

**PROJETO DE SISTEMA DE ATERRAMENTO
PARA PLATAFORMA DE GERAÇÃO
FOTOVOLTAICA FLUTUANTE EM LAGO E
RESPOSTA A DESCARGA ATMOSFÉRICA
POR MEIO DO MÉTODO DAS DIFERENÇAS
FINITAS NO DOMÍNIO DO TEMPO**

ANTÔNIO CÉSAR R. RAMOS

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

Projeto de Sistema de Aterramento para Plataforma de Geração
Fotovoltaica Flutuante em Lago e Resposta a Descarga Atmosférica
por meio do Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo

Antônio César R. Ramos

TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO
DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

APROVADA POR:

Amauri Gutierrez Martins Britto, DSc. (ENE-UnB)
(Orientador)

Prof. Guilherme Caribé de Carvalho, DSc. (ENM-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Rafael Amaral Shayani, DSc. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)

Brasília/DF, dezembro de 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

RAMOS, ANTÔNIO CÉSAR R.

Projeto de Sistema de Aterramento para Plataforma de Geração Fotovoltaica Flutuante em Lago e Resposta a Descarga Atmosférica por meio do Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo. [Brasília/DF] 2023.

xiii, 77p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro Eletricista, Trabalho de Graduação, 2023).

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica.

Departamento de Engenharia Elétrica

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 1. Aterramento elétrico | 2. Geração fotovoltaica |
| 3. Painéis Flutuantes | 4. FDTD. |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RAMOS, R. A. L (2023). Projeto de Sistema de Aterramento para Plataforma de Geração Fotovoltaica Flutuante em Lago e Resposta a Descarga Atmosférica por meio do Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica, Publicação 2023, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 77p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Antônio César R. Ramos

TÍTULO: Projeto de Sistema de Aterramento para Plataforma de Geração Fotovoltaica Flutuante em Lago e Resposta a Descarga Atmosférica por meio do Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo.

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Antônio César R. Ramos

Universidade de Brasília (UnB) Campus Darcy Ribeiro

Faculdade de Tecnologia - FT. Departamento de Engenharia Elétrica (ENE)

CEP 70919-970 - Brasília - DF

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha sincera gratidão à minha mãe, que possibilitou minha jornada como estudante e moldou em mim as características necessárias para percorrer o caminho até aqui. Ela foi minha mãe, pai, amiga e exemplo de trabalho duro e perseverança. Você provou seu valor ao criar quatro filhos sozinha em um local distante de qualquer família, demonstrando coragem e disposição para trabalhar e superar as adversidades. Gostaria também de agradecer às minhas irmãs: Dra. Simone, pelo espelho que foi ao demonstrar seu esforço e dedicação aos estudos, Samara pelo exemplo de inteligência e competência e Soraia, a irmã afetuosa, amorosa e minha segunda mãe na nossa infância; seus filhos têm muita sorte.

Quero expressar meu agradecimento à amada Elen pelo seu companheirismo, simplicidade e paciência ao compartilhar o namorado com um curso de engenharia.

Agradeço aos amigos de curso que fizeram parte dessa jornada, especialmente aos colegas de trabalho Marco Antônio, o verdadeiro exemplo de esforço e trabalho duro, e Raphael, o exemplo perfeito de inteligência preguiçosa e dono de um bom humor cativante. Engenhar com vocês foi mais que especial.

Gostaria ainda de agradecer ao Kimono dourado Amauri, pois possibilitou que esse trabalho chegasse em um nível que eu não conseguiria sozinho, pois emprestou-me as ferramentas necessárias para a elaboração desse trabalho. "Três tigres tristes integrando três integrais trilhas".

Por fim e mais importante, gostaria de agradecer a Deus por ser quem és e possibilitar todos esses encontros que fazem quem somos.

Ahhhh quase esqueci do meu fiel companheiro de madrugadas que frequentemente esteve embaixo da minha escrivaninha entre um trago e outro de café, o Thomas.

RESUMO

O presente trabalho envolve o desenvolvimento de um sistema de aterramento elétrico para uma plataforma flutuante de geração de energia fotovoltaica *off-grid*, que será implantada na barragem da Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília. Essa plataforma terá um papel crucial na coleta de dados, permitindo a observação das variáveis que influenciam a eficiência da geração de energia solar em condições de flutuação e resfriamento forçado.

O propósito do sistema de aterramento proposto é garantir a segurança tanto das pessoas quanto o correto funcionamento dos equipamentos usados para coleta de dados e controle dos resfriadores. Para atingir essa meta utilizam ferramentas computacionais modernas de simulação e desenvolvimento como o pacote de *software* CDEGS para simulação de falta à terra e o método das diferenças finitas no domínio do tempo implementado em ambiente MATLAB® para examinar o comportamento do sistema sob a incidência de descargas atmosféricas. Com isso, o trabalho consolidou o projeto de aterramento seguro em situações de falta à terra, proporcionando segurança às pessoas e estabelecendo uma referência sólida de tensão. Além disso, demonstrou as principais grandezas associadas à incidência de descargas atmosféricas na plataforma.

Palavras-chave: Aterramento elétrico, método das diferenças finitas no domínio do tempo, geração fotovoltaica, plataforma flutuante, descargas atmosféricas.

ABSTRACT

This study involves the development of an electrical grounding system for a floating off-grid photovoltaic energy generation platform, which will be deployed at the Água Limpa Farm dam at the University of Brasília. This platform will play a crucial role in data collection, enabling the observation of variables influencing the efficiency of solar energy generation under fluctuating and forced cooling conditions.

The purpose of the proposed grounding system is to ensure the safety of both individuals and equipment used for data collection and cooler control. To achieve this goal, modern computational simulation and development tools were employed, including the CDEGS software package for ground fault simulation and the finite difference method in the time domain implemented in the MATLAB® environment to examine the system's behavior under the incidence of atmospheric discharges. With this, the work solidified the secure grounding project in situations of earth fault, providing safety to individuals and establishing a robust voltage reference. Additionally, it demonstrated the key magnitudes related to the occurrence of atmospheric discharges on the platform.

Keywords: Grounding grid, finite-difference time-domain (FDTD) method, photovoltaic generation, floating platform, lightning discharge.

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de figuras	iii
Lista de tabelas	vi
Lista de símbolos	vii
Glossário	ix
Capítulo 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO	2
1.1.1 Objetivos específicos	2
1.2 METODOLOGIA	3
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	4
Capítulo 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
2.1 SISTEMA DE ATERRAMENTO	5
2.2 RISCOS ASSOCIADOS	6
2.2.1 Efeitos da corrente elétrica no corpo humano	6
2.2.2 Tensão de toque	9
2.2.3 Tensão de passo	9
2.2.4 Danos e falhas em equipamentos eletrônicos	10
2.3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO	10
2.3.1 Sondagem geométrica	11
2.3.1.1 Método de Wenner	11
2.3.1.2 Estratificação do solo	13
2.4 ATERRAMENTO DE EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS SENSÍVEIS	15
2.4.1 Uso do aterramento convencional	15
2.4.2 Uso do aterramento isolado	16
2.4.3 Aterramento de ponto único	16

2.4.4	Malha de terra de referência (MTR)	17
2.5	MÉTODOS COMPUTACIONAIS MODERNOS PARA PROJETO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO	18
2.5.1	Método dos momentos - MoM	19
2.5.2	Método das diferenças finitas no domínio do tempo - FDTD	22
2.6	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	26
2.7	SÍNTESE DO CAPÍTULO	27
Capítulo 3 – PROJETO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO ELÉTRICO		28
3.1	EQUIPAMENTOS	28
3.2	REQUISITOS MÍNIMOS	31
3.3	ANÁLISE DA RESISTIVIDADE E ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO	34
3.4	ESQUEMA DE ATERRAMENTO PROPOSTO	36
3.5	SIMULAÇÃO DE FALTA À TERRA	39
3.6	SÍNTESE DO CAPÍTULO	45
Capítulo 4 – RESPOSTA A DESCARGA ATMOSFÉRICA		46
Capítulo 5 – CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS		52
Referências		54
Apêndice A - Projeto executivo		56
Apêndice B - Lista de materiais		58
Apêndice C - Registro fotográfico de execução parcial		60

LISTA DE FIGURAS

2.1	Zonas convencionais de efeitos das correntes alternadas (15 Hz a 100 Hz) em pessoas para um caminho de corrente correspondente da mão esquerda para os pés.	7
2.2	Zonas convencionais de efeitos das correntes contínuas em pessoas para um caminho de corrente longitudinal ascendente.	7
2.3	Impedâncias parciais internas do corpo humano, em porcentagem em relação ao trajeto da mão até os pés.	9
2.4	Arranjo típico de Wenner para medição da resistividade aparente do solo.	12
2.5	Modelo de solo multicamadas.	13
2.6	Sistema de aterramento de ponto único para equipamentos eletrônicos (sem transformador de isolamento).	17
2.7	Malha de terra de referência	18
2.8	Sistema de aterramento utilizando malha de terra de referência.	18
2.9	Ilustração esquemática do modelo de aterramento a parâmetros distribuídos.	20
2.10	Eletrodo filamentar em solo de duas camadas.	21
2.11	Espaço computacional tridimensional FDTD composto por células Yee.	23
2.12	Arranjo dos componentes do campo em uma célula Yee indexada como (i, j, k)	24
2.13	Fluxograma FDTD.	25
2.14	Descarga atmosférica $7/20 \mu s$	27
3.1	Plataforma flutuante.	28
3.2	Esquema de conexão bifilar dos componentes por conjunto de geração.	29

3.3	Controlador de carga TRIRON2210N.	30
3.4	Característica I-V dos painéis em diferentes irradiâncias.	30
3.5	Característica I-V dos painéis em diferentes temperaturas.	31
3.6	Tensões em caso de submersão parcial típica.	32
3.7	Locais de medidas - Barragem Água Limpa.	34
3.8	Estratificação m_1	35
3.9	Estratificação m_2	35
3.10	Arranjo a ser simulado.	36
3.11	Esquema de aterramento elétrico proposto.	37
3.12	Corrente de falta, correntes injetadas e correntes longitudinais	39
3.13	Diferença de potencial ao longo do sistema de aterramento - GPD	40
3.14	Elevação do potencial do arranjo de aterramento em relação ao terra remoto - GPR	40
3.15	Potencial Escalar 2D.	41
3.16	Potencial Escalar 3D.	41
3.17	Tensão V_{ch} 2D.	42
3.18	Tensão V_{ch} 3D.	42
3.19	Gradiente da tensão V_{ch} 2D.	43
3.20	Gradiente da tensão V_{ch} 3D.	43
3.21	Tensão do toque escalar 2D.	44
3.22	Tensão de toque escalar 3D.	44
4.1	Disposição ilustrativa da fonte de corrente, sistema de aterramento e eletrodo remoto modelados no método FDTD.	46
4.2	Descarga atmosférica $7/20 \mu s$ 15 kA aplicada à plataforma.	47
4.3	Correntes injetadas pelas hastes de aterramento.	48

4.4	Tensões observadas em resposta a descargas atmosféricas.	48
4.5	Resistência transitória do sistema de aterramento.	49
4.6	Magnitude da componente y do campo elétrico.	49
4.7	Magnitude do campo elétrico no leito da barragem [V/m] em $t = 7 \mu s$	50
4.8	Magnitude do campo elétrico na superfície da barragem [V/m] em $t = 7 \mu s$	51
1	Registro fotográfico de execução parcial 01.	60
2	Registro fotográfico de execução parcial 02.	61
3	Registro fotográfico de execução parcial 03.	61
4	Registro fotográfico de execução parcial 04.	62

LISTA DE TABELAS

2.1	Resumo das zonas corrente/tempo das Figuras 2.1 e 2.2.	8
2.2	Fator F para diferentes trajetos de corrente no corpo humano.	8
3.1	Especificações técnicas TRIRON2210N.	29
3.2	Especificações elétricas RMS-100P.	30
3.3	Resistências aparentes medidas nas margens da barragem.	34
4.1	Propriedades dos materiais.	47

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Espaçamento dos eletrodos no arranjo de Wenner
A_r	Coefficiente de correção para a magnitude da descarga atmosférica
c	Profundidade dos eletrodos de medição no arranjo de Wenner
I_{AB}	Corrente injetada no arranjo de Wenner
I_l	Amplitude da descarga atmosférica
$K_{N,S}$	Função Kernel da estrutura do solo
R_a	Resistência aparente no arranjo de Wenner
R_{int}	Resistência interna da bateria
R_{ch}	Resistência do percurso da corrente de submersão parcial típica
V_{CD}	Diferença de potencial entre os eletrodos de tensão no arranjo de Wenner
V_{ch}	Tensão de submersão parcial típica
α	Coefficiente que determina o tempo de subida de descarga atmosférica
β	Coefficiente que determina o tempo de descida de descarga atmosférica
δ_j	Densidade linear de corrente definida como a razão entre a corrente injetada pelo j-ésimo segmento do eletrodo de corrente e seu respectivo comprimento
δ_j	Densidade linear de corrente definida como a razão entre a corrente injetada pelo j-ésimo segmento do eletrodo de corrente e seu respectivo comprimento
Δ	Unidade de discretização espacial
Δt	Intervalo de tempo
Γ	Operador que representa a soma adequada de uma função auxiliar $\psi(x)$ no método das Imagens Complexas

σ	condutividade elétrica
ϵ	Permissividade elétrica do meio
μ	Permeabilidade magnética do meio
λ	Variável auxiliar de integração no método de estratificação multicamadas
λ_j	Densidade de corrente normalizada proveniente da j-ésima densidade linear de corrente
μ	Permeabilidade magnética do meio
Φ_e	Erro quadrático normalizado da estratificação multicamadas
ρ_e	Densidade de carga elétrica
ρ_m	Densidade de carga magnética
ρ_a^m	m-ésima resistividade aparente do solo medida no método de Wenner
ρ_N	N-ésima resistividade do solo estratificado
\vec{B}	Vetor densidade de fluxo magnético
\vec{D}	Vetor densidade fluxo elétrico
\vec{E}	Vetor intensidade de campo elétrico
\vec{H}	Vetor intensidade de campo magnético
\vec{J}	Vetor densidade de corrente elétrica
\vec{M}	Vetor densidade de corrente magnética
\hat{I}_j	Contribuição do j-ésimo segmento do eletrodo de aterramento no método dos momentos
\hat{J}_0	Função de Bessel de primeira espécie e ordem zero
\hat{U}_j	Potencial no solo em um ponto de observação $O(x, y, z)$ proveniente do j-ésimo segmento do eletrodo de aterramento no método dos momentos
\hat{U}_s	Potencial no solo em um ponto de observação $O(x, y, z)$

GLOSSÁRIO

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Corrente alternada
CDEGS	<i>Current distribution, electromagnet fields, grounding and soil structure analysis</i>
CMVR	<i>Common-mode voltage range</i>
DF	Distrito Federal
CC	Corrente continua
DPS	Dispositivo de proteção contra surtos
EPI	Equipamento de proteção individual
FAP-DF	Fundação de apoio à pesquisa do Distrito Federal
FDTD	<i>Finite-difference time-domain method</i>
GPD	<i>Ground potential differences</i>
GPR	<i>Ground potential rise</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
MDW	Minidisjuntor WEG
MTR	Malha de terra de referência
SES	<i>Safe Engineering Services</i>
UnB	Universidade de Brasília

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem-se testemunhado uma expansão impressionante no uso de tecnologia em quase todos os aspectos da vida humana. Desde a comunicação, transporte, moradia, condução de negócios e até mesmo nos processos de conversão de energia, a presença da tecnologia é inegável e onipresente (SILVEIRA ROSEMARI M. C. F. E BAZZO, 2006). Um exemplo notável desse avanço é o crescimento exponencial dos sistemas de geração fotovoltaica, que transformam a energia solar em eletricidade limpa e renovável. Esses sistemas têm se tornado cada vez mais populares, impulsionados pelos benefícios ambientais e econômicos que oferecem (SANTOS, 2018).

No entanto, no meio de toda essa inovação e progresso, um elemento fundamental muitas vezes passa despercebido: o aterramento elétrico. Embora possa parecer uma parte técnica e acessória, o aterramento desempenha um papel vital tanto no correto funcionamento dos dispositivos quanto na salvaguarda da segurança das pessoas (MAMEDE, 2007).

O aterramento é um processo pelo qual um dispositivo ou sistema é conectado à terra, permitindo que cargas elétricas em excesso se dissipem de maneira segura e estabelecendo um potencial de referência. No contexto dos sistemas fotovoltaicos, o aterramento adequado é crucial para proteger tanto os equipamentos quanto os seres humanos envolvidos. Painéis solares, inversores e controladores de carga estão sujeitos aos efeitos da exposição ao meio ambiente, como a deterioração das conexões elétricas e das instalações, correntes de fuga, dispositivos de proteção defeituosos e outras adversidades. Em situações como essas, e durante ocorrências de surtos de energia ou descargas atmosféricas, um sistema de aterramento eficaz pode desviar a energia indesejada para o solo, minimizando assim o impacto nos dispositivos conectados e prevenindo potenciais riscos de choque elétrico (FEITOSA JACKSON NOGUEIRA E GUERRA, 2021).

Em resumo, à medida que o crescimento constante da tecnologia e a ampla adoção de sistemas de geração fotovoltaica se desdobram, bem como as pesquisas para otimizá-los e expandi-los, é crucial reconhecer a importância do aterramento. Garantir que os dispositivos elétricos e eletrônicos estejam adequadamente conectados à terra não apenas promove seu funcionamento confiável, mas também protege a segurança de todos os envolvidos. Nesse mundo cada vez mais eletrificado, o aterramento elétrico é o alicerce invisível sobre o qual o futuro tecnológico é construído.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo o projeto do sistema de aterramento elétrico de proteção e funcional destinado a uma plataforma de geração fotovoltaica *off-grid* flutuante a ser instalada na barragem da Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília. A plataforma integra o projeto de pesquisa científica, tecnológica e de inovação "Estudo comparativo da eficiência de conversão de energia em painéis fotovoltaicos refrigerados instalados em ambientes terrestre (fixos) e aquático (flutuantes sobre lago)" que visa colocar a plataforma em campo, monitorar e coletar dados da geração dos painéis flutuantes em diferentes condições de resfriamento. Portanto, este trabalho se apresenta como uma contribuição para um projeto de escopo mais amplo e aderente a missão institucional da UnB.

1.1.1 Objetivos específicos

De modo a se atingir o objetivo principal citado, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- obter um modelo realista do solo sob o leito da barragem via estratificação com medidas de campo para projeto do sistema de aterramento elétrico;
- propor critério específico de segurança aplicável ao projeto;
- garantir a segurança na superfície da barragem e uma referência adequada ao correto funcionamento dos dispositivos eletrônicos em condições de falta à terra;

- verificar o comportamento do sistema em caso de incidência de descarga atmosférica sobre a plataforma por meio do método das diferenças finitas no domínio do tempo.

1.2 METODOLOGIA

Considerando as condições singulares de instalação em substrato aquoso da plataforma de geração fotovoltaica flutuante, buscaram-se os princípios fundamentais que regem as normas pertinentes aos sistemas de aterramento. Desta maneira, dada a especificidade do sistema projetado, as normas ABNT NBR 5410, NBR 5419, NBR 17042, NBR 15751, NBR 7117, NBR 16690, juntamente com a norma IEC 61892-6 (*Mobile and Fixed Offshore Units - Electrical Installations*), e os padrões IEEE Std. 142 e IEEE Std. 80 receberam adaptações para adequação ao caso concreto. Sendo assim, os conceitos gerais de segurança relacionados ao tema assim como as boas práticas pertinentes e a literatura consolidada foram utilizadas para estabelecimento dos critérios de segurança e projeto em geral.

