

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO
CAMPUS TRINDADE
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ISAC SILVA
RAFAEL MOTA FERREIRA**

**MÉTODO DE ESTRATIFICAÇÃO DE SOLO:
DIMENSIONAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO**

**TRINDADE
2024**

**ISAC SILVA
RAFAEL MOTA FERREIRA**

**MÉTODO DE ESTRATIFICAÇÃO DE SOLO:
DIMENSIONAMENTO DE MALHA DE ATERRAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano- Campus Trindade.

Orientador(a): Me. Robert de Souza Bonuti

**TRINDADE
2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas (SIBI) – Instituto Federal Goiano

S586m

Silva, Isac.

Método de estratificação de solo: dimensionamento da malha de aterramento [manuscrito] / Isac Silva; Rafael Mota Ferreira. – Trindade, GO: IF Goiano, 2024.

41 fls. : il.. tabs.

Orientador: Prof. MSc. Robert de Souza Bonuti.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica)
– Instituto Federal Goiano, Campus Trindade, 2024.

1. Resistividade elétrica. 2. Segurança elétrica. 3. Sistema de Aterramento. 4. Planejamento técnico. 5. Engenharia elétrica. I. Ferreira, Rafael Mota. II. Bonuti, Robert de Souza. III. Título. IV. Instituto Federal Goiano.

CDU 621.3



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 92/2024 - CE-TRI/GE-TRI/CMPTRI/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos 11 dias do mês de dezembro de 2024, às 21 horas, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes: Robert de Souza Bonuti (orientador), Luiz Alberto do Couto (membro) e Rodrigo Rodrigues da Cunha Paiva (membro), para examinar o Trabalho de Curso intitulado “MÉTODO DE ESTRATIFICAÇÃO DE SOLO: DIMENSIONAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO” dos estudantes Isac Silva, matrícula nº 2018108202640308, e Rafael Mota Ferreira, matrícula nº 2020108202640210, do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do IF Goiano – Campus Trindade. A palavra foi concedida aos estudantes para a apresentação oral do TC, houve arguição dos candidatos pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela APROVAÇÃO dos estudantes. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora.

(Assinado Eletronicamente)

Robert de Souza Bonuti

Orientador

(Assinado Eletronicamente)

Luiz Alberto do Couto

Membro

(Assinado Eletronicamente)

Rodrigo Rodrigues da Cunha Paiva

Membro

Documento assinado eletronicamente por:

- **Robert de Souza Bonuti, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 12/12/2024 08:43:10.
- **Rodrigo Rodrigues da Cunha Paiva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 12/12/2024 09:59:56.
- **Luiz Alberto do Couto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 12/12/2024 10:16:41.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 12/12/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 661334

Código de Autenticação: 63e8022ab5



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Trindade
Av. Wilton Monteiro da Rocha, S/N, Setor Cristina II, TRINDADE / GO, CEP 75389-269
(62) 3506-8000

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Isac Silva; Rafael Mota Ferreira.

Matrícula:

2018108202640308

Título do trabalho:

2020108202640210

MÉTODO DE ESTRATIFICAÇÃO DE SOLO: DIMENSIONAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 17 / 12 / 2024

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente

 **RAFAEL MOTA FERREIRA**
Data: 17/12/2024 13:40:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente

 **ISAC SILVA**
Data: 17/12/2024 13:45:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Trindade - GO

Local

17 / 12 / 2024

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Documento assinado digitalmente



ROBERT DE SOUZA BONUTI
Data: 17/12/2024 14:32:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho é dedicado a todos os membros envolvidos, amigos e familiares que nos forneceram apoiaram durante a árdua jornada do conhecimento, nos dando apoio, amor, compaixão e suporte para que possamos alçar voos cada vez mais altos.

RESUMO

O presente estudo aborda o processo de dimensionamento adequado de sistemas de aterramento elétrico, essenciais para garantir a segurança dos usuários e a proteção de equipamentos contra choques elétricos e falhas originadas por descargas atmosféricas. Utilizou-se o método de Wenner para avaliar a resistividade aparente do solo em uma área próxima ao laboratório de uma instituição de ensino, localizada em Trindade-GO. Foram realizadas medições com diferentes espaçamentos entre hastes, analisando os dados coletados por meio de um processo em 12 etapas bem estruturadas. Os resultados indicaram significativa variação na resistividade do solo em função do espaçamento, evidenciando a necessidade de ajustes no número de hastes e em sua disposição para assegurar a eficiência do sistema de aterramento. A análise também revelou a importância de desprezar dados com desvios elevados em relação à média, aprimorando a precisão do cálculo. Concluiu-se que o correto dimensionamento da malha de aterramento, considerando a estratificação e resistividade do solo, é fundamental para garantir segurança e confiabilidade em sistemas elétricos. Este trabalho reforça a relevância de metodologias rigorosas no planejamento de sistemas de aterramento, contribuindo para práticas mais seguras e eficientes na engenharia elétrica.

Palavras-chave: Resistividade elétrica; Segurança elétrica; Sistema de Aterramento; Planejamento técnico; Engenharia elétrica

ABSTRACT

The present study addresses the process of proper design for electrical grounding systems, which are essential to ensure user safety and equipment protection against electrical shocks and failures caused by atmospheric discharges. The Wenner method was used to evaluate the apparent soil resistivity in an area near the laboratory of an educational institution located in Trindade-GO, Brazil. Measurements were performed with varying rod spacings, and the collected data were analyzed through a well-structured 12-step process. The results revealed a significant variation in soil resistivity depending on the spacing, underscoring the need for adjustments in the number and arrangement of rods to ensure the efficiency of the grounding system. The analysis also highlighted the importance of excluding data with high deviations from the mean to improve calculation accuracy. It was concluded that the proper design of the grounding mesh, considering soil stratification and resistivity, is critical to ensuring the safety and reliability of electrical systems. This study reinforces the importance of rigorous methodologies in the planning of grounding systems, contributing to safer and more efficient practices in electrical engineering.

