentadas no diagrama esquemático da Figura 50. Para essas simulações, apenas a descarga atmosférica de 10/350  $\mu$ s foi utilizada. Na configuração 1, um solo homogêneo é utilizado, como nas simulações anteriores. A configuração 2 representa um solo de dupla camada, em que a camada inferior possui menor resistividade (100  $\Omega$ .m) que a camada superior (1000  $\Omega$ .m). Já a configuração 3 representa um solo de dupla camada, em que a camada inferior possui resistividade maior (10000  $\Omega$ .m) que a camada superior (1000  $\Omega$ .m). Em todas as configurações, hastes verticais de 2 e 3 metros foram utilizadas para a Malha A2.

Figura 50: Configurações para análise das hastes verticais da Malha A2 em solo de dupla camada.



Fonte: Própria do autor.

Na Tabela 9 estão apresentados os resultados para cada configuração em termos de impedância impulsiva. Na configuração 1 (solo de camada única), a impedância impulsiva apresentou uma redução de 5,88% ao se aumentar o comprimento das hastes de 2m para 3m, demonstrando uma melhora moderada na eficiência. Na configuração 2 ( $\rho_1 > \rho_2$ ), a redução na impedância impulsiva foi de 30,19% com o aumento do comprimento das hastes, indicando uma significativa melhora na eficiência de aterramento ao alcançar essa camada mais condutiva. Já na configuração 3 ( $\rho_1 < \rho_2$ ), a eficácia do aumento das hastes foi limitada, com uma redução de apenas 1,80% na impedância impulsiva.

Tabela 9: Resultados de impedância impulsiva para as diferentes configurações de solo e comprimento das hastes verticais da Malha A2.

	Configuração 1		Configuração 2		Configuração 3	
Resistividade da 1ª camada ( $\Omega.m$ )	1000		1000		1000	
Resistividade da 2ª camada ( $\Omega.m$ )	1000		100		10000	
Comprimento das hastes verticais (m)	2	3	2	3	2	3
Impedância impulsiva ( $\Omega$ )	34,69	32,65	9,69	6,76	87,03	85,47
Redução na impedância impulsiva (%)	5,88		30,19		1,80	

Fonte: Própria do autor.

Esses resultados reforçam que a profundidade e a resistividade da camada inferior exercem uma influência direta na performance do sistema de aterramento. Em solos de camada inferior com resistividade maior que a camada superior, pode ser interessante aumentar a quantidade de hastes ao invés de aumentar seus comprimentos. Porém, é importante mencionar que a distância entre as hastes exerce influência no desempenho do arranjo. O recomendável é que cada caso seja analisado com cuidado para que, com o recurso disponível, seja garantido o melhor desempenho do sistema de aterramento frente às descargas atmosféricas.

#### **6.4 Propostas para Continuidade do Trabalho**

Como desdobramento deste estudo, sugere-se a otimização da metodologia desenvolvida para permitir a simulação de malhas de aterramento de maiores dimensões. Esse aprimoramento visa reduzir o custo computacional, tornando as simulações mais viáveis sem comprometer a qualidade dos resultados.

Outra proposta relevante é a utilização de modelos mais representativos tanto para o solo quanto para a corrente de descarga atmosférica. A adoção do modelo de Alipio-Visacro (2014), por exemplo, permitirá uma representação mais precisa da dependência de frequência do solo, já que possui uma melhor validação experimental. Da mesma forma, o modelo de onda côncava do CIGRÉ e/ou o modelo de duplo pico, podem ser utilizados para melhor representação da primeira corrente de retorno da descarga. Destaca-se também a importância de realizar testes experimentais para validação da metodologia CAE proposta, buscando consolidar sua aplicabilidade prática. Além disso, sugere-se aprimorar a metodologia para que inclua análises não apenas no domínio transiente, mas também em regime permanente, ampliando sua aplicabilidade em estudos de aterramento.

Por fim, podem ser realizados comparativos com outros *softwares* de simulação e metodologias disponíveis na literatura, com o objetivo de avaliar vantagens, limitações e oportunidades de aprimoramento da abordagem adotada neste trabalho.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma metodologia de modelagem computacional (CAE) para simulação do comportamento eletromagnético de sistemas de aterramento submetidos a correntes impulsivas. A partir da construção e análise dos modelos no ambiente *Ansys HFSS*, foi possível estabelecer um procedimento que pode ser utilizado por profissionais e pesquisadores na avaliação do desempenho de sistemas de aterramento, considerando os efeitos transitórios, as características geométricas e as propriedades eletromagnéticas do solo, com um nível consistente de representatividade para aplicações de engenharia.