Dessa forma, dado que o presente trabalho constitui um projeto de aplicação, foram realizadas medidas de campo para estratificação do solo. Com os limites de segurança estabelecidos, utilizou-se o *software* CDEGS para simular falta à terra e observação das tensões elétricas geradas no sistema de aterramento e na superfície da água. O CDEGS elaborado pela empresa canadense SES constitui um conjunto integrado de módulos de engenharia destinado à análise de questões associadas a sistemas de aterramento, campos eletromagnéticos e interferências eletromagnéticas no domínio da frequência. A ferramenta é amplamente empregada em vários países para a realização de estudos sobre interferências eletromagnéticas e aterramento elétrico, além disso o *software* é reconhecido pela comunidade científica como experimentalmente válido (MARTINS-BRITTO, 2017).

O método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) implementado no ambiente MATLAB® foi empregado como técnica de simulação para avaliar a incidência de descargas atmosféricas sobre a plataforma, uma vez que o método permite uma representação dinâmica no domínio do tempo o que leva a uma compreensão física mais direta e caracterização detalhada dos efeitos eletromagnéticos associados (ELSHARBENI; DEMIR, 2015).

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste primeiro capítulo, apresenta-se a contextualização, o objetivo principal e específicos, a metodologia adotada e a estrutura geral deste trabalho.

No Capítulo 2, realiza-se uma introdução teórica aos tópicos e ferramentas relevantes para o trabalho. Isso inclui uma discussão sobre os riscos associados, as características do solo, como sua resistividade elétrica e estratificação em multicamadas horizontais. Também apresenta-se um breve histórico dos métodos de aterramento de equipamentos elétricos sensíveis, métodos computacionais modernos para o projeto de sistemas de aterramento elétrico e, por fim, uma breve revisão sobre a modelagem de descargas atmosféricas.

No Capítulo 3, prossegue-se com a elaboração detalhada do projeto do sistema de aterramento elétrico para a plataforma de geração fotovoltaica. Este capítulo abrange a descrição dos equipamentos utilizados na plataforma para geração, armazenamento e controle de carga, a estratificação do solo obtida, o arranjo proposto para o sistema de aterramento e, também, a análise da resposta do sistema em caso de falta à terra.

No Capítulo 4, é apresentada a resposta do sistema projetado a descargas atmosféricas utilizando o método das diferenças finitas no domínio do tempo implementado no ambiente MATLAB®.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo, são abordados os conceitos fundamentais associados ao projeto de sistemas de aterramento, juntamente com os princípios dos métodos computacionais empregados. O intuito é alcançar uma análise crítica dos resultados obtidos por meio das ferramentas de projeto.

2.1 SISTEMA DE ATERRAMENTO

O sistema de aterramento compreende a totalidade de condutores e eletrodos de aterramento, sejam eles de origem natural ou não, que estão interconectados e que podem estar enterrados com a finalidade de conectar um dispositivo ou sistema à terra para garantir a dissipação de cargas em excesso e estabelecimento de uma sólida referência de tensão. As instalações elétricas devem possuir um sistema de aterramento elétrico apropriado e dimensionado de acordo com as condições de cada projeto específico, a fim de operarem de maneira satisfatória e garantirem a segurança (MAMEDE, 2007). Esse sistema deve garantir:

- segurança de atuação da proteção;
- proteção das instalações contra descargas atmosféricas;
- proteção dos indivíduos contra contatos com partes metálicas das instalações energizadas acidentalmente;
- uniformização do potencial em toda área de projeto para prevenir danos tanto a pessoas quanto aos equipamentos.

2.2 RISCOS ASSOCIADOS

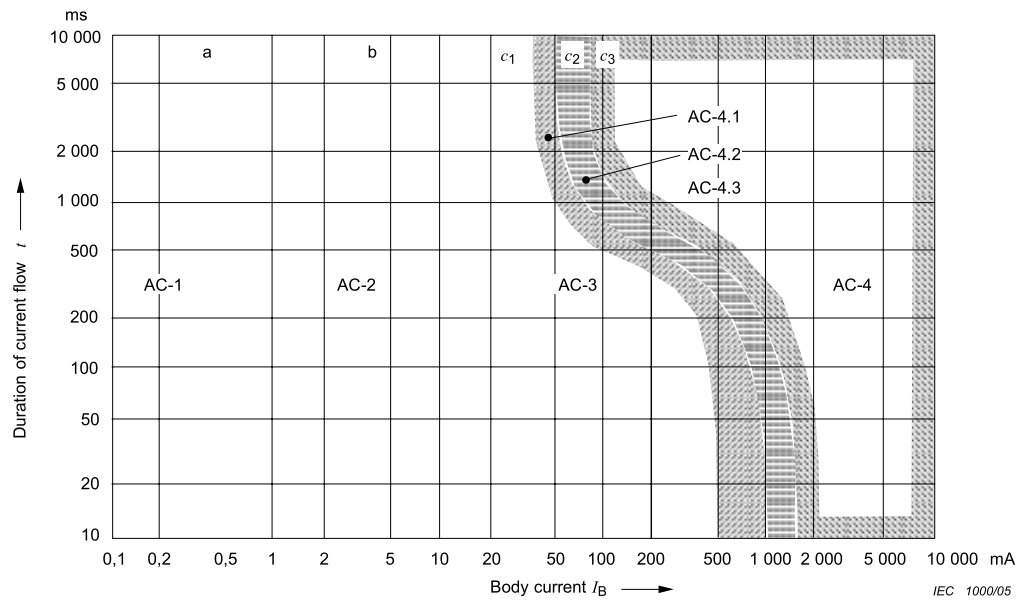
Os riscos associados são significativos e podem impactar diretamente a segurança e o desempenho de sistemas elétricos. Um aterramento inadequado pode resultar em choques elétricos, incêndios e danos a equipamentos. Se um sistema não estiver devidamente aterrado, há um risco aumentado de tensões perigosas em superfícies metálicas, podendo representar ameaças à vida e à integridade física das pessoas (MAMEDE, 2007).

2.2.1 Efeitos da corrente elétrica no corpo humano

Vários fenômenos físicos estão associados à corrente elétrica. Dentre esses fenômenos, pode-se mencionar os efeitos Joule, eletroquímico, eletromagnético, luminoso e até mesmo os fisiológicos. Naturalmente, o corpo humano possui diversas funções controladas e mediadas por fluxos de cargas elétricas. No entanto, quando uma pessoa é exposta à eletricidade, seja ela de origem industrial ou natural, isso pode resultar em um choque elétrico. Esse choque elétrico é, em essência, o efeito patofisiológico que ocorre quando uma corrente elétrica percorre o corpo humano, e suas consequências variam de acordo com a duração e a intensidade da exposição, podendo ser potencialmente fatal. (KINDERMANN, 2013).

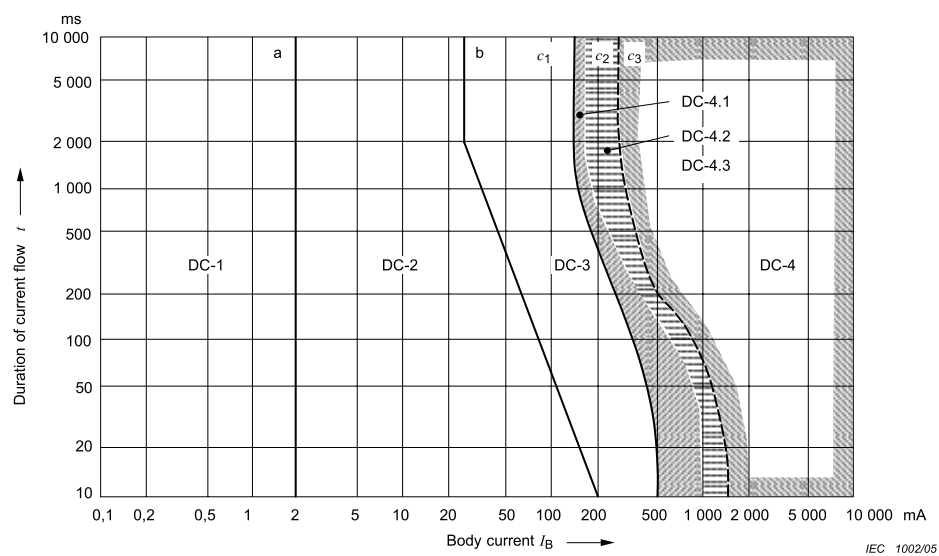
É amplamente conhecido que os principais efeitos da corrente elétrica externa no corpo humano incluem tônus muscular involuntário, tetanização, fibrilação ventricular, parada cardíaca e queimaduras. Esses efeitos dependem do tempo de duração e da magnitude da corrente elétrica, conforme as Figuras 2.1 e 2.2.

Figura 2.1. Zonas convencionais de efeitos das correntes alternadas (15 Hz a 100 Hz) em pessoas para um caminho de corrente correspondente da mão esquerda para os pés.



Fonte: International Electrotechnical Commission – Technical Specification - IEC/TS-60.479-1 (IEC, 2016)

Figura 2.2. Zonas convencionais de efeitos das correntes contínuas em pessoas para um caminho de corrente longitudinal ascendente.



Fonte: International Electrotechnical Commission – Technical Specification - IEC/TS-60.479-1 (IEC, 2016)

Tabela 2.1. Resumo das zonas corrente/tempo das Figuras 2.1 e 2.2.

Zona	Limites	Efeitos Fisiológicos
DC-1	0,5 mA - curva a	Percepção possível, mas geralmente sem reação.
DC-2	0,5 mA - curva b	Apenas tónus muscular, porém sem risco ou dano fisiológico.
DC-3	b - C1	Geralmente sem danos orgânicos significativos. Fortes contrações musculares, dificuldade em respirar e distúrbios cardíacos reversíveis.
DC-4	A partir de C1	Podem ocorrer efeitos patofisiológicos, como parada cardíaca, parada respiratória e queimaduras, ou outros danos celulares. A probabilidade de fibrilação ventricular aumenta com a magnitude da corrente e o tempo.
	c1-c2	DC - 4.1 Probabilidade de fibrilação ventricular aumentando para cerca de 5%.
	c2-c3	DC - 4.2 Probabilidade de fibrilação ventricular aumentando para cerca de 50%.
	Além de c3	DC - 4.3 Probabilidade de fibrilação ventricular acima de 50%.

Fonte: International Electrotechnical Commission – Technical Specification - IEC/TS-60.479-1 (IEC, 2016)

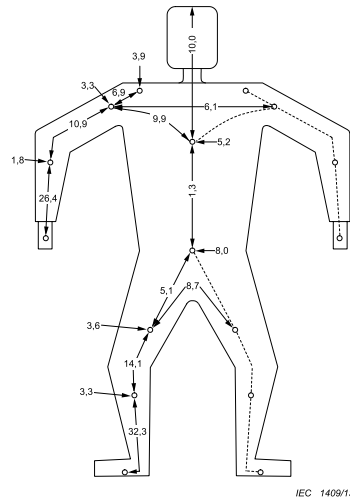
A tabela e os gráficos acima são definidos para correntes que fluem da mão esquerda para os pés. Nesse contexto, o fator F da Tabela 2.2 juntamente com a Figura 2.3 permite uma aplicação mais geral dos dados.

Tabela 2.2. Fator F para diferentes trajetos de corrente no corpo humano.

Trajetos de corrente no corpo humano	Fator
Mão esquerda para pé esquerdo, pé direito ou ambos os pés	1,0
Ambas as mãos para ambos os pés	1,0
Mão esquerda para mão direita	0,4
Mão direita para pé esquerdo, pé direito ou ambos os pés	0,8
Costas para mão direita	0,3
Costas para mão esquerda	0,7
Peito para mão direita	1,3
Peito para mão esquerda	1,5
Glúteos para mão esquerda, mão direita ou ambas as mãos	0,7
Pé esquerdo para pé direito	0,04

Fonte: International Electrotechnical Commission – Technical Specification - IEC/TS-60.479-1

Figura 2.3. Impedâncias parciais internas do corpo humano, em porcentagem em relação ao trajeto da mão até os pés.



Fonte: International Electrotechnical Commission – Technical Specification - IEC/TS-60.479-1

2.2.2 Tensão de toque

A tensão de toque é definida como a variação de potencial entre um objeto metálico, esteja ele aterrado ou não, e um ponto na superfície do solo que esteja a uma distância horizontal típica correspondente ao alcance normal do braço humano; essa distância é comumente estabelecida como 1,0 metro (ABNT, 2009).

2.2.3 Tensão de passo

É definida pela norma ABNT NBR 15751 como: “diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo separados pela distância de um passo de uma pessoa, considerada igual a 1,0 m”. Esse fenômeno é frequentemente observado nas áreas próximas a locais afetados por descargas atmosféricas ou nas proximidades de eletrodos de aterramento em situações de curto-circuito.

2.2.4 Danos e falhas em equipamentos eletrônicos

As principais ameaças relacionadas a falhas de comunicação e dano aos equipamentos eletrônicos dentro do escopo estudado são (IEEE, 2007):

- descargas atmosféricas (diretas e indiretas);
- transitórios de chaveamento (operação de chaves, disjuntores, DPS, entre outros);
- eletricidade estática (direta ou em equipamentos próximos);
- transitórios elétricos diversos (arcos em contatos).

Por outro lado, grandes diferenças de potencial de terra (*ground potential differences - GPDs*) são a principal contribuição para ruídos de modo comum em uma conexão de dados, sendo, portanto, a principal razão para a transmissão de dados corrompidos e potencialmente para danos ao transceptor, especialmente quando ultrapassam sua faixa de tensão de modo comum (CMVR) (Renesas Technology, 2016). A existência de GPD decorre de uma série de fatores: devido ao sistema de instalação elétrica e um projeto precário, grandes correntes nos fios de retorno, transitórios de alta tensão, correntes devido a descargas atmosféricas, condições de falta à terra, ruídos irradiados de cargas indutivas de comutação, dentre outros fenômenos eletromagnéticos. Neste contexto, a cuidadosa concepção dos sistemas de comunicação é fundamental para prevenir ruídos estocásticos de modo comum. Os efeitos potencialmente prejudiciais originados de transitórios de alta energia e descargas atmosféricas podem ser eficazmente mitigados por meio da implementação de aterramentos sólidos e caminhos de descarga controlados para a terra (Texas Instruments, 2007).

2.3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO

O solo é descrito como um complexo arranjo de elementos naturais, que se apresentam como estruturas tridimensionais dinâmicas, compostas por componentes sólidos, líquidos e gasosos. É formado a partir de materiais minerais e orgânicos e pode abrigar matéria viva em seu interior. Na natureza, é comum encontrar solos que sustentam vegetação, e ocasionalmente, esses solos podem ter sido alterados devido a intervenções humanas (EMBRAPA, 2012).

A resistividade elétrica do solo é um dos dados mais importantes na elaboração de projetos de aterramento, pois determina a resposta do solo em problemas envolvendo a terra como condutor. As características do solo são influenciadas por vários fatores, incluindo a presença de água, temperatura, compactação, composição química e sais dissolvidos. Em aplicações práticas, o solo demonstra ter característica anisotrópica, o que significa que seus parâmetros variam de acordo com a direção e a profundidade, ou seja, suas propriedades variam no tempo e espaço (KINDERMANN GERALDO E CAMPAGNOLO, 1995).

2.3.1 Sondagem geométrica

Frequentemente, utiliza-se a expressão "medição da resistividade do solo", mas é importante esclarecer que essa afirmação não é precisa. Na realidade, a resistividade não é medida diretamente, mas sim derivada de uma sondagem geométrica. Após o tratamento e processamento dos dados obtidos nessa sondagem, é gerada uma curva de resistividade aparente, que permite estratificar e definir a resistividade em cada camada do solo onde o estudo foi conduzido (ABNT, 2020).

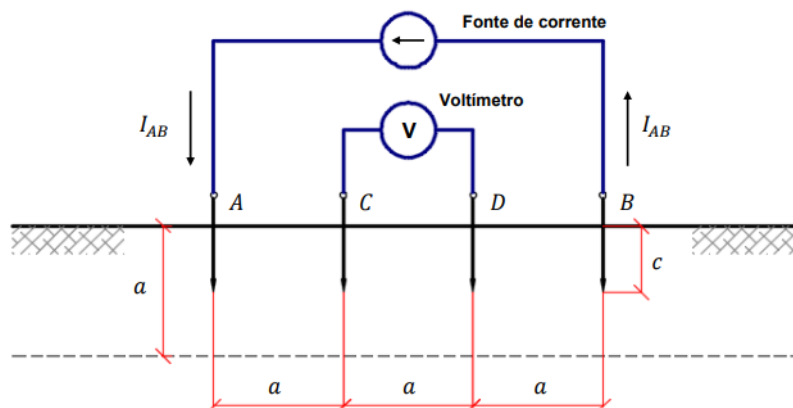
2.3.1.1 Método de Wenner

Para obtenção da resistividade aparente do solo existem diferentes métodos práticos, todavia, nesse trabalho será utilizado o método de Wenner.

O método de Wenner consiste em quatro eletrodos posicionados com igual distância entre si, conforme ilustrado na Figura 2.4. Nele, A e B são os eletrodos de corrente elétrica, enquanto a tensão é medida entre os eletrodos C e D. A separação entre os eletrodos adjacentes é representada por a , enquanto c denota a profundidade de cravação, que não deve ultrapassar 10% do valor de a .

O arranjo de Wenner é uma variante específica do arranjo de Schlumberger. No método utilizado os quatro eletrodos são movidos simultaneamente, aumentando a distância exponencialmente, ou seja, em intervalos de 1 m, 2 m, 4 m, 8 m, 16 m, 32 m e 64 m. Quando esses valores são expostos em um gráfico de escala log-log, resultam em pontos de medição igualmente espaçados (MARTINS-BRITTO, 2017).

Figura 2.4. Arranjo típico de Wenner para medição da resistividade aparente do solo.



Fonte: Modelagem das interferências eletromagnéticas entre linhas de transmissão e tubulações metálicas subterrâneas e análise de impactos (MARTINS-BRITTO, 2017).

Nesse arranjo pode-se determinar a resistividade elétrica aparente pela equação:

$$\rho_a^m = \frac{4\pi R_a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+4c^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2+c^2}}} [\Omega \cdot m], \quad (2.1)$$

em que $R_a = V_{CD}/I_{AB}$ (MARTINS-BRITTO, 2017).

A NBR 7117-1 de 2020 - Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos - Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geolétrica - além de orientar com relação ao número e locais de medição, ressalta ainda cuidados e boas práticas no processo de obtenção da curva de resistividade aparente do solo:

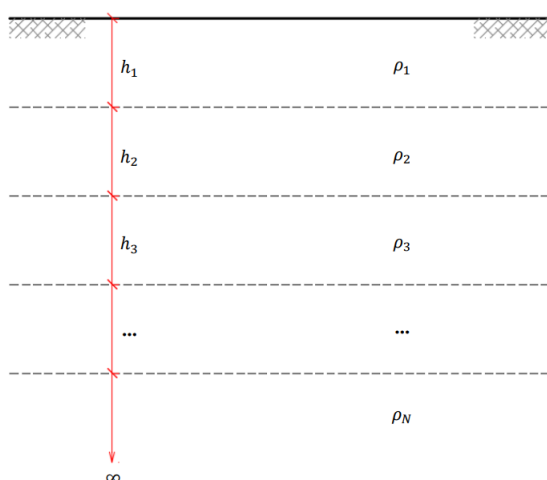
- evitar realizar medições em condições atmosféricas desfavoráveis, devido à potencial ocorrência de descargas atmosféricas;
- empregar equipamentos de proteção individual (EPI) que sejam apropriados para o tipo de medição a ser conduzida e para o ambiente onde essa medição ocorrerá;
- evitar o contato com os eletrodos durante o processo de medição;
- prevenir a aproximação de indivíduos não autorizados e animais.