Keywords: Electrical resistivity; Electrical safety; Grounding system; Technical planning; Electrical engineering

FIGURAS

Figura 1 - Haste de aterramento. Adaptado de Visacro Filho (2016).....	15
Figura 2 - Tensão de passo. Adaptado de Visacro Filho (2016).	16
Figura 3 - Tensão de toque. Adaptado de Visacro Filho (2016).	17
Figura 4 - Tensão transferida. Adaptado de Visacro Filho (2016).....	18
Figura 5 - Efeito da umidade na resistividade do solo (Visacro Filho, 2016).....	20
Figura 6 - Resistividade de água em função da temperatura (Visacro Filho, 2016).	20
Figura 7 - Solo real (a) e solo estratificado (b). (NBR7117-1, 2020).....	21
Figura 8 - Método de Frank Wenner, estacas cravadas ao solo (Kindermann e Campagnolo, 1995).....	24
Figura 9 - Curva $M_{(a=h)}$ versus K. Adaptado de Kindermann e Campagnolo (1995).	27
Figura 10 - Pontos máximos de distancias entre as hastes. Autoria própria (2024).....	30
Figura 11 - Imagem da cravação dos eletrodos no solo. Autoria própria (2024).....	31
Figura 12 - Leitura realizada pelo equipamento. Autoria própria (2024).	32
Figura 13 - Rebatimento de K na Curva $M_{(a=h)}$ versus K.....	36
Figura 14 - Demonstração da região onde deverá ser instaladas as hastes do sistema de aterramento. Autoria própria (2024).....	39
Figura 15 - Detalhe da instalação das hastes próximo a edificação. Autoria própria (2024)...	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa Característica de Resistividade por Tipo de Solo. Adaptado de Visacro Filho (2016).	19
Tabela 2 - Tabela de hastes paralelas, alinhadas e igualmente espaçadas (Adaptado de Kindeman e Campagnolo, 1995).....	28
Tabela 3 - Espaçamento para os pontos de medição	31
Tabela 4 - Lista de resultados das leituras em campo. Autoria própria (2024).....	32
Tabela 5 - Valores de Resistividade Coletados, com valores desprezados em negrito. Autoria própria (2024).....	33
Tabela 6 - Valores de resistividade recalculados. Autoria própria (2024)	33
Tabela 7 - Resultado do cálculo do fator K. Autoria própria (2024).....	35
Tabela 8 - Resultado do valor de $M_{(a=h)}$, destacado em negrito. Autoria própria (2024)..	36
Tabela 9 – Resumo de resultados calculados. Autoria própria (2024).....	37
Tabela 10 - Tabela de hastes paralelas, alinhadas e igualmente espaçadas, com demarcação do número de hastes necessárias (Adaptado de KINDEMAN, CAMPAGNOLO. 1995).	38
Tabela 11 - Seções mínimas dos materiais do SPDA (Adaptado de ABNT NBR 5419:2015).	39

GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva ρ x a . Autoria própria (2024).....	34
Gráfico 2 - Prolongamento da curva até seus respectivos eixos. Autoria própria (2024)	35
Gráfico 3 - Curva ρ x a , com a profundidade encontrada. Autoria própria (2024)	37

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVO GERAL.....	13
1.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	13
2.	REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1	ATERRAMENTO.....	14
2.2	SEGURANÇA E SISTEMA DE ATERRAMENTO.....	16
2.2.1	Tensão de passo.....	16
2.2.2	Tensão de toque.....	17
2.2.3	Tensão transferida.....	17
2.3	RESISTIVIDADE DO SOLO.....	18
2.3.1	Influência do tipo de solo da resistividade.....	19
2.3.2	Influência da umidade na resistividade do solo.....	19
2.3.2	Influência da temperatura na resistividade do solo.....	20
2.4	MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO.....	21
2.5	ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO.....	22
2.6	RESISTIVIDADE APARENTE.....	22
3.	METODOLOGIA.....	24
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
5.	CONCLUSÃO.....	41
6.	REFERÊNCIAS.....	42

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a busca por sistemas elétricos mais seguros, tanto para os usuários quanto para os equipamentos, tem se tornado cada vez mais urgente. O dimensionamento adequado de um sistema de aterramento elétrico é crucial para evitar falhas que possam comprometer a segurança das pessoas, diminuir a vida útil de dispositivos elétricos e eletrônicos, ou até causar incêndios em situações extremas (Vieira, Carneiro e Moreira, 2024).

O aterramento elétrico desempenha um papel fundamental na proteção das instalações, sendo responsável por garantir a segurança contra choques elétricos e danos provocados por descargas atmosféricas. Quando bem projetado, o sistema de aterramento assegura que correntes elétricas indesejadas, geradas por falhas no sistema ou por raios, sejam dissipadas de maneira eficiente para o solo, prevenindo que essas correntes atinjam partes metálicas das instalações ou o corpo humano. Assim, um aterramento eficaz contribui significativamente para a redução dos riscos de acidentes, preservando a integridade das pessoas e a durabilidade dos equipamentos elétricos (Vieira, Carneiro e Moreira, 2024).