Através das simulações, observou-se que elementos da geometria do sistema de aterramento têm um impacto significativo na eficiência de dissipação de corrente em eventos de alta frequência como as descargas atmosféricas.

Os resultados obtidos demonstraram que, embora a ampliação do sistema de aterramento possa reduzir a impedância de surto, há um limite a partir do qual o aumento deixa de ser eficaz, especialmente quando se considera solos de maior resistividade em camadas mais profundas (conforme verificado para a Malha A2). A posição e o comprimento das hastes verticais mostraram-se fatores relevantes para a otimização do desempenho do sistema de aterramento, afetando diretamente as distribuições de campo elétrico e potencial. Malhas com um maior número de hastes verticais demonstraram um desempenho superior de forma geral, apresentando redução de até 13% na impedância impulsiva. Porém, foi observado que, quanto maior a malha de aterramento, menor a efetividade da adição de hastes verticais.

Em particular, malhas que possuem hastes verticais posicionadas nas extremidades apresentaram menor impedância quando comparadas às que possuem hastes fora dessas regiões. Esse comportamento é diretamente influenciado pelo efeito de borda e pela distribuição da corrente ao longo da malha, podendo sofrer limitações se a haste estiver fora da área do raio efetivo da malha.

Este estudo contribui para uma melhor compreensão dos efeitos das descargas atmosféricas sobre sistemas de aterramento e fornece diretrizes úteis para o projeto de malhas mais eficientes em termos de segurança e proteção de equipamentos. Com a contínua evolução das ferramentas de simulação e dos métodos de análise, futuros trabalhos poderão expandir este estudo, explorando novas geometrias de aterramento e considerando outras variáveis, como as

variações das características do solo em diferentes regiões, além de uma análise mais aprofundada sobre o efeito da interferência eletromagnética (EMI). Assim, a busca por soluções cada vez mais seguras e eficientes para a proteção contra descargas atmosféricas continua sendo um campo de grande importância para a engenharia elétrica.

Parte dos resultados apresentados neste trabalho foi publicada na edição de 2024 da *INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND LIGHTNING PHYSICS AND EFFECTS*, uma das mais importantes conferências internacionais na área de aterramento e descargas atmosféricas. Este evento, organizado pelo CIGRÉ, reúne especialistas, pesquisadores e profissionais de diversos países, sendo um dos principais fóruns de discussão e divulgação científica sobre fenômenos eletromagnéticos, proteção contra descargas atmosféricas e desempenho de sistemas de aterramento. O artigo, intitulado "*Evaluating grounding grid geometries for lightning protection: a simulation strategy using Ansys HFSS*", apresenta os principais avanços da metodologia de modelagem CAE desenvolvida nesta dissertação, bem como os resultados obtidos nas análises sobre o impacto da geometria das malhas no desempenho frente às correntes impulsivas provenientes de descargas atmosféricas. A publicação neste evento reforça a relevância e a aplicabilidade dos resultados alcançados, além de contribuir com a comunidade técnica e científica da área (TARRAGÔ et al., 2024).

## REFERÊNCIAS

- ABNT. Norma Brasileira ABNT NBR 15751: Sistemas de Aterramento de Subestações. ABNT, Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT. Norma Brasileira ABNT NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão. ABNT, Rio de Janeiro, 2005.
- ABNT. Norma Brasileira NBR 5419: Proteção Contra Descargas Atmosféricas. ABNT, Rio de Janeiro, 2015.
- ALIPIO, Rafael. **Dependência da Frequência dos Parâmetros do Solo: Efeito no Comportamento Impulsivo de Aterramentos Elétricos**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2013. Tese de Doutorado.
- ALIPIO, Rafael; VISACRO, Silvério. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. **IEEE Trans. Electromagn. Compat.**, vol. 56, no. 5, pp. 1163–1171, Oct. 2014.
- ALVES, Marcelo Macedo *et al.* Otimização da Técnica de Reflectometria pelo Algoritmo PSO na Localização de Falhas em Haste. Rio de Janeiro: [s.n.], 2020.
- ANDERSON, R. B.; Eriksson A. J. Lightning parameters for engineering application, **Electra**, n° 69, pp. 65-102, 1980.
- ANSYS. **An Introduction to HFSS**. 2024R2. ed. Canonsburg: Ansys Inc., 2024.
- BARBOSA, Douglas Contente Pimentel *et al.* Machine Learning Approach to Detect Faults in Anchor Rods of Power Transmission Lines. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, nov. 2019. v. 18, n. 11, p. 2335–2339. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8781813/>>.