2.3.1.2 Estratificação do solo

A estratificação do solo é o método utilizado para processar os dados de resistividade aparente com o objetivo de criar um modelo que represente o solo em camadas horizontais paralelas e que retrate seu comportamento de forma satisfatória em relação a uma grandeza que deseja-se observar. Como mencionado anteriormente, o solo exibe características anisotrópicas, mas muitas vezes essa propriedade é ignorada, considerando o solo como completamente homogêneo. Em outros casos, ele é modelado como sendo composto por duas ou três camadas distintas.

Neste trabalho, opta-se pelo uso do modelo de multicamadas, onde o solo é representado como uma estrutura de dados composta por N valores de resistividade $[\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_N]$ e $N - 1$ valores de espessura $[h_1, h_2, h_3, \dots, h_{N-1}]$, sendo que a última camada corresponde ao equivalente do solo profundo, visto a partir do local das medições, e é considerada como tendo uma espessura infinita (MARTINS-BRITTO, 2017).

Figura 2.5. Modelo de solo multicamadas.



Fonte: Modelagem das interferências eletromagnéticas entre linhas de transmissão e tubulações metálicas subterrâneas e análise de impactos (MARTINS-BRITTO, 2017).

A resistividade aparente do solo multicamadas para uma distância específica a , conforme definida no método de Wenner, é obtida pela resolução da equação de Laplace para o potencial elétrico escalar. Em um solo composto por N camadas, cada uma com sua resistividade elétrica e profundidade específica, a resistividade aparente pode ser expressa conforme em (MARTINS-BRITTO, 2017):

$$\rho_a = \rho_1[1 + 2F_N(a) - F_N(2a)] [\Omega \cdot m], \quad (2.2)$$

$$F_N(x) = 2x \int_0^\infty \frac{K_{N,1} e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_{N,1} e^{-2\lambda h_1}} \hat{J}_0(\lambda x) d\lambda, \quad (2.3)$$

sendo que \hat{J}_0 é a função de Bessel de primeira espécie e ordem zero; λ é uma variável auxiliar de integração; e $K_{N,1}$ é a função Kernel da estrutura do solo, definida recursivamente em (TAKAHASHI; KAWASE, 1990).

Nesse contexto, a abordagem mais prática para a estratificação multicamadas envolve o uso de métodos numéricos que procuram encontrar o conjunto de parâmetros $[\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots, \rho_N]$ e $[h_1, h_2, h_3, \dots, h_{N-1}]$ que melhor se ajustem ao perfil de resistividade aparente observado em campo (MARTINS-BRITTO, 2017). Em outras palavras, esse é um problema de otimização no qual se busca determinar os valores ideais por meio de uma função objetivo definida a partir de um conjunto de m amostras da resistividade aparente:

$$\Phi_e(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N, h_1, h_2, \dots, h_{N-1}) = \sum_{j=1}^M \left(\frac{\rho_{a,j}^m - \rho_{a,j}}{\rho_{a,j}^m} \right)^2, \quad (2.4)$$

em que a função Φ_e corresponde ao erro quadrático normalizado da estratificação e possui uma forma explícita e diferenciável. A partir de uma estimativa inicial, utilizam-se algoritmos de busca para obtenção do conjunto de valores que minimizem esse erro e, conseqüentemente, a determinação do modelo de solo estratificado em N camadas e seus respectivos parâmetros. O número de camadas pode ser inicialmente estipulado pelo perfil da curva $\rho \times a$ obtida em campo, pois trechos ascendentes e descendentes da curva marcam a transição entre camadas, ou de forma equivalente, basta analisar o número de concavidades (MARTINS-BRITTO, 2017).

2.4 ATERRAMENTO DE EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS SENSÍVEIS

Levando em consideração os danos mencionados em 2.2.4, historicamente, houve uma evolução gradual dos métodos de aterramento para equipamentos sensíveis, como sistemas baseados em microprocessadores (computadores, controladores lógicos programáveis, sistemas de controle distribuído em plantas industriais, sistemas de telecomunicações, sistemas de imagens médicas para diagnóstico e outros dispositivos eletrônicos sensíveis relacionados). Os baixos níveis de tensão dos sinais manipulados por esses equipamentos os tornam suscetíveis a interferências e flutuações de tensão que, comumente, não representam problemas para equipamentos de maior potência (IEEE, 2007).

2.4.1 Uso do aterramento convencional

O sistema de aterramento elétrico convencional é amplamente estabelecido e demonstra excelente desempenho quando devidamente projetado. Nesse contexto, quando a utilização em larga escala de equipamentos eletrônicos teve início, optou-se pelo emprego do sistema convencional para equalizar o potencial dos equipamentos sensíveis, pois ele atendia aos requisitos de segurança em situações de falhas fase-terra. Todavia, as malhas de terra destinadas a equipamentos de alta potência são inadequadas quando se trata de equipamentos sensíveis. Isso se deve ao fato de que, em condições normais de operação, essas malhas frequentemente conduzem correntes espúrias. Essas correntes são originadas por diversos fatores, como correntes anódicas ou catódicas, correntes de fuga naturais, induções eletromagnéticas e outros. Por outro lado, em situações transitórias, como curtos-circuitos à terra ou descargas atmosféricas, as correntes que fluem pelo sistema de aterramento podem atingir níveis extremamente elevados. Portanto, fica evidente que o sistema de aterramento com um potencial fixo e constante, que é adequado para equipamentos eletrônicos sensíveis, não é o mesmo sistema de aterramento projetado para sistemas de alta potência (MORENO, 2018).

2.4.2 Uso do aterramento isolado

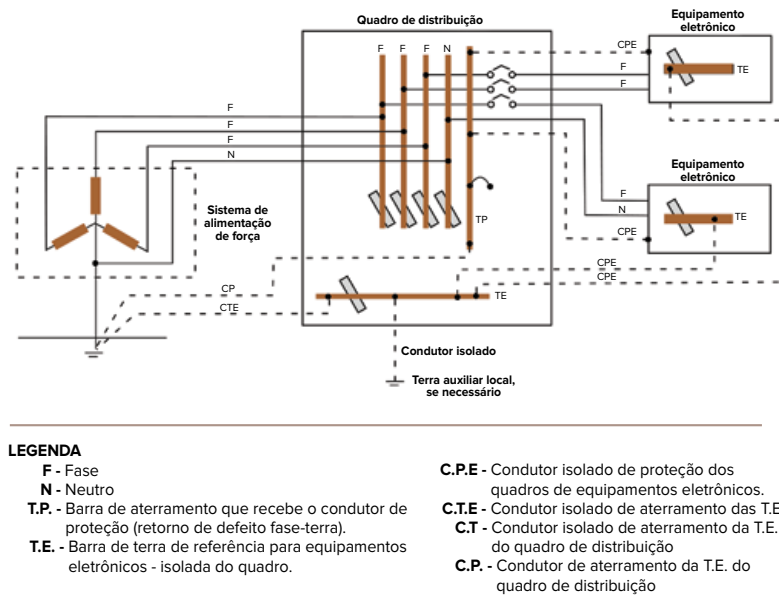
Após a constatação de que os sistemas de aterramento elétrico convencionais não eram apropriados para os equipamentos eletrônicos, a próxima etapa consistiu na implementação de um sistema de aterramento isolado e independente, especificamente destinado a esses dispositivos. Essa solução abordou parcialmente o problema, uma vez que conseguiu efetivamente controlar alguns aspectos negativos das redes elétricas, principalmente ao reduzir as correntes espúrias (IEEE, 2007).

No entanto, ainda persistiam inconsistências significativas, como a falta de compatibilidade entre o aterramento do invólucro metálico dos equipamentos e o aterramento dos próprios dispositivos eletrônicos. Além disso, mesmo que o solo apresentasse alta resistividade, ainda agia como um condutor, resultando em uma conexão resistiva (para frequências baixas) e capacitiva (para frequências altas) entre os dois sistemas. Isso poderia levar a diferenças de potencial entre as malhas, criando riscos à segurança (MORENO, 2018).

2.4.3 Aterramento de ponto único

Esse método busca prevenir a possível diferença de potencial entre as malhas advinda do sistema isolado. A referência dos circuitos eletrônicos permanecem separados das carcaças nos dispositivos que assim possibilitam. As barras de aterramento dos dispositivos são mantidas isoladas e conectadas por meio de condutores isolados que se estendem radialmente em direção a uma barra de aterramento geral. Essa barra de aterramento geral normalmente está localizada no painel de distribuição de energia dos equipamentos. Ainda assim, essa barra permanece isolada do painel de distribuição principal, mas conecta-se a um único ponto do sistema de aterramento de energia. Portanto, a equalização entre as duas redes é estabelecida por meio dessa conexão. Esse sistema tem barra de neutro; barra de terra, que recebe os cabos radiais de aterramento das carcaças dos quadros de sustentação dos equipamentos eletrônicos (também ligada à carcaça do quadro); barra de terra isolada da carcaça (própria para aterramento dos equipamentos eletrônicos) (IEEE, 2007).

Figura 2.6. Sistema de aterramento de ponto único para equipamentos eletrônicos (sem transformador de isolamento).



Fonte: Aterramento Elétrico. International Copper Association Brazil (MORENO, 2018).

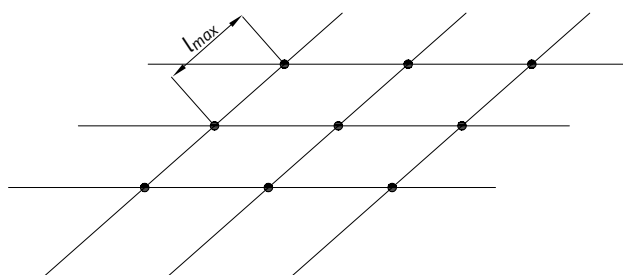
2.4.4 Malha de terra de referência (MTR)

O sistema de malha de terra de referência é o método mais atual para equipotencialização de dispositivos eletrônicos sensíveis. Seu princípio de funcionamento fundamenta-se no conhecido princípio de condução em linhas de transmissão. Estabelece que se o comprimento do condutor não for superior a 5% do comprimento de onda do sinal a diferença de potência em suas extremidades é desprezível. Sendo assim, esse critério é usado para determinar o comprimento da malha de aterramento de referência (MTR) e assim elimina os problemas em baixa e alta frequência, além de equipotencializar todo o sistema (IEEE, 2007).

$$l_{max} = \frac{c \times 0,05 \text{ [m/s]}}{f \text{ [Hz]}}, \quad (2.5)$$

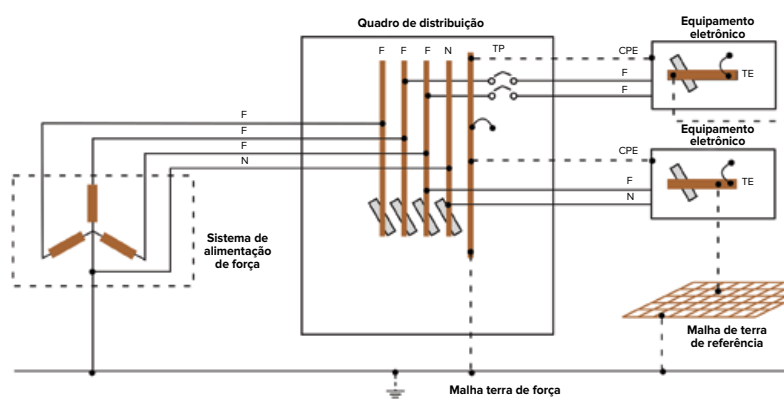
l_{max} representado na Figura 2.7, c a velocidade de propagação da onda e f sua respectiva frequência.

Figura 2.7. Malha de terra de referência



Fonte: adaptado de (MORENO, 2018).

Figura 2.8. Sistema de aterramento utilizando malha de terra de referência.



NOTAS

- 1 - Ver legenda na Figura 21
- 2 - A conexão da barra de terra de referência dos equipamentos eletrônicos (TE) à MTR deve ser feita preferencialmente com fita ou cordoalha, de comprimento máximo igual ao adotado entre condutores da MTR
- 3 - A conexão de equalização entre a MTR e a malha de terra de força é para baixas frequências, principalmente para atender o critério de segurança pessoal. Podem existir mais de uma dessas conexões, sem prejuízo para o funcionamento do sistema.

Fonte: Aterramento Elétrico. International Copper Association Brazil (MORENO, 2018).

2.5 MÉTODOS COMPUTACIONAIS MODERNOS PARA PROJETO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO

O avanço tecnológico dos computadores possibilitou uma expansão significativa dos métodos eletromagnéticos computacionais, permitindo a resolução numérica de uma ampla variedade de problemas, como a dispersão de alvos de radar e o projeto preciso de antenas e dispositivos de microondas. Os métodos contemporâneos no domínio do tempo baseiam-se em equações diferenciais aproximadas por diferenças finitas (FDTD) ou em equações integrais aproximadas por somas finitas (ELSHARBENI; DEMIR, 2015). Já no domínio da frequência, para a resolução

de equações integrais quando o integrando é desconhecido, a equação integral é discretizada em um conjunto de equações lineares e organizada em uma topologia matricial (método dos momentos - MoM) (ALIPIO *et al.*, 2008).

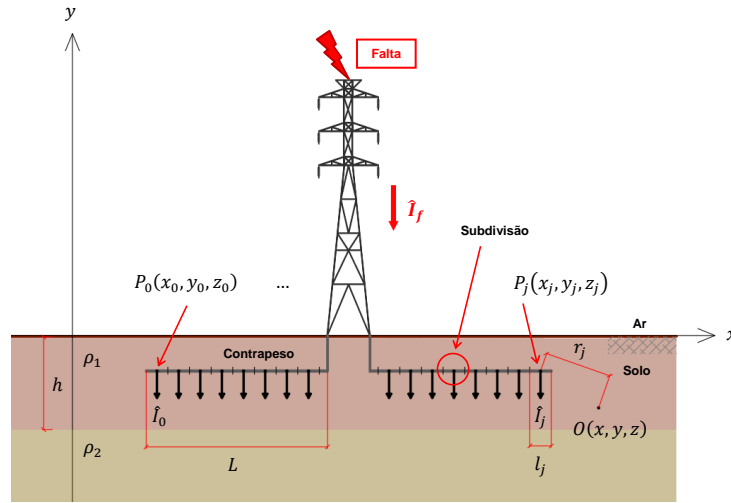
Antes desse avanço substancial, a maioria das previsões eletromagnéticas ocorria no domínio da frequência, onde o comportamento harmônico no tempo era assumido. Essa abordagem era preferível, pois no domínio da frequência era possível obter soluções analíticas para diversos problemas canônicos, permitindo a fácil confrontação e validação dos métodos computacionais numéricos. Além disso, o *hardware* experimental disponível para fazer medições nos anos anteriores estava predominantemente limitado à abordagem no domínio da frequência (ELSHERBENI; DEMIR, 2015).

No entanto, com o advento de computadores mais poderosos, tornou-se viável realizar modelagens no domínio do tempo. Esses métodos, além de serem mais simples do ponto de vista equacional, uma vez que não exigem funções assintóticas ou funções de Green complexas, possibilitam uma compreensão mais direta e simples dos fenômenos eletromagnéticos e também a modelagem de problemas com geometrias arbitrárias, tornando-os mais versáteis e aplicáveis a uma variedade de situações (ELSHERBENI; DEMIR, 2015).

2.5.1 Método dos momentos - MoM

Uma abordagem robusta em modelos computacionais leva em consideração não apenas as dimensões físicas dos eletrodos de aterramento, mas também a estratificação do solo em camadas horizontais, como discutido anteriormente. No contexto do modelo de aterramento com parâmetros distribuídos, ilustrado na Figura 2.9, os condutores de aterramento são divididos em segmentos de comprimento Δl , suficientemente pequenos para serem tratados como fontes filamentosas de corrente, localizadas no ponto médio de cada segmento, cada uma contribuindo com uma corrente \hat{I}_j para o solo (MARTINS-BRITTO, 2017).

Figura 2.9. Ilustração esquemática do modelo de aterramento a parâmetros distribuídos.



Fonte: Modelagem das interferências eletromagnéticas entre linhas de transmissão e tubulações metálicas subterrâneas e análise de impactos (MARTINS-BRITTO, 2017).

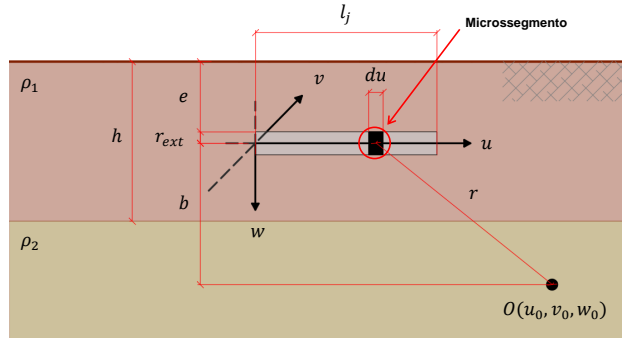
Sob essas condições, o princípio da superposição é aplicável, o que significa que o potencial no solo \hat{U}_s em um ponto de observação $O(x, y, z)$ pode ser obtido somando-se as contribuições individuais de cada segmento.

A modelagem matemática do eletrodo filamentoar parte do estudo de um eletrodo pontiforme. Os potenciais escalares \hat{U}_j , gerados no ponto de observação $O(u_0, v_0, w_0)$ por uma fonte de corrente \hat{I}_j concentrada no ponto de origem de um sistema de coordenadas uvw , são determinados usando o método das Imagens Complexas, cujo equacionamento depende da camada de injeção da corrente e do ponto de observação da tensão \hat{U}_j , que podem ser escritos de forma simplificada como:

$$\hat{U}_j = \hat{I}_j A \Gamma \psi(x) \quad [V], \quad (2.6)$$

em que \hat{I}_j é a corrente injetada no solo pelo j-ésimo segmento; A é uma constante e Γ é um operador que representa a soma adequada de uma função auxiliar $\psi(x)$, sendo que A e Γ dependem das posições relativas dos pontos de fonte e de observação (MARTINS-BRITTO, 2017).

Figura 2.10. Eletrodo filamental em solo de duas camadas.



Fonte: Modelagem das interferências eletromagnéticas entre linhas de transmissão e tubulações metálicas subterrâneas e análise de impactos (MARTINS-BRITTO, 2017).

De modo mais geral, pode-se segmentar um eletrodo de comprimento l_j em segmentos du conforme a Figura 2.10. Além disso, define-se a densidade de corrente δ_j :

$$\delta_j = \frac{\hat{I}_j}{l_j} \quad [A/m], \quad (2.7)$$

em que a corrente incremental de vazamento do segmento du é $d\hat{I}_j = \delta_j du [A]$ e pela Equação 2.6 pode-se escrever $d\hat{U}_j = \delta_j A \Gamma \psi(x) du$ e, finalmente, obtém-se o método da Segmentação-Integração que foi proposto por (DAWALIBI; MUKHEDKAR, 1975):

$$\hat{U}_j = \delta_j A \left\{ \Gamma \int \psi(x) du \right\} [V]. \quad (2.8)$$

Tendo em vista que as densidades lineares de corrente não são dados disponíveis diretamente e sim a corrente de falta ou a elevação do potencial dos eletrodos de aterramento em relação a uma referência remota (GPR) no momento do defeito, existe a necessidade de determinar a distribuição de corrente de falta ao longo dos condutores e eletrodos de aterramento, o que pode ser obtido pela abordagem matricial de (DAWALIBI; MUKHEDKAR, 1975).