Para que o sistema de aterramento seja realmente eficaz, é essencial considerar a estratificação do solo, que é um fator crucial no seu dimensionamento. A composição e as características do solo influenciam diretamente a resistência do sistema, já que diferentes camadas do solo apresentam resistividades distintas. Solos com maior resistividade oferecem maior resistência à passagem da corrente elétrica, dificultando a dissipação da energia para o solo e comprometendo a eficiência do aterramento (NBR 7117-1, 2020).

Portanto, entender a estratificação do solo e suas variações é fundamental para garantir que o sistema de aterramento seja dimensionado adequadamente, assegurando sua eficácia e segurança. Este trabalho destaca a importância de considerar a resistividade aparente do solo no processo de dimensionamento do aterramento e alerta sobre os riscos do dimensionamento inadequado, com o objetivo de proteger os usuários e garantir a integridade dos equipamentos elétricos e eletrônicos (NBR 7117-1, 2020; Kindermann e Campagnolo, 1995).

Por fim, o estudo visa ressaltar a grande importância do sistema de aterramento elétrico, com foco no dimensionamento através da resistividade aparente do solo, além de conscientizar sobre os riscos decorrentes do dimensionamento inadequado, sempre buscando garantir a segurança tanto para os usuários quanto para os equipamentos elétricos e eletrônicos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Diante do exposto acima, este trabalho tem como finalidade realizar uma avaliação da resistividade do solo em área anexa ao laboratório de uma instituição de ensino, e propor o correto dimensionamento para a malha de aterramento.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Utilizar o método de Wenner para medir a resistividade do solo nas áreas de interesse da edificação;
- Analisar os dados obtidos para determinar as melhores práticas de aterramento;
- Desenvolver os cálculos e estimar o número de hastes necessárias para atender o propósito.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, são abordados e explicados os principais conceitos relacionados a aterramentos elétricos, apresentando a base teórica fundamental para a realização deste trabalho. São discutidos conceitos importantes, como: (i) aterramento, (ii) segurança e sistemas de aterramento, (iii) resistividade do solo, (iv) medição da resistividade do solo, (v) estratificação do solo e (vi) resistividade aparente.

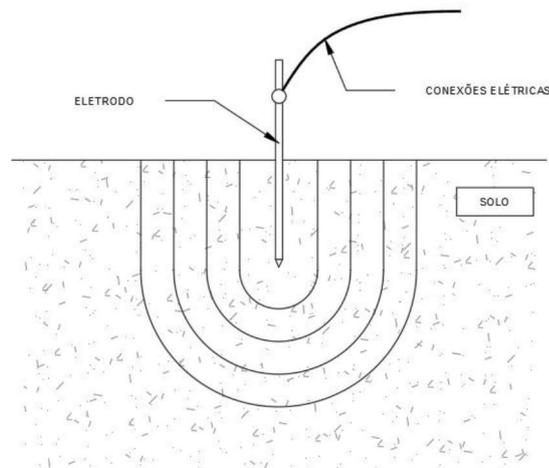
2.1 ATERRAMENTO

O sistema de aterramento foi desenvolvido com o objetivo de garantir a segurança de seres vivos e a proteção de equipamentos elétricos ligados a rede de energia. Esse sistema é responsável por criar um caminho seguro e de baixa impedância em direção ao solo. O intuito desse sistema é dissipar descargas atmosféricas e/ou correntes elétricas provocadas a partir de curto circuito em equipamentos elétricos do sistema (Pinheiro, 2013).

A legislação federal também estabelece a obrigatoriedade do cumprimento das normas relacionadas à segurança elétrica, conforme disposto no Art. 1º da Lei nº 11.337, de 26 de julho de 2006, que determina: Art. 1º As edificações cuja construção se inicie a partir da vigência desta Lei deverão obrigatoriamente possuir sistema de aterramento e instalações elétricas compatíveis com a utilização do condutor-terra de proteção, bem como tomadas como terceiro contato correspondente (Brasil, 2006).

De acordo com Visacro Filho (2016), o aterramento elétrico se resume em uma forma de interligar o sistema elétrico físico ao solo. A Figura 1 lustra a configuração básica do sistema de aterramento, que consiste basicamente em três componentes: i) as conexões elétricas que ligam o sistema aos eletrodos; ii) eletrodo de aterramento, sendo ele um corpo metálico inserido ao solo e iii) a terra que envolve o eletrodo de aterramento.

Figura 1 - Haste de aterramento. Adaptado de Visacro Filho (2016).



Visacro Filho (2016) define sistema de aterramento elétrico como “[...] uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo”, onde o objetivo fundamental consiste em proporcionar mais segurança para os equipamentos elétricos e para seus usuários e consiste basicamente em três componentes:

- A ligação elétrica que interliga o sistema elétrico aos eletrodos;
- Eletrodos de aterramento e;
- Solo que envolve os eletrodos.

O eletrodo citado pelo autor é o nome dado a qualquer objeto metálico que possa ser inserido no solo e ser capaz de conduzir corrente elétrica, exercendo a função de interligar os sistemas físicos elétricos ao solo. O ponto do sistema de aterramento que se deseja conectar ao solo depende da aplicação, pode ser de natureza variada, podendo incluir desde a carcaça de um motor (seja industrial ou de uso doméstico) até o elemento neutro de um sistema elétrico.

O eletrodo a ser utilizado no sistema de aterramento precisa atender alguns critérios, conforme descrito por Kindermann e Campagnolo (1995), necessitando ser um bom condutor; possuir propriedades que o protegem das ações de ácidos e sais dissolvidos no solo e resistência mecânica compatível com a ação de cravação.