BIGELOW, R. C.; EBERLE, W. R. **Open-File Report 83-911: Empirical predictive curves for resistivity and dielectric constant of earth materials: 100 Hz to 100 MHz.** [S.l.]: [s.n.], 1972.

CAVKA, D.; MORA, N.; RACHIDI, F. A Comparison of frequency-dependent soil models: Application to the analysis of grounding systems. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, 2014. v. 56, n. 1, p. 177–187.

CIGRÉ WG C4.33. Impact of soil-parameter frequency dependence on the response of grounding electrodes and on the lightning performance of electrical systems. CIGRÉ, Technical Brochure 781, 2019.

CIGRÉ WG 33-01. Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines, CIGRÉ, Technical Brochure 63, 1991.

CIGRÉ WG C4-407. Lightning Parameters for Engineering Applications. CIGRÉ, Technical Brochure 549, 2013.

CLEMENS, M.; WEILAND, T. Discrete Electromagnetism with the Finite Integration Technique. **Progress In Electromagnetics Research**, 2001. n. 32, p. 65–87.

COUTINHO, M.S. *et al.* Machine learning-based system for fault detection on anchor rods of cable-stayed power transmission towers. **Electric Power Systems Research**, maio. 2021. v. 194, p. 107106. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779621000870>>.

DEHN; SÖHNE. **Lightning protection guide**. 3rd. ed. Neumarkt: Dehn International, 2014.

ESSS. Engenharia Assistida por Computador: o que é e como funciona? <https://esss.com/blog/engenharia-assistida-por-computador-o-que-e-e-como-funciona/>, 5 abr. 2022.

FERNANDO, M. The peak, rise time and the half-width of lightning generated electric field derivatives over finitely conducting ground: IEE, 1997. V. 1997, p. 158–163.

FIGUEIREDO, D. G. De. **Análise de Fourier e Equações Diferenciais Parciais**. 1. ed. Brasília: Projeto Euclides, 1977.

GHOLAMI FARKOUSH, S. *et al.* Investigation and Optimization of Grounding Grid Based on Lightning Response by Using ATP-EMTP and Genetic Algorithm. **Wiley Hindawi Complexity**, 5 jan. 2018. v. 2018, n. 1.

GRCEV, L. Modeling of grounding electrodes under lightning currents. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, 2009. v. 51, n. 3 PART 1, p. 559–571.

HEFNY, M.; DEIN, A. EL; EL-TAYEB, A. Effect of Grid Depth on the Performance of Ground Grid under Influence of Line to Ground Fault. **International Journal of Applied Energy Systems**, 1 jan. 2024. v. 6, n. 1, p. 45–52.

IEC. International Standard IEC 62305: Protection Against Lightning. 2010.

IEC. International Standard IEC 60364-5-54: Low-voltage electrical installations – Selection and erection of electrical equipment – Earthing arrangements and protective conductors. 2014.

IEEE. IEEE Standard 80: Guide for Safety in AC Substation Grounding. 2013.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. 3. ed. Porto Alegre: Sagra-dc Luzzato, 1995.

LEAL TARRAGÔ, V. *et al.* An Iterative Method for Double Exponential Lightning Signal Modeling. Em: **Internacional Conference on Grounding & Lightning Physics and Effects (GROUND2021 and 9<sup>th</sup> LPE)**, Belo Horizonte, 2021.

LEAL TARRAGÔ, V. *et al.* Evaluating grounding grid geometries for lightning protection: a simulation strategy using ANSYS HFSS. Em: **Internacional Conference on Grounding & Lightning Physics and Effects (GROUND2024 and 11<sup>th</sup> LPE)**, João Pessoa, 2024.

LEAL TARRAGÔ, V. *et al.* Cascade Modeling of the Measuring System Used to Assess S-Parameters of Anchor Rods on Power Transmission Lines Guyed Towers. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, mar. 2022. v. 21, n. 1, p. 35–47.