Supondo que os eletrodos de aterramento sejam condutores perfeitos e, conseqüentemente, um sistema equipotencial, e seja a elevação de potencial em um ponto da superfície de um dos eletrodos o GPR em um ponto O , tem-se que:

$$GPR = \sum_{j=1}^N \hat{U}_j(O) \quad [V], \quad (2.9)$$

define-se a densidade de corrente normalizada λ_j :

$$\lambda_j = \frac{\delta_j}{GPR} \left[\frac{A}{mV} \right], \quad (2.10)$$

que pode ser reescrita em formato matricial expandida com algumas manipulações algébricas:

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & \cdots & R_{1,N} \\ R_{2,1} & R_{2,2} & \cdots & R_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{N,1} & R_{N,2} & \cdots & R_{N,N} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2.11)$$

os elementos da matriz são obtidos fazendo a densidade de corrente unitária em cada condutor filamento modelado. Além disso, se $j = k$, o ponto de observação está localizado na superfície do j -ésimo segmento. Se $j \neq k$, o ponto de observação está situado no centro do k -ésimo segmento. Vale ressaltar que apesar dos elementos da matriz possuírem unidade de Ω e recebem o nome tradicional de resistências mútuas os, referidos elementos não possuem significado físico real, sendo meros coeficientes proporcionais à transferência de energia entre o ponto fonte e de observação (MARTINS-BRITTO, 2017), ou momentos.

2.5.2 Método das diferenças finitas no domínio do tempo - FDTD

O método das diferenças finitas no domínio do tempo é uma abordagem computacional que no contexto de estudo se fundamenta nas equações diferenciais de Maxwell (ELSHARBENI; DEMIR, 2015):

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\vec{D}}{\partial t}, \quad (2.12)$$

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

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_e, \quad (2.14)$$

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

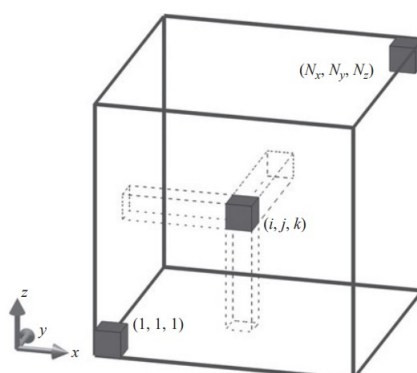
em conjunto com as relações constitutivas:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}, \quad (2.16)$$

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

No método FDTD a solução das equações de Maxwell, acompanhadas das condições de contorno apropriadas, é obtida usando o algoritmo modificado de Yee, que representa de forma discreta as equações de Maxwell tanto no espaço quanto no tempo por meio de diferenças centradas de segunda ordem, devido sua maior precisão. Sendo assim, as componentes dos campos elétricos e magnéticos são amostradas por meio da divisão da geometria tridimensional do problema em células para formar uma grade conforme a Figura 2.11 (MARTINS-BRITTO *et al.*, 2019).

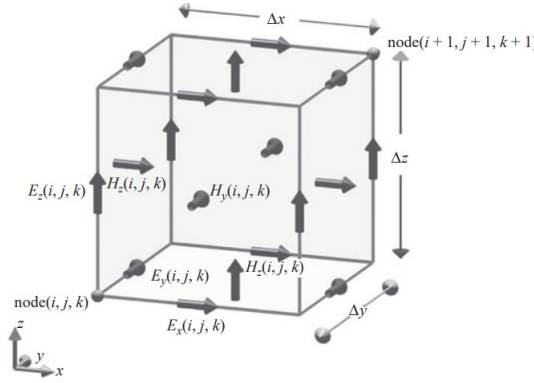
Figura 2.11. Espaço computacional tridimensional FDTD composto por células Yee.



Fonte: The Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetics with MATLAB® Simulations (ELSHARBENI; DEMIR, 2015).

As componentes de campo de uma célula Yee conforme a Figura 2.12 são obtidas pela solução no domínio do tempo das equações de Maxwell conforme o algoritmo modificado de Yee expresso nas Equações de 2.18 a 2.26 (MARTINS-BRITTO *et al.*, 2019).

Figura 2.12. Arranjo dos componentes do campo em uma célula Yee indexada como (i, j, k) .



Fonte: The Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetics with MATLAB® Simulations(ELSHERBENI; DEMIR, 2015).

$$H_x^n(i, j, k) = H_x^{n-1}(i, j, k) + \tilde{E}_y^{n-1}(i, j, k+1) - \tilde{E}_y^{n-1}(i, j, k) - \tilde{E}_z^{n-1}(i, j+1, k) + \tilde{E}_z^{n-1}(i, j, k), \quad (2.18)$$

$$H_y^n(i, j, k) = H_y^{n-1}(i, j, k) + \tilde{E}_z^{n-1}(i+1, j, k) - \tilde{E}_z^{n-1}(i, j, k) - \tilde{E}_x^{n-1}(i, j, k+1) + \tilde{E}_x^{n-1}(i, j, k), \quad (2.19)$$

$$H_z^n(i, j, k) = H_z^{n-1}(i, j, k) + \tilde{E}_x^{n-1}(i, j+1, k) - \tilde{E}_x^{n-1}(i, j, k) - \tilde{E}_y^{n-1}(i+1, j, k) + \tilde{E}_y^{n-1}(i, j, k), \quad (2.20)$$

$$\tilde{E}_x^n(i, j, k) = Ca(m)\tilde{E}_x^{n-1}(i, j, k) + Cb(m)[H_z^{n-1}(i, j, k) - H_z^{n-1}(i, j-1, k) - H_y^{n-1}(i, j, k) + H_y^{n-1}(i, j, k-1)], \quad (2.21)$$

$$\tilde{E}_y^n(i, j, k) = Ca(m)\tilde{E}_y^{n-1}(i, j, k) + Cb(m)[H_x^{n-1}(i, j, k) - H_x^{n-1}(i, j, k-1) - H_z^{n-1}(i, j, k) + H_z^{n-1}(i-1, j, k)], \quad (2.22)$$

$$\tilde{E}_z^n(i, j, k) = Ca(m)\tilde{E}_z^{n-1}(i, j, k) + Cb(m)[H_y^{n-1}(i, j, k) - H_y^{n-1}(i-1, j, k) - H_x^{n-1}(i, j, k) + H_x^{n-1}(i, j-1, k)], \quad (2.23)$$

$$R = \frac{\Delta t}{2\epsilon_0}, \quad R_a = \left(\frac{c\Delta t}{\Delta} \right)^2, \quad R_b = \frac{\Delta t}{\mu_0\Delta}, \quad \tilde{E} = R_b E, \quad (2.24)$$

$$C_a = \frac{1 - \frac{R\sigma(i,j,k)}{\epsilon_r(i,j,k)}}{1 + \frac{R\sigma(i,j,k)}{\epsilon_r(i,j,k)}}, \quad C_b = \frac{R_a}{\epsilon_r(i,j,k)R\sigma(i,j,k)\epsilon_r(i,j,k)}, \quad (2.25)$$

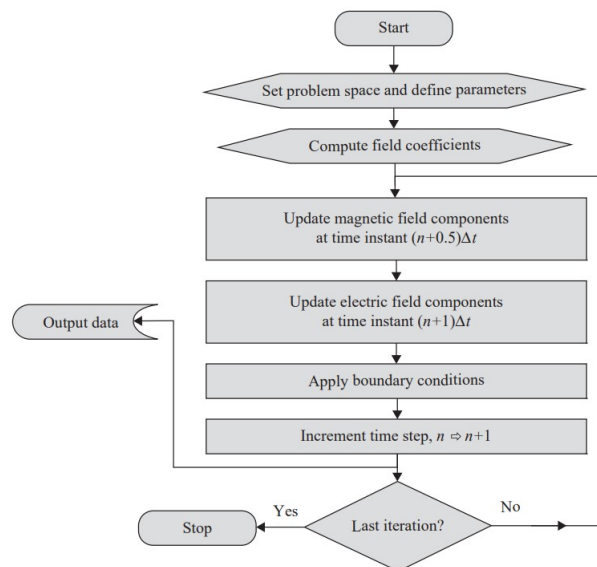
em que os subscritos x , y e z denotam as respectivas componentes dos campos magnéticos \vec{H} em A/m e dos campos elétricos \vec{E} em V/m; ϵ é a permissividade elétrica em F/m; μ é a permeabilidade magnética em H/m; Δt é o intervalo de tempo em segundos; c é a velocidade da luz em m/s; Δ é a unidade de discretização espacial em metros; e σ é a condutividade elétrica em Siemens.

Além disso, o incremento de tempo Δt deve satisfazer a condição de estabilidade numérica:

$$c_{\max}\Delta t = \left[\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (2.26)$$

em que c_{\max} é a velocidade máxima de propagação da onda dentro do domínio, e Δx , Δy e Δz são as unidades de discretização espacial do domínio e o algoritmo geral é sintetizado na Figura 2.13 (ELSHERBENI; DEMIR, 2015).

Figura 2.13. Fluxograma FDTD.



Fonte: The Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetics with MATLAB® Simulations (ELSHERBENI; DEMIR, 2015).

Para $t \leq 0$, todas as componentes dos campos eletromagnéticos são nulas, e as equações acima são iteradas durante o período de tempo desejado. Além disso, a modelagem de problemas de campo aberto em FDTD requer condições de contorno absorventes, garantindo que as ondas eletromagnéticas sejam completamente absorvidas em uma fronteira. A camada perfeitamente combinada (PML), introduzida por Berenger, demonstra ser uma das técnicas mais robustas para esse propósito. Essa técnica envolve cercar o domínio computacional com um material de espessura finita baseado em parâmetros constitutivos fictícios, criando assim uma condição de casamento de impedância de ondas independente dos ângulos e frequências da onda incidente (MARTINS-BRITTO *et al.*, 2019).

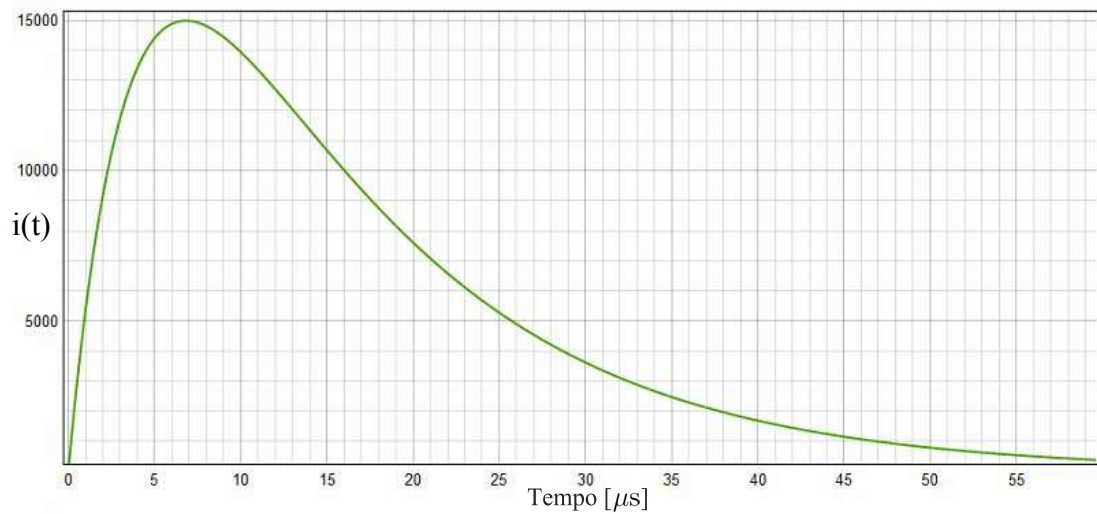
2.6 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

São fenômenos abruptos e intensos de transferência de cargas elétricas entre a atmosfera e a superfície terrestre, uma vez que um campo elétrico forte o suficiente é formado e o limiar de ruptura é atingido, é estabelecido um canal condutor de relâmpago composto por plasma ionizado, pelo qual a corrente de descarga flui (RAKOV VLADIMIR, 2003). Pode apresentar uma ou várias componentes, tais como descargas descendentes, ascendentes, curtas, longas e múltiplas (ABNT, 2015). Normalmente, as descargas atmosféricas, devido à sua natureza, têm uma duração na ordem de microssegundos e amplitudes na ordem de kiloampéres, sendo comumente descritas por meio de funções de decaimento exponencial duplo (LUO *et al.*, 2018), conforme expresso na Equação 2.27:

$$i(t) = A_r I_l (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), \quad (2.27)$$

em que A representa o coeficiente de correção para a magnitude, I_l é a amplitude da descarga atmosférica, α é o coeficiente que influencia o tempo de subida, e β é o coeficiente que afeta o tempo de descida do pulso (LUO *et al.*, 2018).

O estudo atual empregou a forma de uma descarga atmosférica com duração de $7/20 \mu s$, conforme ilustrado na Figura 4.2. Os parâmetros que caracterizam essa forma de onda são $\alpha = 7,714 \times 10^4$, $\beta = 2,49 \times 10^5$, $A = 2,447$, e $I_l = 15 \text{ kA}$.

Figura 2.14. Descarga atmosférica 7/20 μs .

Fonte: Autoria própria.

2.7 SÍNTESE DO CAPÍTULO

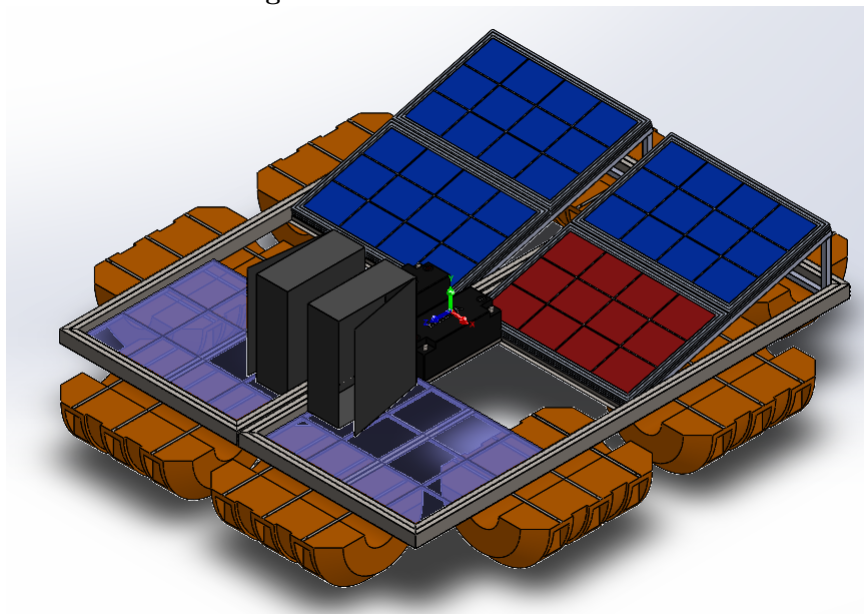
O capítulo abordou diversos aspectos críticos relacionados à segurança e eficiência dos sistemas de aterramento. São discutidos os riscos associados ao aterramento inadequado, destacando os efeitos da corrente no corpo humano e falhas em equipamentos, a compreensão da resistividade elétrica do solo é explorada como um fator fundamental, influenciando diretamente a eficácia do sistema de aterramento. O capítulo também aborda os métodos computacionais utilizados no projeto de aterramento, oferecendo o entendimento necessário para uma visão crítica dos resultados obtidos por meio dessa abordagem.

PROJETO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO ELÉTRICO

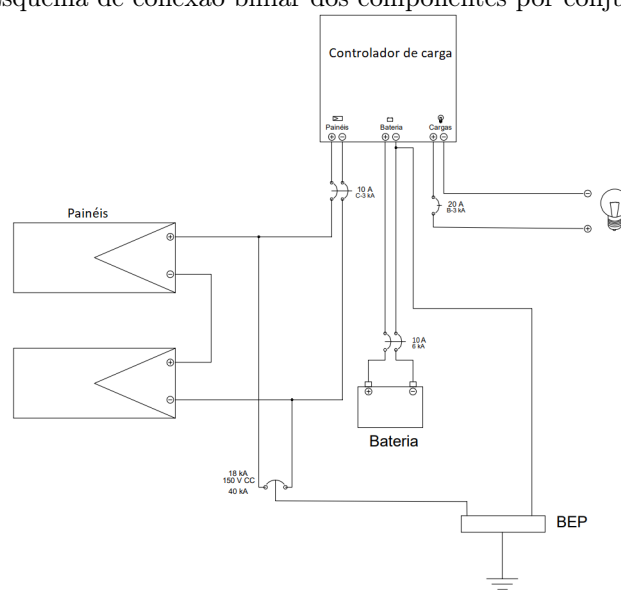
3.1 EQUIPAMENTOS

A plataforma de geração flutuante consiste em dois conjuntos de geração fotovoltaica, conforme as Figuras 3.1 e 3.2.

Figura 3.1. Plataforma flutuante.



Fonte: Projeto FAP DF - Placas flutuantes.

Figura 3.2. Esquema de conexão bifilar dos componentes por conjunto de geração.

Fonte: Autoria própria.

Cada conjunto de geração é composto por:

- Controlador de carga TRIRON2210N:

Tabela 3.1. Especificações técnicas TRIRON2210N.

Tensão nominal	12/24 VDC Auto
Corrente de carga nominal	20 A
Corrente de descarga nominal	20 A
Faixa de tensão das baterias	8~32 V
Tensão máxima de circuito aberto	100 V
Faixa de tensão MPP	(tensão na bateria +2 V) ~72 V
Máxima potência de entrada fotovoltaica	520 W/12 V ou 1040 W/24 V
Auto consumo	14 mA 12 V ou 15 mA 24 V
Queda de tensão no circuito de descarga	0,18 V
Coefficiente de compensação de temperatura	-3 mV/°C/2 V
Aterramento	Negativo comum
Proteção de curto-circuito	Sim
Corrente de curto-circuito máxima	4 x In (160 A)

Fonte: User Manual TRIRON N Series Modular MPPT Solar Charge Controller (Epever, 2017).

Figura 3.3. Controlador de carga TRIRON2210N.

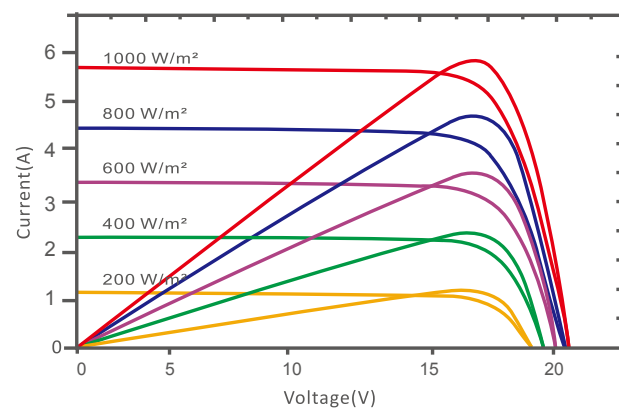
Fonte: User Manual TRIRON N Series Modular MPPT Solar Charge Controller (Epever, 2017).

- Dois painéis RSM-100P:

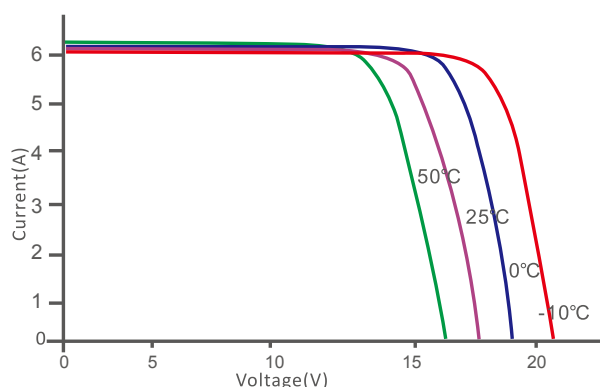
Tabela 3.2. Especificações elétricas RMS-100P.