No que tange a segurança, existe a necessidade de que todas as partes metálicas que possam ter um eventual contato com partes energizadas devem ser aterradas. Com isso, em um suposto cenário de contato acidental entre a parte energizada com a carcaça (no caso de motores) metálica aterrada, irá estabelecer um curto-circuito, provocando a atuação do sistema de proteção da carga e interrompendo o fornecimento de energia.

2.2 SEGURANÇA E SISTEMA DE ATERRAMENTO

As aplicações típicas associadas aos sistemas de aterramento estão compreendidas e sempre associadas os dois fatores principais: (i) desempenho do sistema ao qual está conectado e (ii) questão de segurança (seres vivos) e proteção (equipamentos).

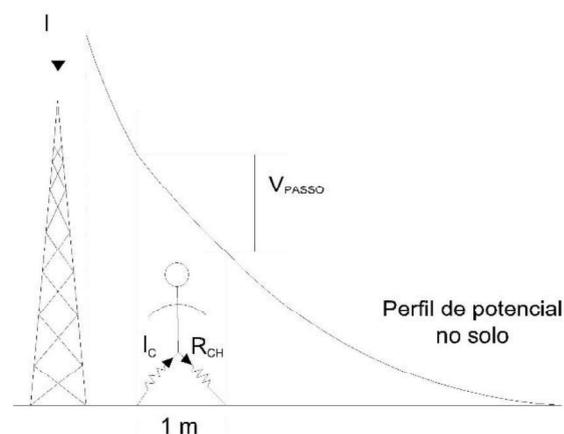
Nesta primeira parte, pode-se destacar o uso do sistema de aterramento sendo utilizado como fator de segurança, permitindo o escoamento de cargas ou correntes de descarga para a terra e ainda promover a distribuição segura de potenciais na superfície do solo.

No segundo fator, quando as partes do corpo humano é submetida a uma diferença de potencial, uma corrente elétrica passa a percorrer através da região de contato, sendo capaz de produzir efeitos diversos e indesejáveis para o ser humano. No que se diz respeito a aterramento, é possível descrever algumas dessas situações em que o corpo humano é submetido a uma diferença de potencial, gerando um fluxo de corrente que flui por dentro dele, sendo esses fenômenos:

2.2.1 Tensão de passo

A tensão de passo consiste na máxima diferença de potencial entre os pés como mostrado na Figura 2 (arbitra-se uma distância de 1m entre eles) a que ficaria submetida uma pessoa eventualmente presente na região do aterramento, durante o fluxo de corrente pelo mesmo conforme aponta Visacro Filho (2016).

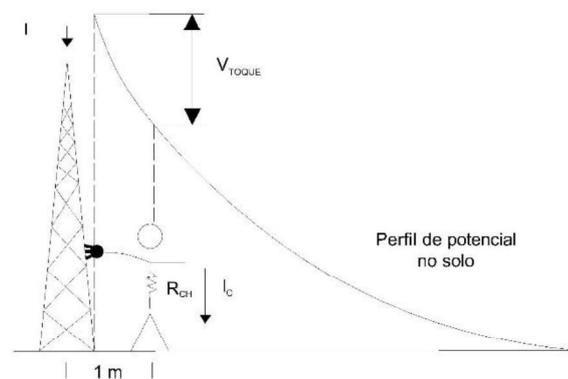
Figura 2 - Tensão de passo. Adaptado de Visacro Filho (2016).



2.2.2 Tensão de toque

Segundo Visacro Filho (2016), a tensão de toque é definida como a máxima diferença de potencial entre as mãos e os pés de uma pessoa que, estando na região do aterramento, entra em contato com uma parte metálica conectada aos eletrodos do sistema. Essa situação ocorre durante o fluxo de corrente pelo aterramento, considerando ambos os pés afastados 1 metro da estrutura tocada, conforme ilustrado na Figura 3.

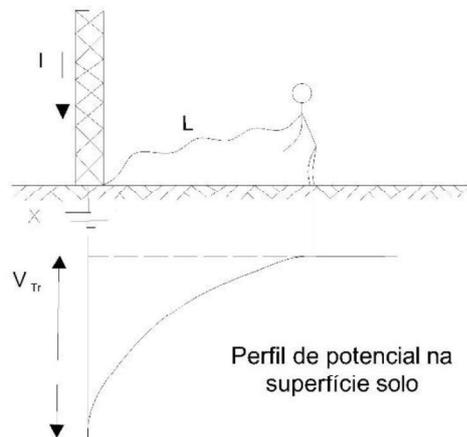
Figura 3 - Tensão de toque. Adaptado de Visacro Filho (2016).



2.2.3 Tensão transferida

Já no caso de tensão transferida é a elevação de potencial total da malha referida a infinito, usualmente designada GPR (*Grounding Potential Rise*). Constitui-se no potencial a que ficaria submetida uma pessoa posicionada no terra remoto (grande distância da malha) que tivesse contato com uma parte metálica eventualmente conectada com os eletrodos do aterramento, durante o fluxo de corrente pelo mesmo. Como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 - Tensão transferida. Adaptado de Visacro Filho (2016).



Outro ponto importante que necessita de atenção são as descargas elétricas atmosféricas, comumente conhecidas como raios. São fenômenos naturais que podem causar danos significativos tanto a seres humanos quanto a edificações e equipamentos eletrônicos. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 5419:2015), um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) é essencial para mitigar os riscos associados a esses eventos. A Associação Brasileira de Normas Técnicas estabelece diretrizes claras para o projeto, instalação e manutenção de SPDA, visando assegurar a proteção adequada contra os efeitos destrutivos das descargas atmosféricas.