LEAL TARRAGÔ, V. *et al.* Impacto de Sistemas de Armazenamento Como Reserva de Capacidade Para Controle de Carregamento de Linhas de Transmissão. Foz do Iguaçu: CIGRÉ, 2023.

LI, Y.; GUAN, Z. Development and Prospect of Computer Aided Engineering. IEEE, 2022. p. 61–64.

LIMA, A. B. **Método Para Cálculo da Impedância de Malhas de Aterramento Típicos de Torres de Linhas de Transmissão**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2010. Dissertação.

LONGMIRE, C. L.; LONGLEY, H. J. Time domain treatment of media with frequency dependent parameters. <https://www.ece.unm.edu/summa/notes/Theoretical.html>, 1973.

LOPES, F. **Aplicação em Python Para Configuração de Malhas de Aterramento Elétrico para Modelagem Eletromagnética 3D FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2024. Trabalho de Conclusão de Curso.

LOURENÇO NOVO, L. R. G. Da S. *et al.* Power Substation Grounding Grid Designs To Lightning Protection. Em: **Internacional Conference on Grounding & Lightning Physics and Effects (GROUND2018 and 8<sup>th</sup> LPE)**, Pirenópolis, 2018.

LOURENÇO NOVO, Lauro R. G. S. **Sistema Sensor Para Detecção de Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica**. Recife: UFPE, 2009. Dissertação.

MESSIER, A. M. **Tech. Rep. MRC-N-415: The propagation of an electromagnetic impulse through soil: Influence of frequency dependent parameters**, 1980.

PAULINO, J. O. S. *et al.* **Proteção de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos Contra Surtos Elétricos em Instalações**. 1. ed. Lagoa Santa: Editora Clamper, 2016.

PORTELA, C. Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior. Seattle: IEEE, 1999. p. 1004–1009.

POZAR, D. M. **Microwave Engineering**. 4. ed. John Wiley & Sons, 2012.

RAKOV, Vladimir; UMAN, Martin. **Lightning: Physics and Effects**. 1. ed. New York: Cambridge University, 2003

RAKOV, Vladimir A. Lightning Parameters for Engineering Applications: Recent Updates and Outlook. Em: World Meeting on Lightning, Cartagena de Indias, Colombia, 2016.

SADIKU, M. N. O. **Elements of Electromagnetics**. 3. ed. New York: Bookman, 2000.

SALARIEH, Bamdad *et al.* Wideband EMT-Compatible Model for Grounding Electrodes Buried in Frequency Dependent Soil. Perpignan, 2019. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/334284312>>.

SALARIEH; SILVA, J. DE; KORDI, Behzad. High frequency response of grounding electrodes: Effect of soil dielectric constant. **IET Generation, Transmission and Distribution**, 3 ago. 2020. v. 14, n. 15, p. 2915–2921.

SANTOS, R. G. M. DOS *et al.* Yagi-Uda Antenna Array Gain Optimization by the PSO and ES Algorithms. IEEE, 2023. p. 202–204.

SCOTT, J. H. Electrical and magnetic properties of rock and soil (Note 18). <https://www.ece.unm.edu/summa/notes/Theoretical.html>, maio. 1966.

SMITH, K. S.; LONGMIRE, C. L. **Technical Report for Period: A universal impedance for soils**. Alexandria, 1975.

SOBRINHO, A. Da S. C. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2006.

THOMAS WEILAND. A discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields. **Electronics and Communications AEU**, 1977. v. 31, n. 3, p. 116–120.

VISACRO, Silvério. **Aterramentos Elétricos**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2002.

VISACRO, Silvério. **Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia**. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2005.

VISACRO, Silvério. A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2007. v. 22, n. 1, p. 381–386.

VISACRO, Silverio *et al.* Lightning response of grounding grids: Simulated and experimental results. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, 2015. v. 57, n. 1, p. 121–127.

VISACRO, Silvério; ALIPIO, R. Frequency Dependence of Soil Parameters: Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, abr. 2012. v. 27, n. 2, p. 927–935.

VISACRO, Silvério; PORTELA, C. M. Soil Permittivity and Conductivity Behavior on Frequency Range of Transient Phenomena in Electric Power Systems. Em: Symposium High Voltage Engineering, Braunschweig, pp. 107-112, 1987.

WENRONG, S. *et al.* Study on impulse characteristics of 35kv substation grounding grids. Em: IEEE Region 10 Conference, 2015.