Especificações elétricas RMS-100P	
Potência nominal - Pmax	100 W
Tensão de circuito aberto - Voc	21,58 V
Corrente de curto-circuito - Icc	6,04 A
Tensão de potência máxima - Vmp	17,40 V
Corrente de potência máxima - Imp	5,75 A
Eficiência do módulo (%)	15,44%

Fonte: ELECTRICAL DATA RMS-100P (RESUN SOLAR ENERGY, 2020).

Figura 3.4. Característica I-V dos painéis em diferentes irradiâncias.

Fonte: ELECTRICAL DATA RMS-100P (RESUN SOLAR ENERGY, 2020).

Figura 3.5. Característica I-V dos painéis em diferentes temperaturas.

Fonte: ELECTRICAL DATA RMS-100P (RESUN SOLAR ENERGY, 2020).

- Bateria para aplicação solar chumbo-ácida sem reposição de água 12MS234 de fabricação Moura, tensão nominal 12 V, corrente de curto-circuito máxima I_{CC} de 4843 A e resistência interna R_{int} de 2,4 m Ω .
- Quadro metálico composto por:
 - Disjuntor bipolar de fabricação WEG MDW C10 (proteção dos painéis);
 - Disjuntor monopolar de fabricação WEG MDW B20 (proteção das cargas);
 - Disjuntor bipolar de fabricação World Sun Light XL7-63 32 A (proteção da bateria);
 - DPS de fabricação Soprano classe II: I_{max} 45 kA, I_N 20 kA, U_p 2 kV, U_c 500 Vcc.

3.2 REQUISITOS MÍNIMOS

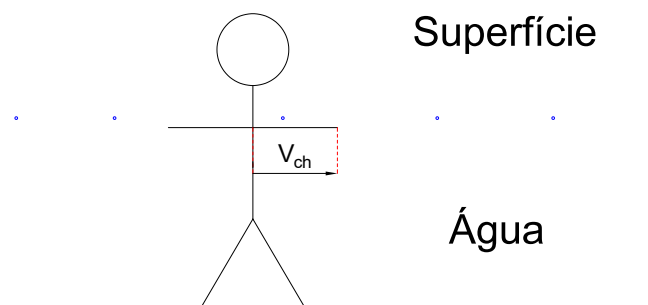
Os requisitos mínimos são balizados pela garantia da segurança em torno da plataforma em condições adversas onde as tensões na superfície da água são presentes, além de proporcionar uma sólida referência para o adequado funcionamento dos equipamentos eletrônicos. Considerando a natureza específica do problema, é necessário ajustar as convencionais tensões de passo e toque para se adequarem ao cenário.

Pode-se levar em consideração as tensões de toque quando uma pessoa a bordo de uma embarcação entra em contato com a plataforma enquanto ela está energizada. Nesse cenário, os critérios estabelecidos para as tensões de toque podem ser aplicados de maneira mais direta.

Por outro lado, pode ocorrer a situação em que um indivíduo fica parcialmente submerso próximo à plataforma em casos de falta. Nesse caso, o pior percurso de corrente corresponde ao caminho do peito para a mão esquerda devido o maior risco de fibrilação ventricular (IEC, 2016), conforme ilustra a Figura 3.6.

Neste contexto, é estabelecida a tensão V_{ch} , que representam a tensão no sentido horizontal à qual um indivíduo parcialmente submerso está exposto e que pode resultar na passagem de corrente pelo coração no sentido peito para a mão esquerda.

Figura 3.6. Tensões em caso de submersão parcial típica.



Fonte: Autoria própria.

Devido às características específicas do projeto, a zona DC-2 do gráfico representado na Figura 2.2 será adotada como o limite de segurança para a tensão mencionadas acima em sua faixa de longa duração, ou seja, será considerado um limite máximo de 30 mA CC. Isso se deve ao risco potencial de contração muscular involuntária, o que poderia resultar no afogamento da pessoa exposta. Todavia, os valores de corrente do gráfico da Figura 2.2 são para uma corrente que percorre o caminho mão esquerda até os pés. Para estabelecer o valor limite de V_{ch} é necessário aplicar o fator de correção da Tabela 2.2. Sendo assim, a corrente máxima permitida para V_{ch} é de 20 mA CC. Tal resultado é semelhante ao limite de corrente de longa duração alternada estabelecidas na NBR 15751 para 50% da população do sexo masculino.

$$I_{ch \ max} = \frac{30 \text{ mA}}{1,5} = 20 \text{ mA} \quad (3.1)$$

Para estabelecer a resistência do percurso da corrente em estudo serão definidos os fatores com base na IEC/TS-60.479-1 de 2016:

- F_1 : fator entre 0,9 e 0,7 pois a resistência para o caminho da corrente da mão para os pés é entre 90% a 70% do valor da resistência do caminho da mão direita para a mão esquerda;
- F_2 : fator igual a 0,524 correspondente ao caminho mão esquerda ao peito conforme a Figura 2.3;
- F_3 : fator 0,43 pois a resistência do corpo humano em condições de área de contato ampla e molhada é 42,8% da resistência com área ampla e seca.

O fator F_1 é necessário para usar a resistência experimental CC do caminho mão esquerda para mão direita ajustada para o caminho mão aos pés, pois o F_2 tem como referência a resistência da mão aos pés.

Por fim, adotando o valor experimental de 7275Ω correspondente a resistência CC para o caminho da mão direita para a mão esquerda e F_1 como 0,7:

$$R_{ch} = 7275 \Omega \times F_1 \times F_2 \times F_3 = 1147,44 \Omega, \quad (3.2)$$

tendo em vista que convencionalmente a resistência CC do corpo humano é dada como múltiplos de 25Ω obtém-se R_{ch} igual a 1150Ω o que resulta em V_{ch} limite de 23 V.

Para as tensões de toque será adotada a resistência do corpo humano, conforme especificado pela IEC TS 60479-1, que abrange 95% da população. O percurso da corrente será dos dois pés às duas mãos, correspondendo a 50% da resistência total do corpo humano, com a corrente limite conforme a curva DC-2 e com resistência nula nos pés e na camada superficial, além de uma superfície de contato molhada, o que resulta em 62,8 V de tensão de toque limite.

3.3 ANÁLISE DA RESISTIVIDADE E ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

As séries de medidas de resistência elétrica aparente m_1 e m_2 foram realizadas de acordo com o método de Wenner nas margens da barragem da Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília, como mostrado na Tabela 3.3 e Figura 3.7. Essas medidas foram feitas rente à margem, ou seja, em condições elevadas de saturação hídrica, a fim de obter uma representação mais precisa do solo completamente submerso.

Tabela 3.3. Resistências aparentes medidas nas margens da barragem.

Distância [m]	Resistência aparente [Ω]	
	m_1	m_2
0,2	173,3	415
0,4	136,2	260
0,6	101,4	152,2
0,8	84,8	100
1	70,2	68
2	35,5	16,13
4	25,4	4,49
8	23,2	2,9
16	15,9	2,8
32	7,74	2,02

Fonte: Autoria própria.

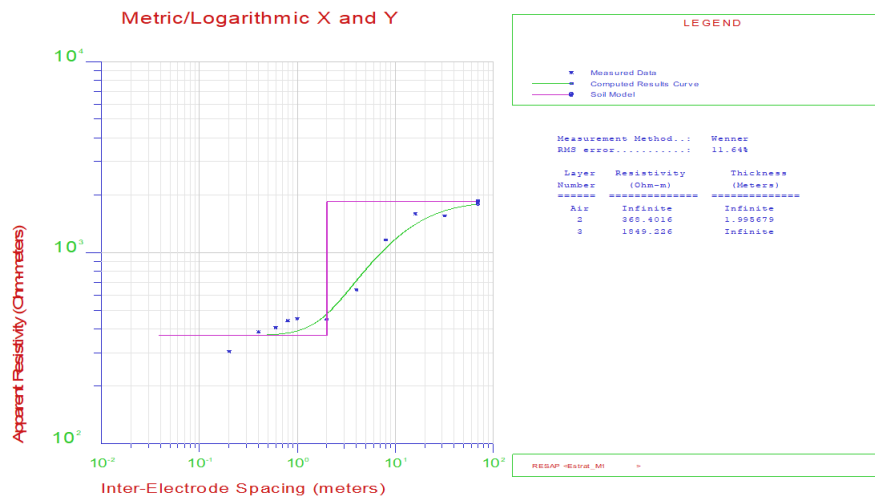
Figura 3.7. Locais de medidas - Barragem Água Limpa.



Fonte: Adaptado do Google Earth.

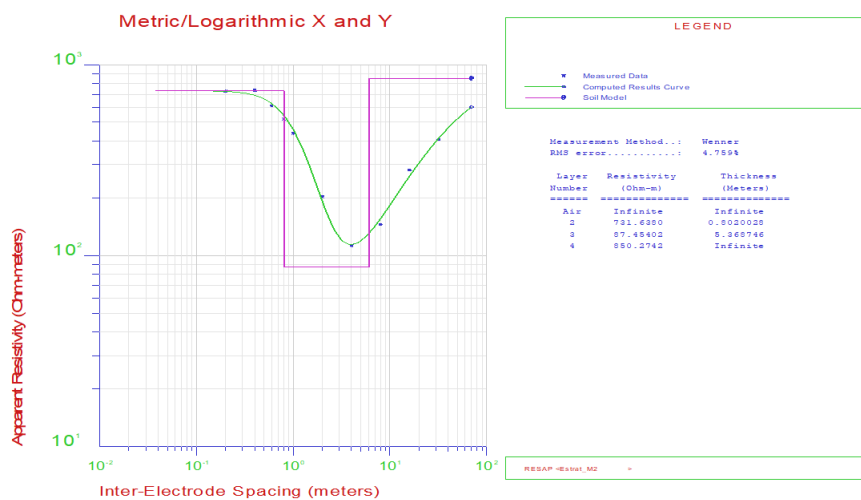
Por meio do método de estratificação multicamadas a série de medidas m_1 apresenta um modelo com duas camadas, onde a camada superior tem 1,99 m de profundidade e uma resistividade de 368,4 Ωm , e uma camada infinita com resistividade de 1849,2 Ωm , como mostrado na Figura 3.8. A segunda série de medidas apresenta um modelo com três camadas, com profundidades de 0,80 m, 5,37 m e infinita, e resistividades de 731,6 Ωm , 87,4 Ωm e 850,3 Ωm , respectivamente, conforme mostrado na Figura 3.9.

Figura 3.8. Estratificação m_1 .



Fonte: Autoria própria.

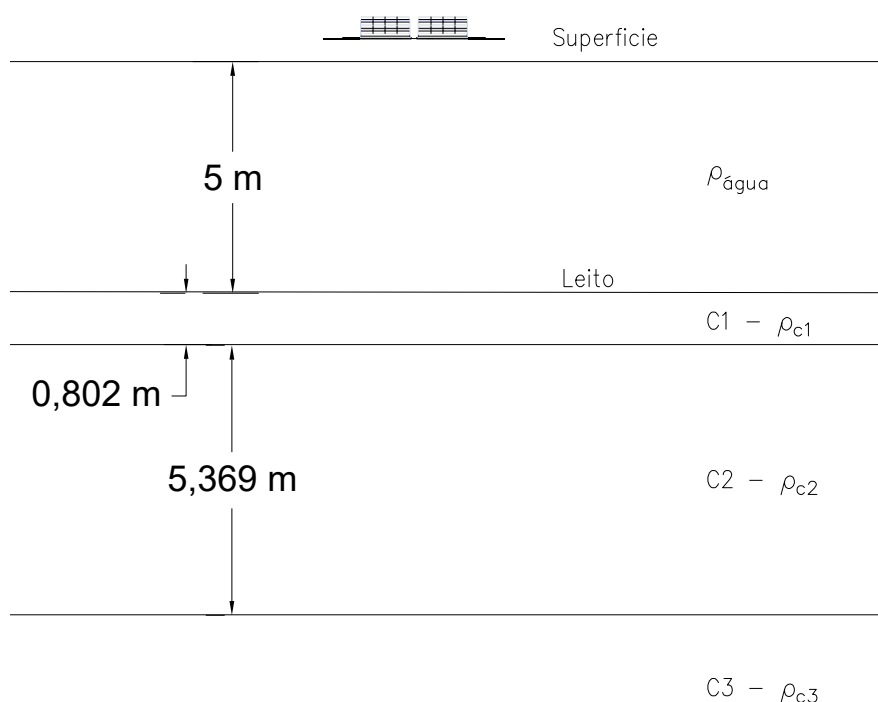
Figura 3.9. Estratificação m_2 .



Fonte: Autoria própria.

Para projeto será considerada a estratificação da Figura 3.9 com respectivas resistividades elétricas ρ_{c1} , ρ_{c2} e ρ_3 pois representa o pior caso devido sua maior resistividade na camada superior. Além disso, para completar o modelo a ser simulado, utilizou-se o valor típico da resistividade da água potável $\rho_{\text{água}}$ em $30 \Omega\text{m}$ (ABNT, 2020) e a resistividade do concreto saturado ρ_{concr} de $40 \Omega\text{m}$. Portanto, obtém-se o arranjo da Figura 3.10.

Figura 3.10. Arranjo a ser simulado.



Fonte: Autoria própria.

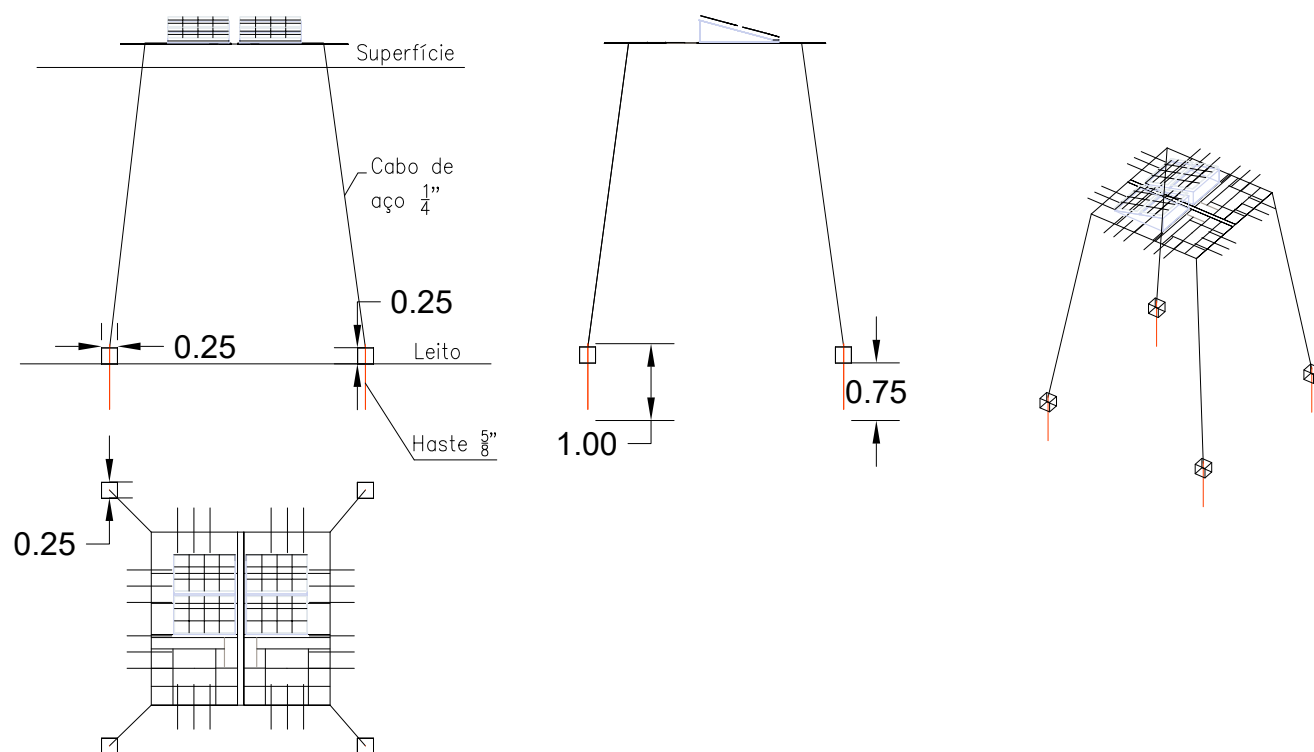
A estrutura metálica da plataforma fica acima da superfície devido a estrutura polimérica de flutuação.

3.4 ESQUEMA DE ATERRAMENTO PROPOSTO

Tendo em vista a necessidade de ancorar a plataforma para evitar sua deriva e considerando as limitações construtivas, adotou-se um esquema de aterramento modular. Isso foi necessário devido às limitações de transporte de carga da embarcação utilizada para montagem do sistema. O esquema inicial, ilustrado na Figura 3.11, consiste em quatro hastes de cobre 5/8" com 1

metro de comprimento, engastadas em blocos de concreto de $25 \times 25 \times 25$ cm, conectadas à plataforma por cabos de aço $1/4" 6 \times 19$ para proporcionar equipotencialização e fixação do sistema a fim de evitar sua deriva ao longo da barragem. O esquema será ajustado para mitigar tensões prejudiciais à segurança e reduzir a resistência de aterramento, se necessário. Como premissa de projeto, será considerada a profundidade da barragem em 5 metros.

Figura 3.11. Esquema de aterramento elétrico proposto.



Fonte: Autoria própria.

De acordo com o esquema inicial, a resistência de aterramento é de $1,5054 \Omega$. No entanto, a segunda camada de menor resistividade elétrica ainda não é alcançada pelos eletrodos.

De forma complementar estimou-se uma massa de eletrodo de sacrifício para proteção catódica tendo em vista as condições severas de instalação do sistema por meio das equações (ABNT, 2020):

$$D_C = 73,73 - 13,35 \times \log(\rho) \quad [\text{mA/m}^2]. \quad (3.3)$$

- D_C : densidade de corrente necessária à proteção;

- ρ : resistividade elétrica do meio ($2500 \Omega cm$);

$$I_t = A \times D_c \times (1 - E) \times f \times F \quad [\text{mA}]. \quad (3.4)$$

- I_t : corrente teórica de proteção catódica;
- A : área superficial dos condutores a serem protegidos da corrosão ($0,672 \text{ m}^2$);
- E : eficiência final estimada do revestimento dos condutores (nula pois não há revestimento);
- F : coeficiente de perdas (1);
- f : fator de correção da velocidade do eletrólito (1).

$$M = \frac{8760 \times V \times I_t}{C \times F_u} \quad [\text{kg}]. \quad (3.5)$$

- M : massa anódica de proteção;
- V : tempo de proteção (5 ano);
- C : capacidade de corrente por ânodo (1100 Ah/kg);
- F_u : fator de utilização (1);

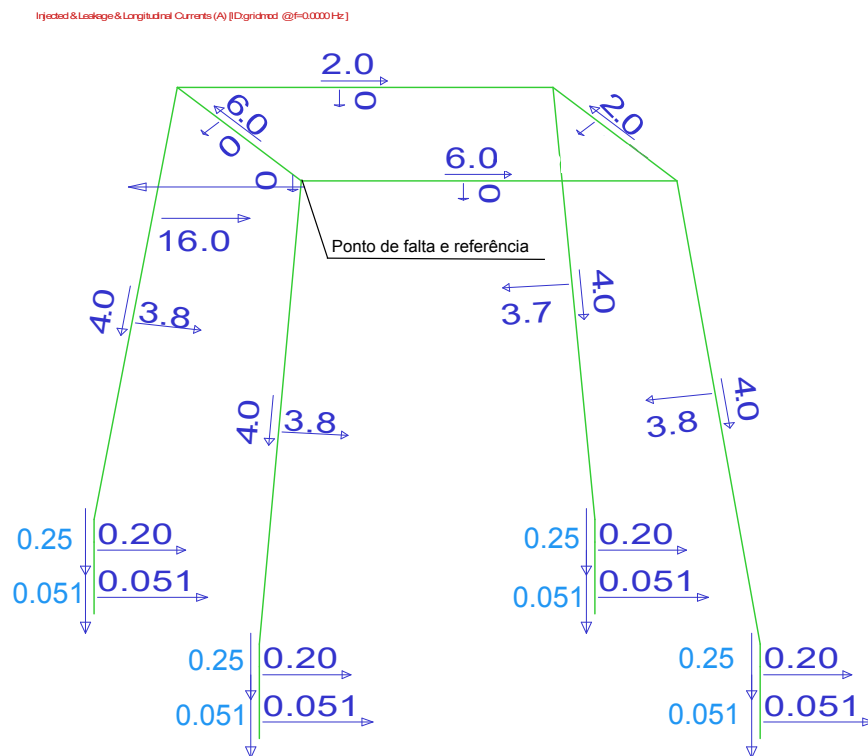
por fim, a massa de proteção total é aproximadamente 1 kg. Recomenda-se a instalação de 4 eletrodos de zinco para aplicação náutica de 250 g a serem distribuídos nos quatro condutores de descida ao leito.