2.3 RESISTIVIDADE DO SOLO

A resistividade do solo (ρ) é definida como a resistência elétrica (R) medida entre faces opostas de um cubo de dimensões unitárias, ou seja, arestas l de 1,0 metro, área das faces A de 1,0 metro quadrado (Visacro Filho, 2016), ou seja (1):

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} \quad [\Omega \cdot m] \quad (1)$$

É por meio desta grandeza que se consegue dimensionar um sistema de aterramento para qualquer tipo de solo conforme aponta Paiva (2021). Entre os fatores que influenciam na resistividade do solo, serão destacados os três mais relevantes para este trabalho: tipo de solo, teor de umidade do solo e temperatura do solo.

2.3.1 Influência do tipo de solo da resistividade

Uma vez que os tipos de solo não são claramente definidos, não é possível atribuir um valor específico de resistividade, contudo, é possível caracterizar faixas de valores característicos para diferentes tipos de solo, conforme Tabela 1.

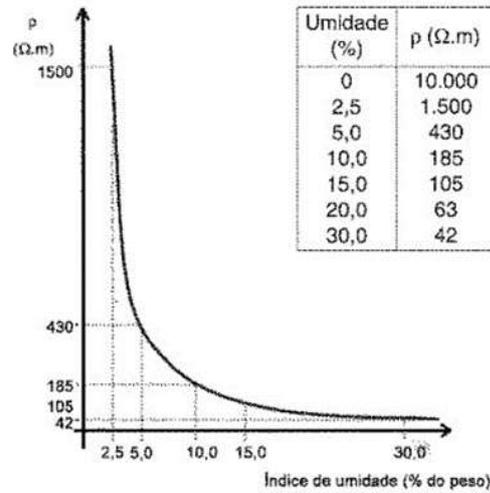
Tabela 1 - Faixa Característica de Resistividade por Tipo de Solo. Adaptado de Visacro Filho (2016).

TIPO DE SOLO	RESISTIVIDADE ($\Omega.m$)
Lama	5 a 100
Húmus	10 a 150
Limo	20 a 100
Argilas	80 a 330
Terra de Jardim	140 a 480
Calcário Fissurado	500 a 1.000
Calcário compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000
Areia Comum	3.000 a 8.000
Basalto	10.000 a 20.000

2.3.2 Influência da umidade na resistividade do solo

Em baixa frequência, a condução no solo deve-se primordialmente por mecanismos eletrolíticos e, para que a eletrolise ocorra é essencial a existência de água e sais minerais (Visacro Filho, 2016). Em outras palavras, a Figura 5 demonstra esse efeito onde quantidade de água no solo, ou seja, o teor de umidade do solo, afeta diretamente a resistividade dele.

Figura 5 - Efeito da umidade na resistividade do solo (Visacro Filho, 2016)

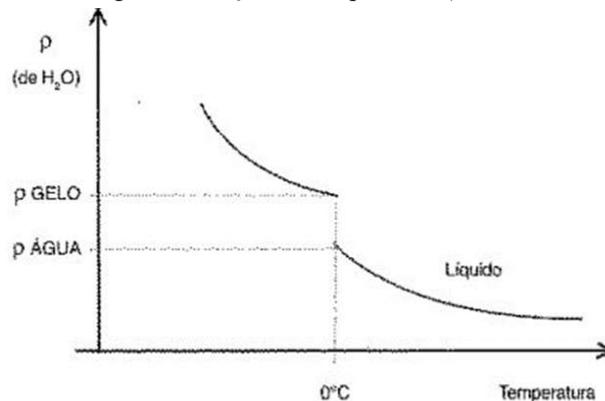


Dessa forma, solos mais úmidos apresentam menor resistividade e são mais adequados para sistemas de aterramento.

2.3.2 Influência da temperatura na resistividade do solo

O efeito da temperatura na resistividade do solo deve ser analisado em dois aspectos distintos. O primeiro dele está relacionado com a umidade: a água tende a evaporar em temperaturas mais altas resultando em menor umidade do solo e, conforme tópico anterior, em umidade menor a resistividade do solo tende a aumentar (Visacro Filho, 2016). O segundo ponto é a resistividade da água em si, mais bem ilustrado pela Figura 6.

Figura 6 - Resistividade de água em função da temperatura (Visacro Filho, 2016).



Ou seja, quanto maior a temperatura, menor a resistividade da água e, conseqüentemente, menor a resistividade do solo. Ou seja, um solo cuja umidade é mantida

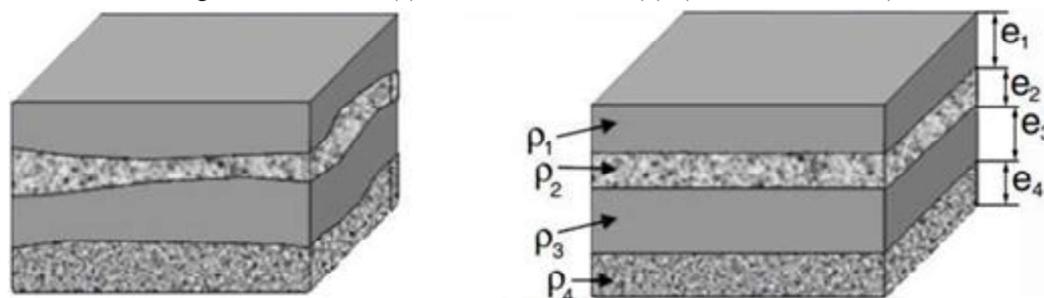
constante, terá menores valores de resistividade em temperaturas mais elevadas (Visacro Filho, 2016).