3.5 SIMULAÇÃO DE FALTA À TERRA

O arranjo será testado para atender aos critérios de segurança relacionados à fonte de maior magnitude de curto-circuito, ou seja, a bateria. Portanto, supondo no pior cenário, em que ambas as baterias fornecem corrente de falha limitada apenas pela resistência de aterramento a corrente total de falha corresponde a 16 A (OLIVEIRA THIAGO R, 2014).

As tensões simuladas, denominadas como tensões de passo no ambiente de simulação (*step voltage*), foram ajustadas de modo a coincidirem numericamente com as tensões definidas como V_{ch} . Esse ajuste foi realizado ao modificar a resistência do corpo humano por meio de um fator de correção $f_a = R_{ch}/1000$, uma vez que a resistência típica do corpo humano é convencionalmente assumida como sendo de 1000Ω . Além disso, as resistências inerentes de cada pé em relação ao terra remoto foram consideradas como nulas, assim como a resistência mútua entre os dois pés. A resistividade do revestimento da superfície foi desconsiderada, e foi assumida uma distância constante de 1 metro entre os pontos por onde a corrente em estudo percorre.

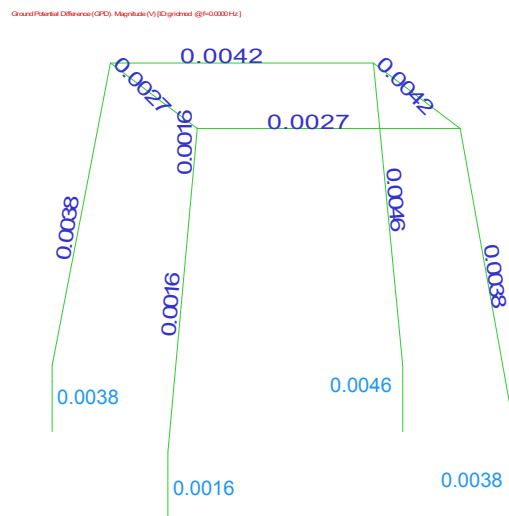
Figura 3.12. Corrente de falta, correntes injetadas e correntes longitudinais



Fonte: Autoria própria.

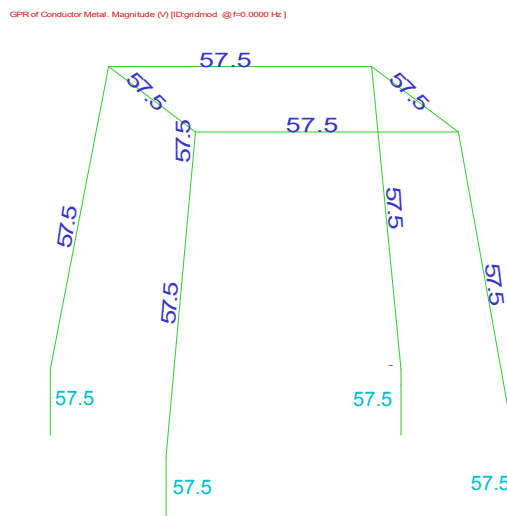
Na Figura 3.12, é apresentada a corrente de falta imposta à malha, o perfil de distribuição das correntes nos condutores de aterramento e hastes, além das correntes injetadas no meio. Observa-se que há uma distribuição uniforme, apesar de a aplicação da falta não ocorrer em um ponto simétrico da malha, pois os comprimentos dos condutores não são significativos para uma distribuição diversa.

Figura 3.13. Diferença de potencial ao longo do sistema de aterramento - GPD



Fonte: Autoria própria.

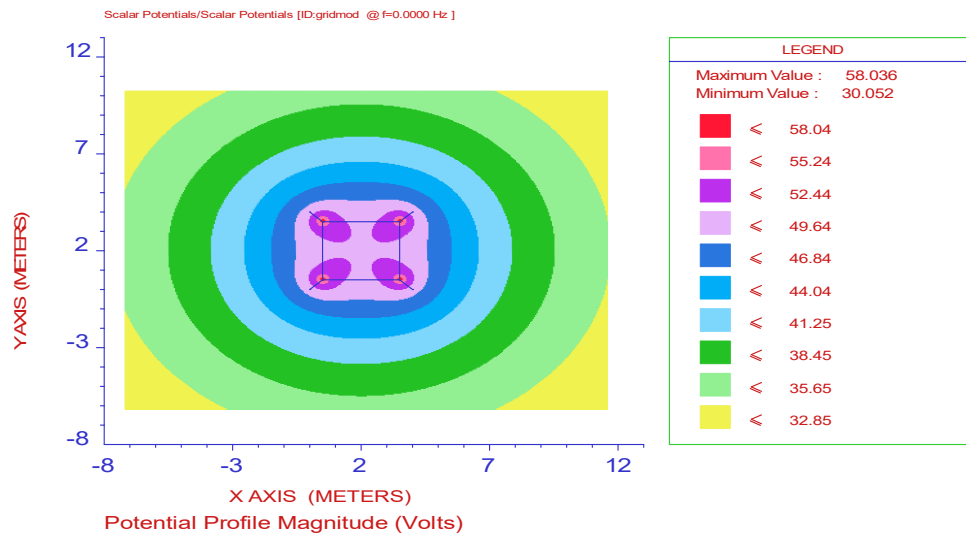
Figura 3.14. Elevação do potencial do arranjo de aterramento em relação ao terra remoto - GPR



Fonte: Autoria própria.

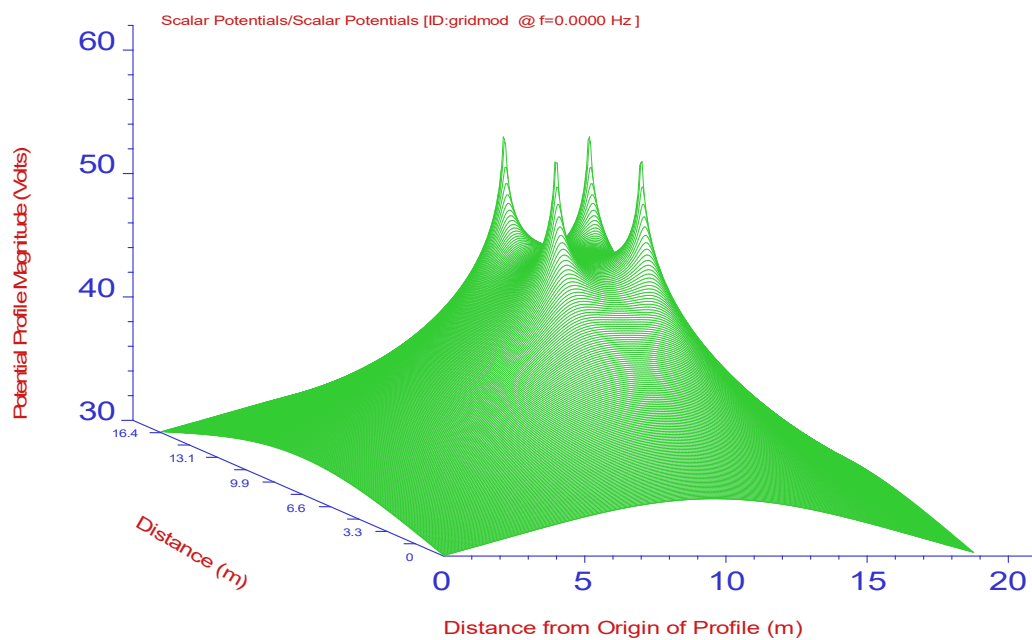
Nas Figuras 3.13 e 3.14, é apresentada a diferença de potencial ao longo dos condutores de aterramento e a elevação de potencial em relação ao terra remoto devido à corrente de falta em estudo.

Figura 3.15. Potencial Escalar 2D.



Fonte: Autoria própria.

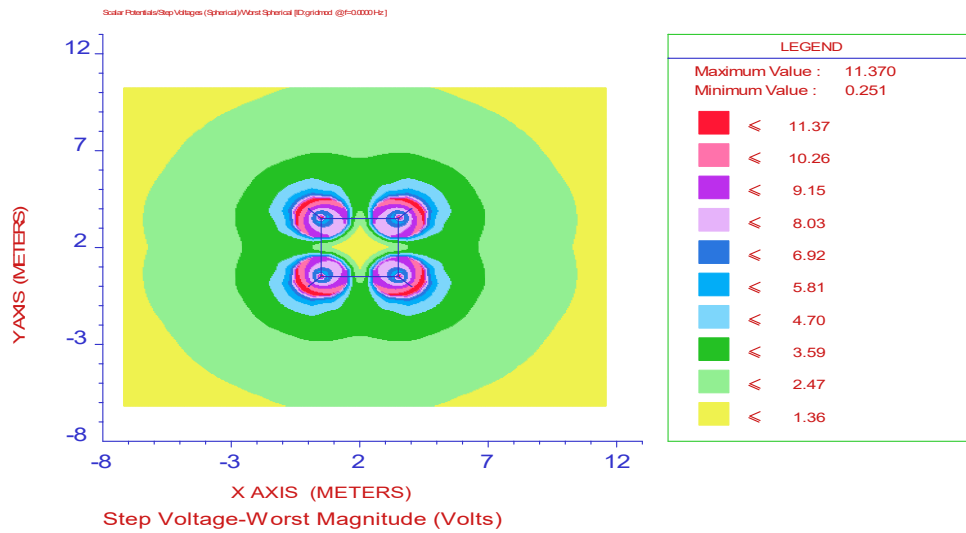
Figura 3.16. Potencial Escalar 3D.



Fonte: Autoria própria.

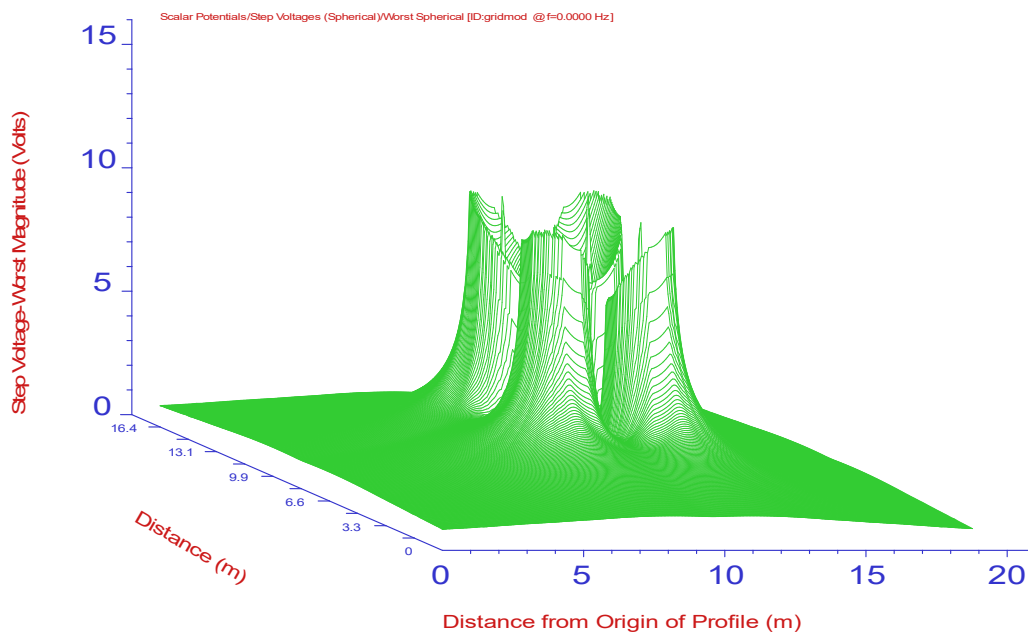
Nas Figuras 3.15 e 3.16, é apresentada a distribuição de potencial escalar na superfície da água. Observa-se um rápido decaimento do potencial com a distância, uma vez que o meio apresenta baixa resistividade.

Figura 3.17. Tensão V_{ch} 2D.



Fonte: Autoria própria.

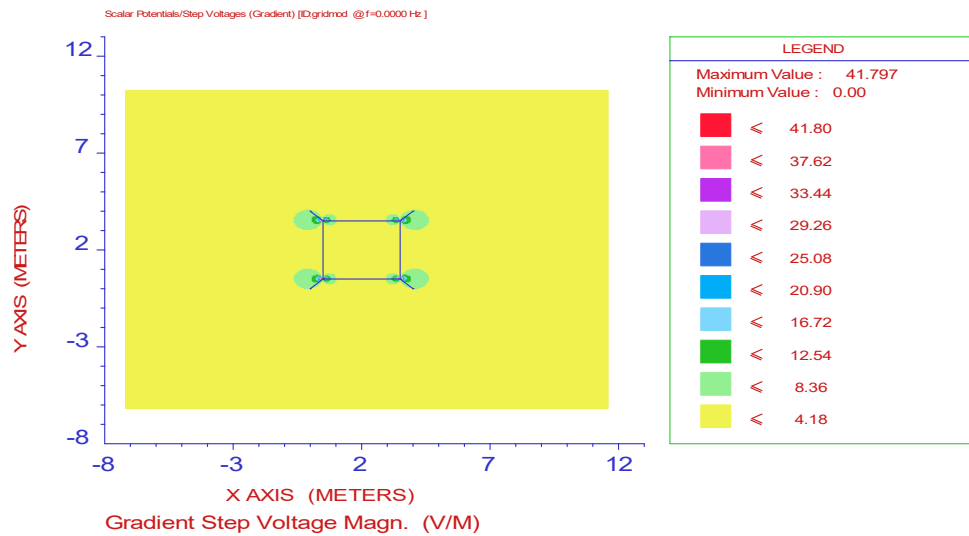
Figura 3.18. Tensão V_{ch} 3D.



Fonte: Autoria própria.

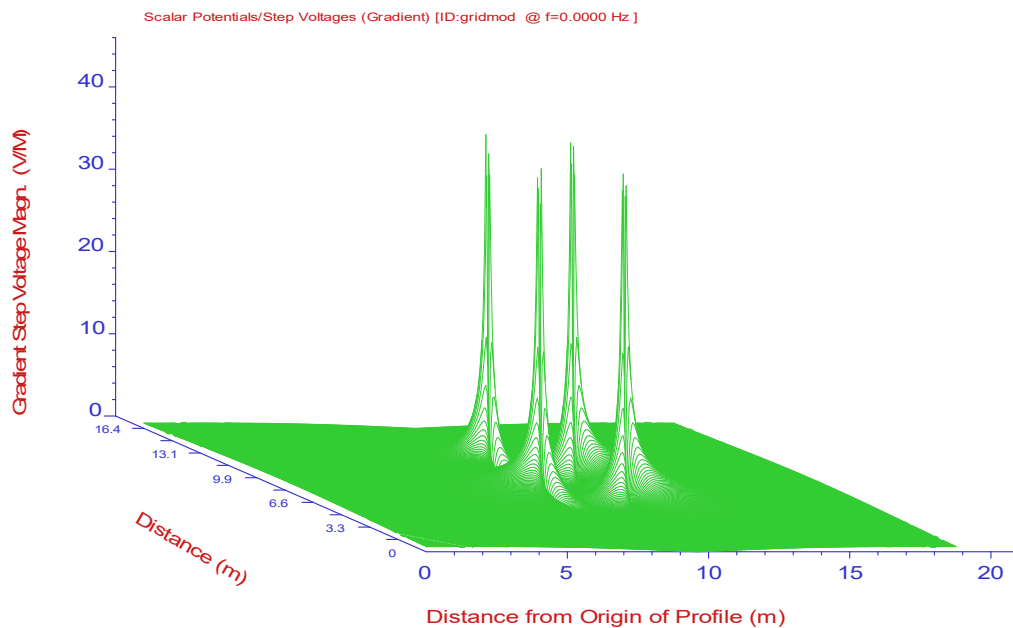
Nas Figuras 3.17 e 3.18, são apresentados os perfis da tensão de submersão parcial típica, definida como V_{ch} . Observa-se que os pontos mais críticos são em torno dos condutores de descida e hastes de aterramento.

Figura 3.19. Gradiente da tensão V_{ch} 2D.



Fonte: Autoria própria.

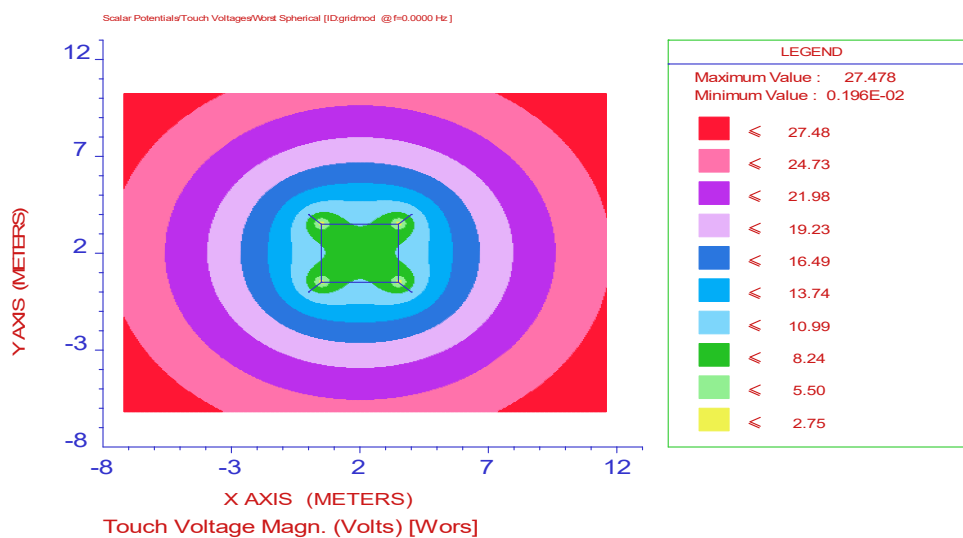
Figura 3.20. Gradiente da tensão V_{ch} 3D.



Fonte: Autoria própria.