2.4 MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

Os solos são materiais que resultam do intemperismo químico e/ou físico das rochas; sua formação é então uma junção de diversos fatores, entre eles a origem da rocha, clima local, tempo e, nesse processo, é formado seus diferentes horizontes (Caputo, 1998).

Estes horizontes (ou camadas) distintas, advindos de sua formação geológica e, cada uma dessas camadas apresentam características e profundidades próprias (Calixto, 2012). Assim, o valor da resistividade do solo é determinado através de medições que recebem tratamento matemático para que seja possível obter a estratificação em camadas horizontais ou paralelas, cujas resistividades e espessuras (e) são definidas (NBR 7117-1, 2020), conforme Figura 7.

Figura 7 - Solo real (a) e solo estratificado (b). (NBR7117-1, 2020)



A medição da resistividade pode ser obtida através de amostragem ou por medição local (Paiva, 2021).

O método de medição por amostragem é realizado em laboratório, onde as curvas de resistividade em função da quantidade de água adicionado ao solo é medida. Além disso, em laboratório verifica-se também o comportamento da resistividade em função da quantidade de água e ensaios de capacidade de retenção de água que representa a umidade que o solo terá em sua maior parte do tempo. Entretanto, uma vez que esse método não foi utilizado dentro do trabalho, sua metodologia não será aqui explorada.

Já o método de medição local consiste na verificação em loco da região onde se pretende realizar a implantação do sistema de aterramento. Para isso, alguns critérios devem ser levados em consideração como a área do terreno, espaço disponível para a instalação e o melhor método

que deve ser adotado. Para a realização deste trabalho foi adotado a técnica de medição local através do método proposto por Frank Wenner e regulamentado pela norma NBR 7117-1 (ABNT NBR 7117,2020).

Conforme proposto pela NBR7117-1 (2020), é desejável que a realização seja realizada no período do ano onde o clima é mais seco na região de estudo, pois deve ser considerado a variação sazonal da resistividade da superfície do solo por influência da umidade e a sazonalidade dos períodos chuvosos, pois estes pontos interferem nas leituras por variar a condutividade elétrica do solo.

Para a distribuição dos pontos onde devem ser cravados os eletrodos com a finalidade de analisar o solo é regulamentado pelo item 5.3.3 Condições básicas a serem observadas nas sondagens elétricas verticais da presente norma. Como para esse estudo foi adotado o método de Frank Wenner, se faz necessário aplicar o item 5.3.3.5 que trata sobre a distribuição dos pontos onde devem ser cravadas os eletrodos de medição. O item diz que para a formação do arranjo de Wenner, cada linha de medição deve abranger diferentes espaçamento entre os eletrodos e com cobertura máxima da região (diagonal) do terreno que deverá ser ocupado pela malha. Os espaçamentos devem ser prospectados com a distância entre si a partir 1 metro, se possível, em potencias de 2 (1m, 2m, 4m, 8m, 16m, 32m, 64m).

2.5 ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

Uma vez que o solo é constituído por diferentes camadas, conforme já afirmado e discutido no tópico 2.4, é necessário a utilização de uma modelagem em camadas horizontais para um eficiente dimensionamento de aterramentos elétricos (Paiva, 2021). Entre as opções de modelagem, destaca-se a modelo Wenner, proposto pelo cientista Frank Wenner, e que é aplicada na realização deste trabalho.

2.6 RESISTIVIDADE APARENTE

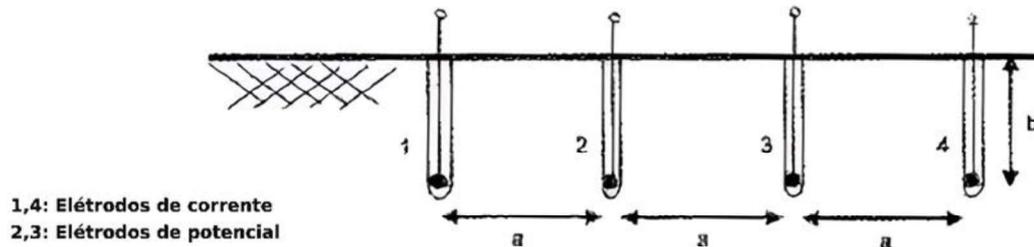
A resistividade aparente é a “resistividade vista por um sistema de aterramento qualquer, em um solo com característica de resistividade homogênea ou estratificado em camadas, cujo valor é utilizado para o cálculo da resistência de aterramento desse sistema” de acordo com as informações contidas na NBR 5410 (2004). Isso explicita que nem sempre uma malha com mais hastes irá obter uma melhor resposta quanto a resistência de aterramento (Paiva, 2021).

Além disso, a resistividade aparente trata-se do último passo quando se está dimensionando o sistema de aterramento pois, depois de calculado, basta calcular a resistência de aterramento de acordo com a geometria escolhida e as especificações relacionadas as hastes (Paiva, 2021).

3. METODOLOGIA

O método escolhido para este estudo foi o de Frank Wenner, que é amplamente utilizado para a medição da resistividade do solo, sendo fundamental para diversas aplicações em geofísica e engenharia. Para realizar essa medição, são cravadas quatro hastes cilíndricas no solo, dispostas em linha e igualmente espaçadas. É importante que o diâmetro das hastes não ultrapasse um décimo do espaçamento entre elas, e que todas atinjam a mesma profundidade como demonstra a Figura 8.

Figura 8 - Método de Frank Wenner, estacas cravadas ao solo (Kindermann e Campagnolo, 1995).



A corrente elétrica é injetada através dos terminais externos (hastes 1 e 4), enquanto a tensão resultante é medida entre os terminais internos (hastes 2 e 3). A partir dessa relação entre tensão e corrente, obtém-se um valor de resistência, denominado “R” (2).

$$\rho = KxR \quad (2)$$

Wenner demonstrou que existe uma relação linear entre a resistividade do solo e a resistência medida. O valor da constante geométrica K, que é crucial para essa relação, depende da configuração geométrica utilizada nas medições. O espaçamento entre as hastes, representado por ‘a’, e a profundidade das hastes, ‘b’, influenciam diretamente essa constante. Nas condições típicas de aplicação, o denominador da fração que compõe K varia entre 1 e 2, dependendo da relação entre a profundidade e o espaçamento (3).

$$K = \frac{4\pi a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}}} \quad (3)$$

Isso permite simplificações. Quando b é muito maior que a, o denominador aproxima-se de 1, resultando em uma forma simplificada (4):

$$\rho \cong 4\pi aR \quad (4)$$

E quando b é muito menor que a, o denominador aproxima-se de 2, resultando na segunda simplificação (5):

$$\rho \cong 2\pi aR \quad (5)$$

Sendo este o método utilizado para coletar e analisar os dados deste presente estudo. O método é dividido em 12 etapas, sendo ela:

Passo 1:

Cálculo da média aritmética (6) dos valores da resistividade elétrica para cada espaçamento.

$$\rho_M(a_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_i(a_j) \quad \forall \quad \begin{matrix} i=1,q \\ j=1,n \end{matrix} \quad (6)$$

Sendo que:

$\rho_M(a_j)$ – Resistividade média para o respectivo espaçamento a_j ;

n – Número de medições efetuadas para o respectivo espaçamento a_j ;

$\rho_i(a_j)$ – Valor da i -ésima medição da resistividade com o espaçamento a_j ;

q – Número de espaçamentos empregados.

Passo 2:

Proceder o cálculo do desvio de cada medida em relação ao valor médio;

a) Observação (a): Deve-se desprezar todos os valores da resistividade que tenham um desvio maior que 50% em relação à média, isto é (7):

$$\frac{|\rho_i(a_j) - \rho_M(a_j)|}{\rho_M(a_j)} \cdot 100 \geq 50\% \quad \forall \quad \begin{matrix} i=1,q \\ j=1,n \end{matrix} \quad (7)$$

Sendo que:

$\rho_M(a_j)$ – Resistividade média para o respectivo espaçamento a_j ;

n – Número de medições efetuadas para o respectivo espaçamento a_j ;

$\rho_i(a_j)$ – Valor da i -ésima medição da resistividade com o espaçamento a_j ;

q – Número de espaçamentos empregados.

b) Observação (b): Se o valor da resistividade tiver o desvio abaixo de 50% o valor será aceito como representativo.

c) Observação (c): Se observada a ocorrência de acentuado número de medidas com desvios acima de 50%, recomenda-se executar novas medidas na região correspondente. Se a ocorrência de desvios persistir, deve-se então considerar a área como uma região independente para efeito de modelagem.

Passo 3:

Caso tenha sido desprezado algum valor, deve-se recalcular a resistividade média.

Passo 4:

Traçar a curva ρ x a , obtida pela medição em campo pelo método Wenner;

Passo 5:

Prolongar a curva ρ x a até interceptar o eixo das ordenadas - obter o valor de ρ_1 ;

Passo 6:

Traçar a assíntota no final da curva ρ x a e prolongá-la até o eixo das ordenadas: obter o valor de ρ_2 ;

Passo 7:

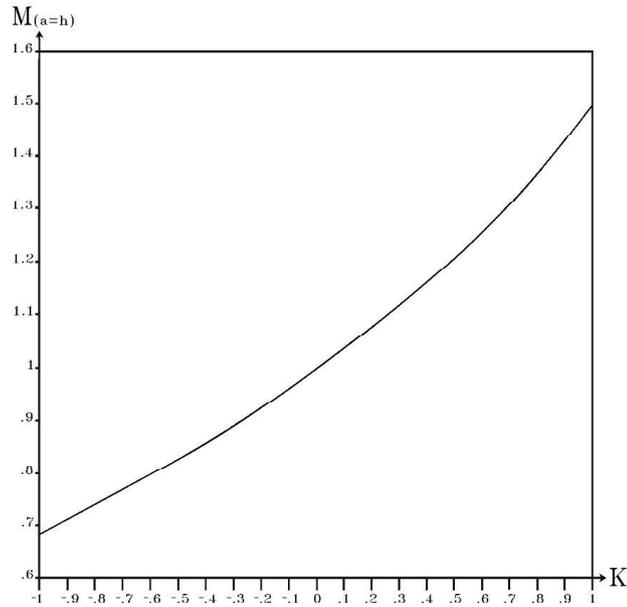
Calcular o coeficiente de reflexão K (8);

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad \text{Onde, } -1 < K < 1 \quad (8)$$

Passo 8:

A partir do valor de K (4º passo) determinar o valor de $M_{(a=h)}$ na curva da figura 3.7.3: Curva $M_{(a=h)}$ versus K do livro Aterramentos Elétricos 3º Edição modificada e ampliada de Kindermann e Campagnolo (1995).