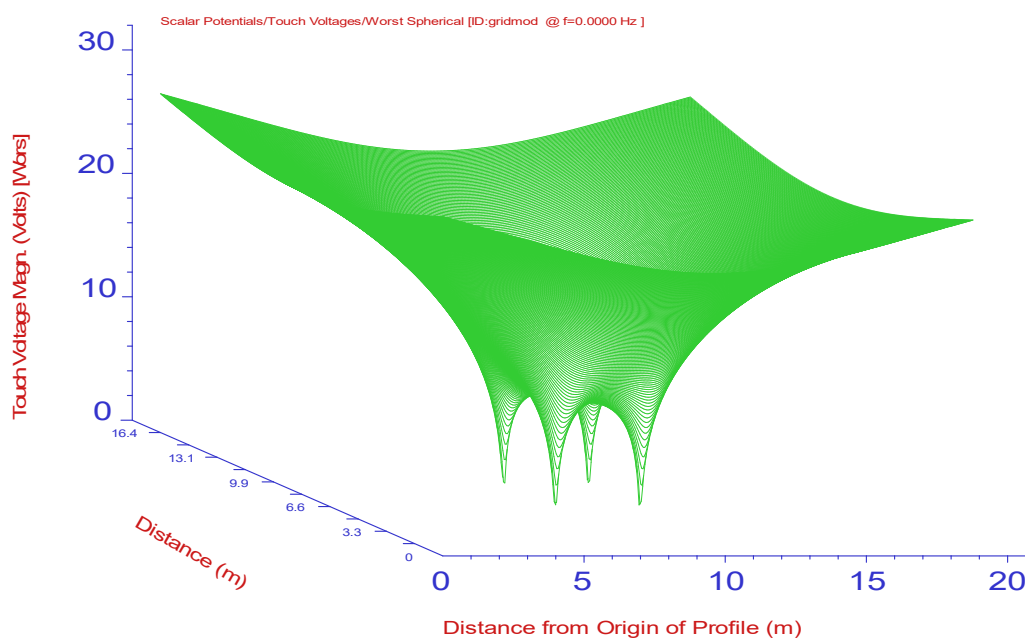
Nas Figuras 3.19 e 3.20, é apresentado o gradiente da tensão de submersão parcial típica. Observa-se que há picos próximos das hastes de aterramento; no entanto, ao redor da plataforma, o gradiente permanece abaixo de 4,18 V. Isso sugere que V_{ch} ao redor da plataforma não varia significativamente com a distância.

Figura 3.21. Tensão do toque escalar 2D.



Fonte: Autoria própria.

Figura 3.22. Tensão de toque escalar 3D.



Fonte: Autoria própria.

Nas Figuras 3.21 e 3.22, exibe-se os perfis de tensão de toque. Observa-se que, no pior caso, as tensões de toque serão numericamente iguais ao GPR para uma distância suficientemente longa, a qual, por sua vez, ainda não ultrapassa o limiar de segurança adotado.

3.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

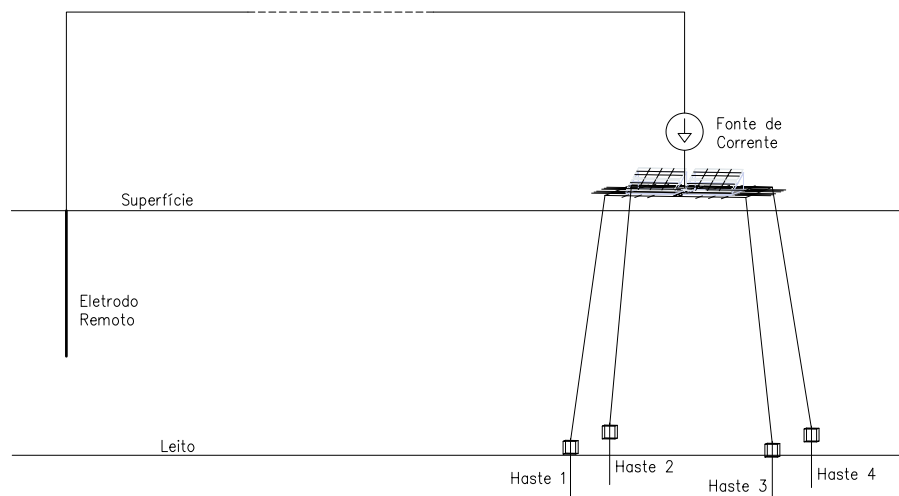
O capítulo oferece uma abordagem abrangente do projeto do sistema de aterramento, começando com a apresentação dos equipamentos relacionados à geração, controle e armazenamento de carga. Além disso, estabelece os requisitos mínimos e critérios de segurança, detalhando a estratificação do solo utilizada e apresentando o esquema de aterramento proposto. E por fim, no capítulo, examina-se a simulação de falta à terra.

É digno de nota que os valores de tensão de submersão parcial típica e de tensão de toque estão dentro dos limites estabelecidos. Além disso, os níveis de GPD demonstram-se adequados destacando a eficácia e a conformidade do sistema de aterramento proposto com os padrões de segurança estabelecidos.

RESPOSTA A DESCARGA ATMOSFÉRICA

Os estudos atuais por meio do método FDTD introduzem a corrente $I_s(t)$ proveniente da descarga atmosférica utilizando uma fonte de corrente e um eletrodo remoto que possibilita um caminho fechado para o distúrbio atmosférico. O eletrodo é posicionado em uma localização remota do sistema em estudo, tipicamente a uma distância superior a 100 metros para simular a corrente de descarga em uma situação prática (MARTINS-BRITTO *et al.*, 2019), conforme ilustrado na Figura 4.1.

Figura 4.1. Disposição ilustrativa da fonte de corrente, sistema de aterramento e eletrodo remoto modelados no método FDTD.



Fonte: Autoria própria.

O domínio FDTD utilizado compreende um paralelepípedo retangular com dimensões $50 \times 110 \times 50$ m, com resolução de discretização de 50 cm, 5 m de lacuna de ar nas faces do domínio e 5 m de células adicionais de material PML para delimitação do espaço computacional. A simulação foi realizada ao longo de $50 \mu\text{s}$, com um passo de tempo de 866 ps, a fim de cumprir o critério de estabilidade descrito no Capítulo 3.

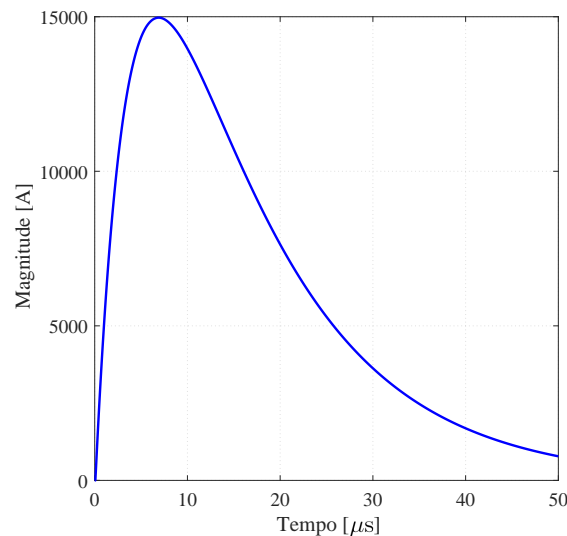
Tabela 4.1. Propriedades dos materiais.

Descrição	ρ [Ωm]	ϵ_r	μ_r
Camada de água	30	80	1
Camada de solo 01	731,6	10	1
Camada de solo 02	87,4	10	1
Camada de solo 03	850,3	10	1
Concreto	40	4,5	1

Fonte: Autoria própria.

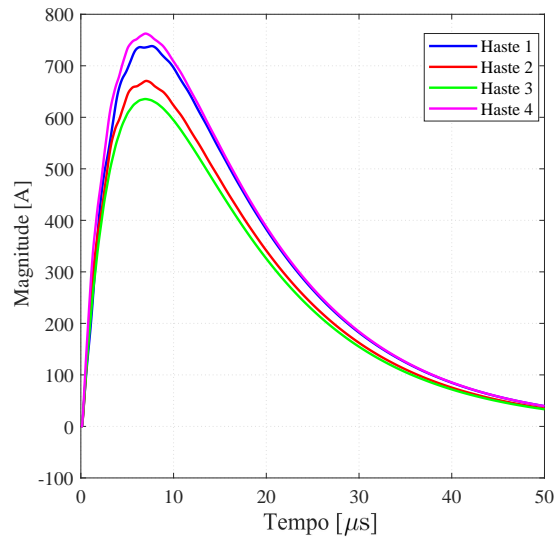
De maneira adicional à Tabela 4.1, foi estimado um diâmetro útil de 5,5 mm para os condutores de descida e o diâmetro da hastes de aterramento foi assumido como 12,2 mm. Ambos foram modelados como fios finos conforme (ELSHARBENI; DEMIR, 2015).

Ao se aplicar a descarga atmosférica 7/20 μs de 15 kA conforme a Figura 4.2 ao arranjo proposto da Figura 3.11 pelo método das diferenças finitas no domínio do tempo implementado no ambiente MATLAB[®], e assim como no projeto do sistema, considerando a estratificação do solo da Figura 3.10, com as propriedades dos matérias da Tabela 4.1, obtém-se:

Figura 4.2. Descarga atmosférica 7/20 μs 15 kA aplicada à plataforma.

Fonte: Autoria própria.

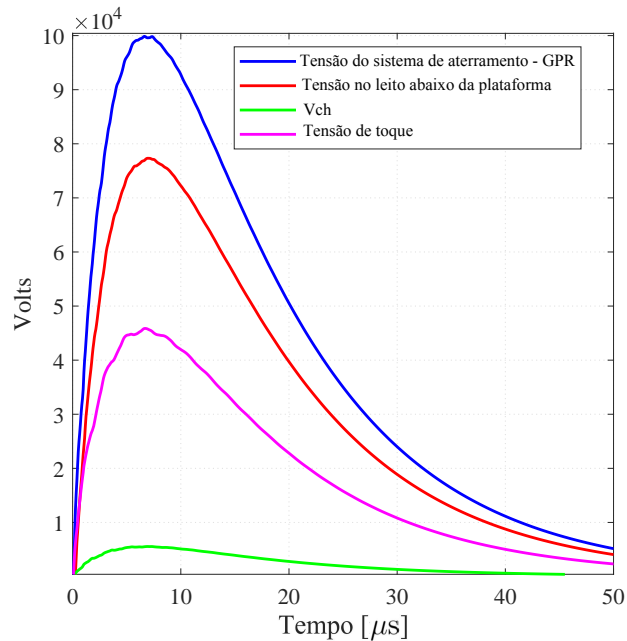
Figura 4.3. Correntes injetadas pelas hastes de aterramento.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.3, destaca-se as correntes injetadas pelas hastes de aterramento elétrico no leito da barragem. Observa-se que os condutores de descida desempenham um papel mais significativo, uma vez que os valores de correntes injetadas pelas hastes são significativamente menores que o distúrbio imposto à plataforma.

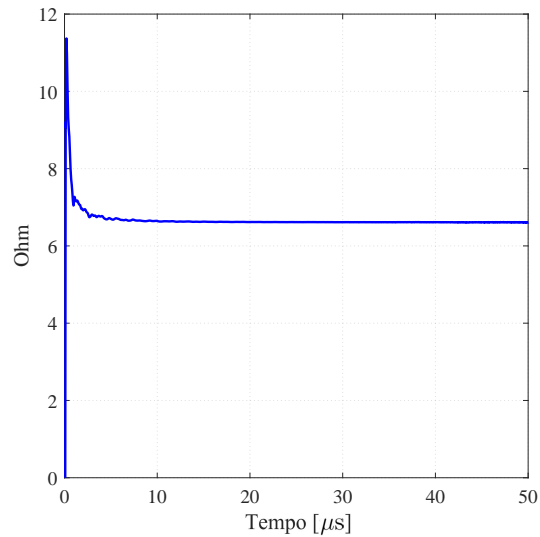
Figura 4.4. Tensões observadas em resposta a descargas atmosféricas.



Fonte: Autoria própria.

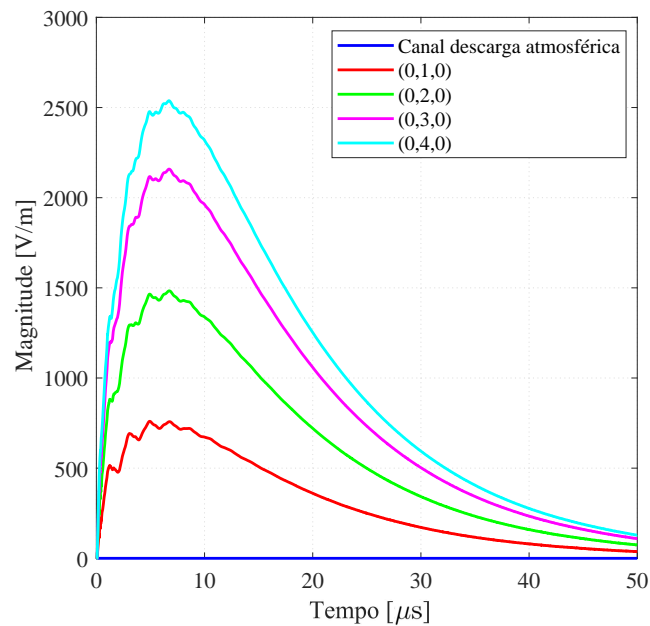
Por sua vez, na Figura 4.4 demonstra-se o aumento do potencial no sistema de aterramento (GPR), elevação de potencial no leito imediatamente abaixo da plataforma e as tensões de toque e V_{ch} a 3 metros da plataforma. Nota-se que a tensão no leito é aproximadamente 78 % do valor do GPR.

Figura 4.5. Resistência transitória do sistema de aterramento.



Fonte: Autoria própria.

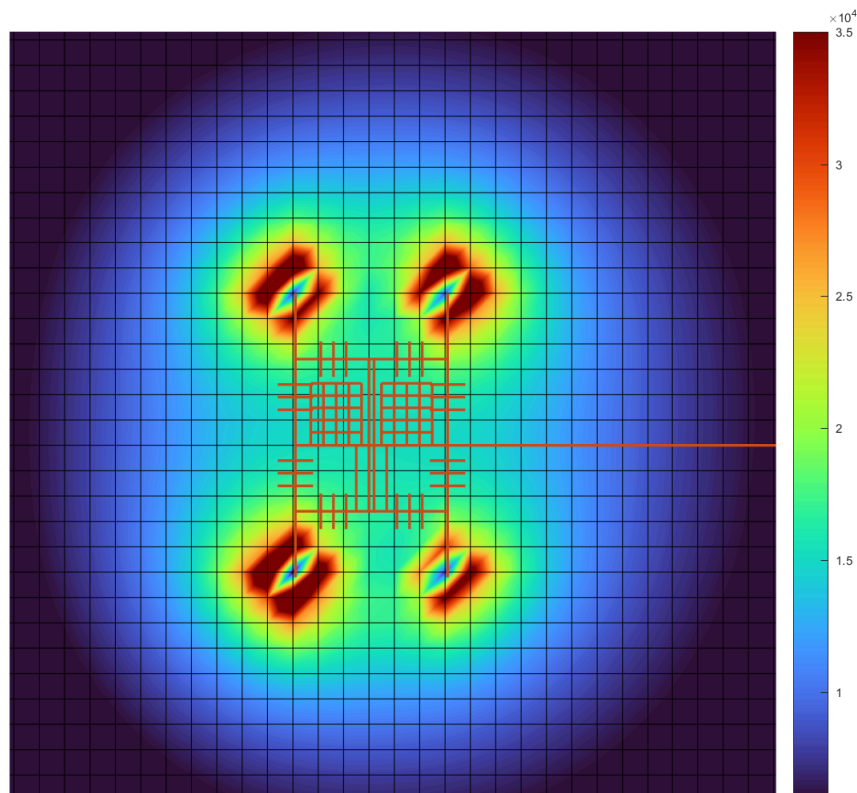
Figura 4.6. Magnitude da componente y do campo elétrico.



Fonte: Autoria própria.

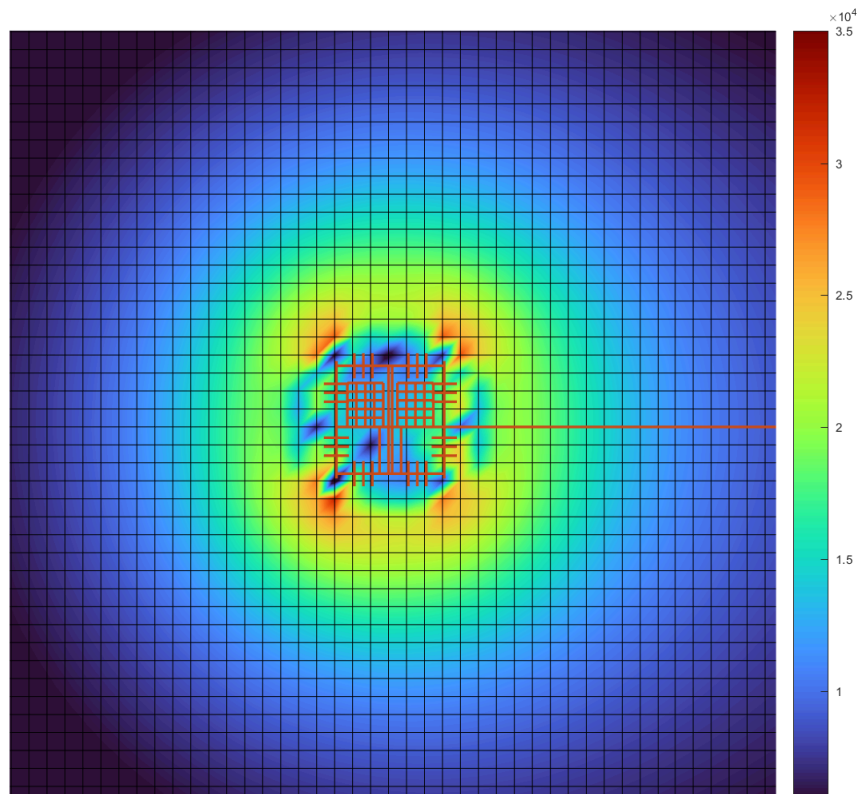
A resistência transitória do sistema ilustrada na Figura 4.5 é determinada de forma equivalente ao Método dos Momentos (MoM), entretanto, no domínio do tempo. Em outras palavras, ela é definida como a razão entre o GPR e a corrente de distúrbio ao longo do tempo. Nota-se ainda que, apesar de possuir a unidade de Ω , a resistência não é puramente resistiva, fato evidenciado pelo seu comportamento transitório inicial antes da estabilidade em $6,4 \Omega$. A Figura 4.6 ilustra as componentes E_y de campo elétrico no canal do raio e em pontos próximos a plataforma (1,2,3 e 4 metros de distância do ponto de incidência da descarga atmosférica). Tendo em vista que o canal é modelado como um condutor fino, o campo elétrico em seu interior é nulo.

Figura 4.7. Magnitude do campo elétrico no leito da barragem [V/m] em $t = 7 \mu\text{s}$.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.8. Magnitude do campo elétrico na superfície da barragem [V/m] em $t = 7 \mu\text{s}$.



Fonte: Autoria própria.

As Figuras 4.7 e 4.8 ilustram a magnitude do módulo do campo elétrico no leito da barragem e na superfície da água em t igual a $7 \mu\text{s}$, momento em que a corrente do distúrbio atmosférico atinge seu valor de pico. Os perfis de campo elétrico na superfície correspondem ao gradiente da tensão de toque nessa região. É relevante observar que há uma maior intensidade de campo elétrico nas áreas mais próximas das hastes de aterramento. Além disso, verifica-se um decréscimo mais acentuado na magnitude do campo elétrico com o aumento da distância no leito da barragem, em comparação com os perfis observados na superfície, pois a água possui elevada permissividade elétrica relativa.

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho consolidou seus objetivos ao propor o sistema de aterramento para a plataforma de geração fotovoltaica flutuante *off-grid* sobre lago, pois ao analisar as simulações de falta à terra aplicadas ao sistema de aterramento, fica evidente que o sistema proposto é seguro mesmo no cenário mais desafiador estudado, falha simultânea de ambas as baterias em paralelo, pois observa-se que as tensões definidas V_{ch} e as tensões de toque estão dentro dos limites de segurança propostos mesmo que os eletrodos não cheguem na camada de solo de menor resistividade elétrica. Esse resultado se deve à alta condutividade da água em que os condutores estão submersos. O produto fim do trabalho apresenta-se principalmente no Capítulo 3, o qual cumpre a função de memorial descritivo e de cálculos. O apêndice A traz o projeto executivo, enquanto o apêndice B contém a lista de materiais para execução. No apêndice C, é apresentada a execução parcial do projeto do sistema de aterramento.

Além disso, conforme ilustrado na Figura 3.12, como era esperado intuitivamente, a maior parte das correntes injetadas ocorrem na água, e a densidade de corrente nessas regiões é consideravelmente maior do que nos eletrodos engastados no concreto e no solo.

Também observa-se que as diferenças de potenciais ao longo do sistema de aterramento na condição de falha à terra simulada estão na ordem de milivolts, o que não é significativo o suficiente para causar falhas na comunicação dos dispositivos caso os circuitos de amplificação de sinais tenham um CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*) adequado quando referenciados ao terra da plataforma. É importante destacar que o perfil de GPD é resultado da modelagem dos condutores, que considera suas perdas ôhmicas e indutâncias intrínsecas.

O trabalho evidenciou ainda o comportamento realista do arranjo de aterramento a incidência de descargas atmosféricas ao aplicar-se o pulso exponencial duplo de 15 kA de magnitude, 7 μ s de tempo de subida e tempo de meia vida de 20 μ s. Foi possível observar a elevação de potencial da estrutura metálica, tensões V_{ch} e de toque, o potencial no leito da barragem

imediatamente abaixo da plataforma, a resistência transitória e a distribuição de injeção de corrente pelas hastes de aterramento, bem como componentes de campo elétrico na superfície da água e no leito da barragem.

Como medida adicional, recomenda-se a instalação de boias de sinalização de risco elétrico ao redor do sistema de geração fotovoltaica flutuante.

Em conformidade com o estudo, deve-se ainda investigar os critérios de segurança e possíveis mitigações de riscos para um maior número de painéis em paralelo e para bancos de baterias de maiores capacidades, caso em que as contribuições de curto-circuito e correntes de falta à terra são um desafio maior. Além disso, para consolidação de um projeto com visão holística e humanista é necessário realizar uma investigação mais detalhada das corrosões e correntes parasitas associadas a esse fenômeno e a possível hidrólise da água nesse contexto, bem como avaliar os impactos ambientais da geração flutuante sobre lado, especialmente em relação à vida aquática. Essas observações adicionais são essenciais para subsidiarem uma visão crítica e reflexiva sobre a implementação em larga escala de geração fotovoltaica em substrato aquoso, indo além da perspectiva puramente técnica.

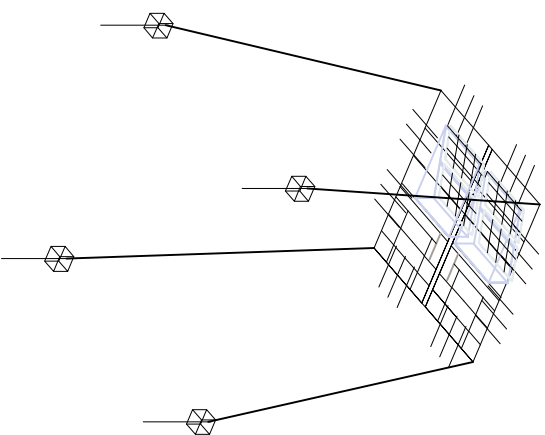
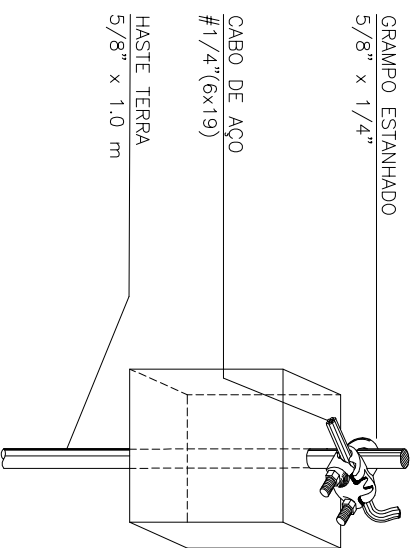
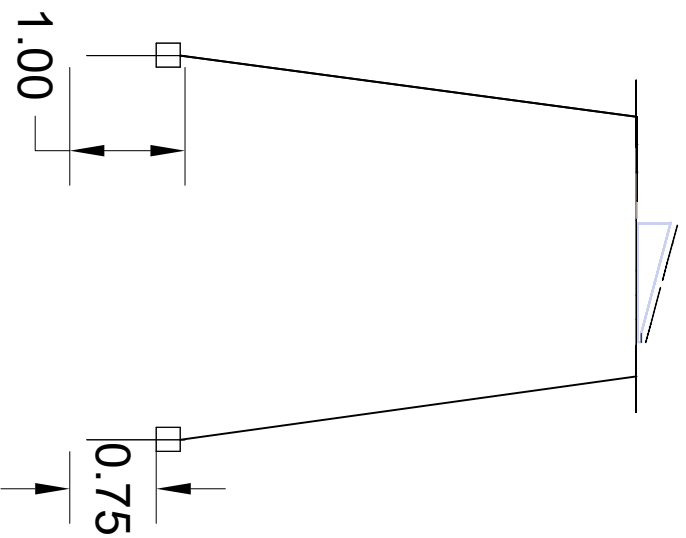
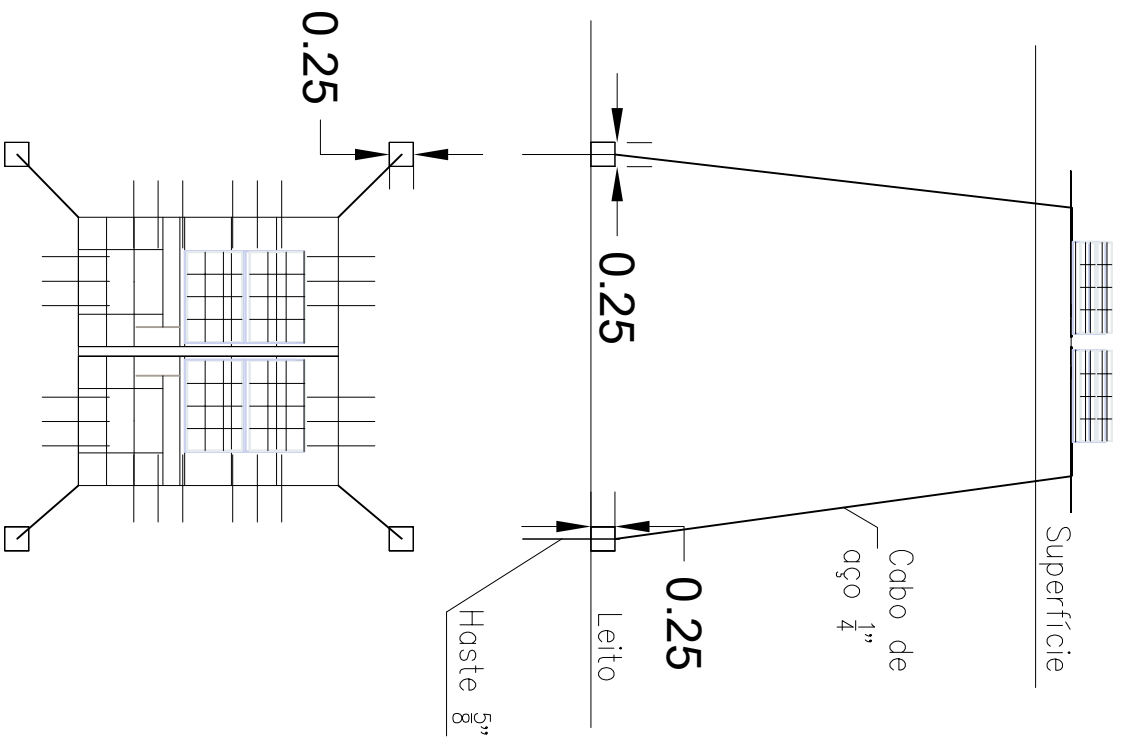
Para aprimoramento do FDTD deve-se buscar uma implementação alternativa para o canal da descarga atmosférica, pois a abordagem atual apresenta pequenos desvios devido à interferência eletromagnética que persiste entre o caminho fechado de corrente e a malha, mesmo com a distância mantida entre o eletrodo remoto e a malha alvo de estudo. Além disso, a presença de indutância mútua entre a malha e o canal, juntamente com capacitâncias parasitas, contribuem para esses erros. De forma complementar, é importante observar que essa abordagem impõe uma carga substancial ao processamento computacional necessário, uma vez que o tempo de simulação está diretamente relacionado ao tamanho do domínio que é exigido ao alocar o eletrodo. Por outro lado, o modelo atual deve ser expandido de modo a considerar a dispersão das propriedades dielétricas dos corpos dispersores e absorventes assim como modelar as propriedades dos materiais em função da frequência e considerar condutores de seção transversal irregulares e suas perdas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. *NBR 15751 - Sistemas de Aterramento de Subestações - Requisitos*. 2009. 1-53 p. Citado na página 9.
- ABNT. *NBR 5419 Proteção contra descargas atmosféricas Parte 1: Princípios gerais*. 2015. Citado na página 26.
- ABNT. *NBR 16896 Proteção catódica de estruturas — Requisitos*. 2020. Citado na página 37.
- ABNT. *NBR 7117-1 - Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geométrica*. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 11 and 36.
- ALIPIO, R. S.; OLIVEIRA, M. L. F.; SCHROEDER, M. A. O.; AFONSO, M. M.; OLIVEIRA, T. A. S. Aplicação do método dos momentos para avaliação do acoplamento eletromagnético entre eletrodos de aterramento: análise no domínio da frequência. 2008. Citado na página 19.
- DAWALIBI, F.; MUKHEDKAR, D. Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure: Part II - Comparaison Between Theoretical and Experimental Results. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, v. 94, n. 2, p. 252–261, 1975. ISSN 0018-9510. Citado na página 21.
- ELSHARBENI, A.; DEMIR, V. *The Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetics with MATLAB® Simulations*. 2nd. ed. [S.l.]: SciTech Publishing, 2015. ISBN 9781891121715. Citado 8 vezes nas páginas 3, 18, 19, 22, 23, 24, 25, and 47.
- EMBRAPA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. [S.l.]: EMBRAPA, 2012. Citado na página 10.
- Epever. User manual triron n series modular mppt solar charge controller. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 29 and 30.
- FEITOSA JACKSON NOGUEIRA E GUERRA, K. d. O. M. V. Análise da inserção de spda em sistemas fotovoltaicos. 2021. Citado na página 1.
- IEC. *Effects of current on human beings and livestock – Part 1 : General aspects*. 2016. Citado 3 vezes nas páginas 7, 8, and 32.
- IEEE. *142 std IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2007. Citado 4 vezes nas páginas 10, 15, 16, and 17.
- KINDERMANN, G. *Choque Elétrico 4. ed.* [S.l.]: Sagra Luzzatto, 2013. Citado na página 6.
- KINDERMANN GERALDO E CAMPAGNOLO, J. M. *Aterramento Elétrico*. [S.l.]: SAGRA-D.C. LUZZATTO Editores, 1995. Citado na página 11.
- LUO, G.; YAO, C.; LIU, Y.; TAN, Y.; HE, J. Entropy svm-based recognition of transient surges in hvdc transmissions. *Entropy*, MDPI, v. 20, n. 6, p. 421, 2018. Citado na página 26.

- MAMEDE, J. F. *Instalações Elétricas Industriais. Sétima Edição*. [S.l.]: Gen LTC, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 1, 5, and 6.
- MARTINS-BRITTO, A. G. Modelagem das interferências eletromagnéticas entre linhas de transmissão e tubulações metálicas subterrâneas e análise de impactos. p. 71–76, 2017. Citado 9 vezes nas páginas 3, 11, 12, 13, 14, 19, 20, 21, and 22.
- MARTINS-BRITTO, A. G.; RONDINEAU, S. R. M. J.; LOPES, F. V. Power Line Transient Interferences on a Nearby Pipeline Due to a Lightning Discharge. In: *International Conference on Power Systems Transients (IPST 2019)*. Perpignan, France: IEEE Xplore, 2019. p. 3. Citado 3 vezes nas páginas 23, 26, and 46.
- MORENO, H. *Aterramento Elétrico*. [S.l.]: International Copper Association Brazil Copper Alliance, 2018. Citado 4 vezes nas páginas 15, 16, 17, and 18.
- OLIVEIRA THIAGO R, B. A. S. e. G. P. R. D. Grounding and safety considerations for residential dc microgrids. 2014. Citado na página 39.
- RAKOV VLADIMIR, U. M. A. *Lightning: Physics and Effects*. [S.l.]: Cambridge University, 2003. Citado na página 26.
- Renesas Technology. *Ground Potential Differences: Origin and Remedies - APPLICATION NOTE*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 10.
- RESUN SOLAR ENERGY. Electrical data rms-100p. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 30 and 31.
- SANTOS, R. C. d. Geração distribuída brasil: perspectivas para a expansão da energia solar. 2018. Citado na página 1.
- SILVEIRA ROSEMARI M. C. F. E BAZZO, W. A. Ciência e tecnologia: Transformando a relação do ser humano com o mundo. 2006. Citado na página 1.
- TAKAHASHI, T.; KAWASE, T. Analysis of Apparent Resistivity in a Multi-Layer Earth Structure. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 2, p. 604–612, 1990. Citado na página 14.
- Texas Instruments. Removing ground noise in data transmission systems - application report. 2007. Citado na página 10.

APÊNDICE A - PROJETO EXECUTIVO



Detalhe A

1. As conexões devem ser feitas de acordo com o detalhe de projeto para garantir a continuidade elétrica e resistência mecânica.
2. O eletrodo de sacrifício deve ter uma conexão sólida com o sistema de aterramento elétrico, estar submerso para garantir a proteção galvânica, e ser inspecionado semestralmente para verificar a existência da massa de proteção (1 kg para vida útil de 5 anos quando não exposto a condições de correntes de curto-circuito e fuga).
3. A conexão com a plataforma deve ser do tipo condutor-chapa, conforme especificado na lista de materiais ou equivalente.
4. Deve-se assegurar que as hastes estejam enterradas pelo menos 75 cm no leito da barragem.
5. Todas as estruturas metálicas devem ser equipotencializadas.

Universidade de Brasília

REVISÃO

Projeto: Aterramento Elétrico e Detalhe de Conexão

Projeto: Aterramento Elétrico e Detalhe de Conexão

Projeto: Aterramento Elétrico e Detalhe de Conexão

Projeto: Aterramento Elétrico e Detalhe de Conexão

Projeto: Aterramento Elétrico e Detalhe de Conexão

Projeto: Aterramento Elétrico e Detalhe de Conexão

Projeto: Aterramento Elétrico e Detalhe de Conexão

Projeto: Aterramento Elétrico e Detalhe de Conexão

Projeto: Aterramento Elétrico e Detalhe de Conexão

Projeto: Aterramento Elétrico e Detalhe de Conexão

Projeto: Aterramento Elétrico e Detalhe de Conexão

Projeto: Aterramento Elétrico e Detalhe de Conexão

01/01

Endereço	Projeto	Arquivo
Esplan. Darcy Ribeiro, 1, Universidade de Brasília - Brasília - DF - 71600-900	Projeto: Aterramento Elétrico e Detalhe de Conexão	Projeto: Aterramento Elétrico e Detalhe de Conexão
Nome do Projeto	Arquivo	Arquivo
Nome do Cliente	Projeto	Projeto
Escopo	Data de Atualização	Projeto
5/ Estado	Jan/2023	Projeto

APÊNDICE B - LISTA DE MATERIAIS

Lista de materiais

Responsáveis: Antônio Ramos

Projeto: Proj-ATR-01



UnB

Descrição	QTD	Unidade	Imagem Ilustrativa
Cabo de aço AA 1/4"6 x 19 galvanizado TRD - torção regular a direita. Conforme NBR 2408.	30	Metros	
Conector para aterramento duplo – 5/8" x 1/4". Conforme NBR 13571.	8	Pç	
Haste de aterramento cobre baixa camada 5/8 X 1,2 m Conforme NBR 13571.	4	Und	
Conector aterramento cabo-chapa ou solução equivalente. Conforme NBR 13571.	4	Pç	
Anodo de zinco para aplicação náutica 250 gramas. *	4	Pç	

* Conectados aos cabos de aço com conector para aterramento duplo ou solução equivalente com cabos e terminais. 6 mm².

Notas: O uso do cabo de aço inoxidável é inviável devido a sua elevada resistividade elétrica;

Impossibilidade de uso de cabo de aço com alma de fibra natural devido a decomposição em meio aquoso.

APÊNDICE C - REGISTRO FOTOGRÁFICO DE EXECUÇÃO PARCIAL

Figura 1. Registro fotográfico de execução parcial 01.



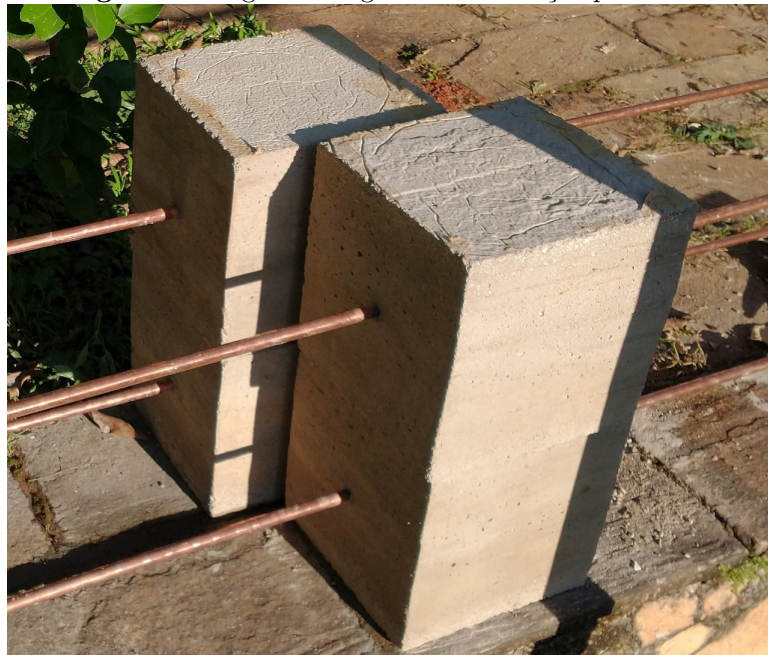
Fonte: Projeto FAP DF - Placas flutuantes.

Figura 2. Registro fotográfico de execução parcial 02.



Fonte: Projeto FAP DF - Placas flutuantes.

Figura 3. Registro fotográfico de execução parcial 03.



Fonte: Projeto FAP DF - Placas flutuantes.

Figura 4. Registro fotográfico de execução parcial 04.



Fonte: Projeto FAP DF - Placas flutuantes.