Figura 9 - Curva $M_{(a=h)}$ versus K. Adaptado de Kindermann e Campagnolo (1995).

**Passo 9:**

Calcular $\rho(a=h) = \rho_1 \cdot M(a=h)$ (9):

$$\rho_{(a=h)} = \rho_1 \cdot M_{(a=h)} \quad (9)$$

Passo 10:

Com o valor de $\rho(a=h)$, determinar o valor da profundidade h (da primeira camada do solo) a partir da curva $\rho \times a$.

Passo 11:

Deve se calcular a resistência a terra de uma única haste, através da equação (10):

$$R_{1haste} = \frac{\rho_a}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{d}\right) \quad [\Omega] \quad (10)$$

Sendo que:

ρa – Resistividade aparente do solo [$\Omega.m$];

L – Comprimento da haste [m];

d – Diâmetro do círculo equivalente à área da secção transversal da haste [m].

Passo 12:

Neste passo, deve-se calcular o Índice de Aproveitamento ou Índice de Redução (K). Os valores de K são tabelados, conforme a Tabela de hastes paralelas, alinhadas e igualmente espaçadas, disponível na Tabela A.0.5 do Apêndice A do livro Aterramento Elétrico (3ª edição, modificada e ampliada), de Geraldo Kindermann e Jorge Mário Campagnolo, publicado em 1995. A adaptação dessa tabela é apresentada na Tabela 2:

Tabela 2 - Tabela de hastes paralelas, alinhadas e igualmente espaçadas (Adaptado de Kindeman e Campagnolo, 1995)

$L = 2,4m$ $d = \frac{1''}{2}$ $R_{1haste} = 0,44\rho a$								
Espaçamento	2,5m		3m		4m		5m	
Número de Hastes	R_{eq} [Ω]	K						
2	0,248 ρa	0,564	0,244 ρa	0,555	0,239 ρa	0,543	0,235 ρa	0,535
3	0,178 ρa	0,406	0,174 ρa	0,395	0,168 ρa	0,381	0,164 ρa	0,372
4	0,141 ρa	0,321	0,136 ρa	0,310	0,130 ρa	0,297	0,127 ρa	0,288
5	0,118 ρa	0,268	0,113 ρa	0,258	0,107 ρa	0,245	0,104 ρa	0,236
6	0,102 ρa	0,231	0,097 ρa	0,221	0,092 ρa	0,209	0,088 ρa	0,201
7	0,090 ρa	0,204	0,085 ρa	0,195	0,080 ρa	0,182	0,077 ρa	0,175
8	0,080 ρa	0,183	0,076 ρa	0,174	0,071 ρa	0,162	0,068 ρa	0,155
9	0,073 ρa	0,166	0,069 ρa	0,157	0,064 ρa	0,147	0,061 ρa	0,140
10	0,067 ρa	0,152	0,063 ρa	0,144	0,059 ρa	0,134	0,056 ρa	0,127
11	0,062 ρa	0,140	0,058 ρa	0,133	0,054 ρa	0,123	0,051 ρa	0,117
12	0,057 ρa	0,131	0,054 ρa	0,123	0,050 ρa	0,114	0,048 ρa	0,108
13	0,054 ρa	0,122	0,051 ρa	0,115	0,047 ρa	0,106	0,044 ρa	0,101
14	0,051 ρa	0,115	0,048 ρa	0,108	0,044 ρa	0,100	0,041 ρa	0,094
15	0,048 ρa	0,109	0,045 ρa	0,102	0,041 ρa	0,094	0,039 ρa	0,089

Por meio da Tabela 2, encontra-se o índice de redução K , conforme demonstra a equação (11):

$$K = \frac{R_{eq}}{R_{1haste}} \quad (11)$$

Após encontrar o valor do índice de redução K , deve-se olhar o valor correspondente na tabela citada anteriormente e encontrar o número de hastes necessárias para as características do solo em estudo.

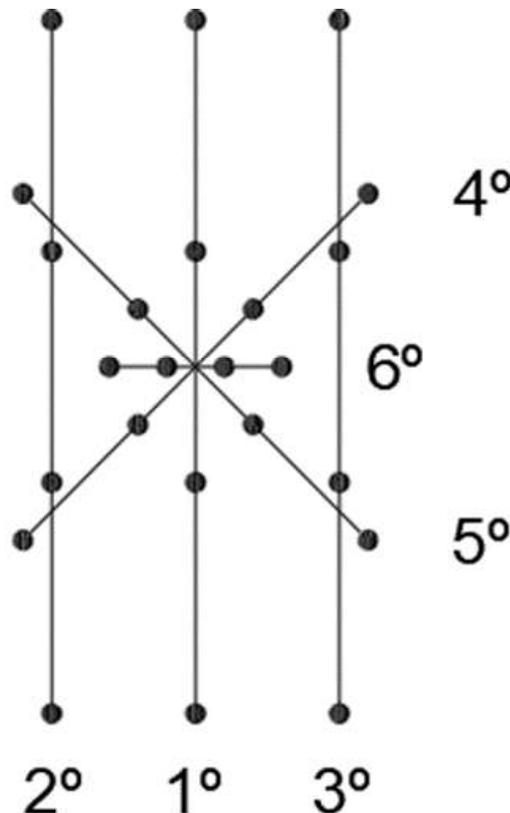
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o dimensionamento do aterramento do sistema foi escolhida uma área circunvizinha a edificação localizada na região sudeste de Trindade – GO. Executou-se o procedimento de estratificação do solo durante o período de estiagem entre os meses maio e junho do presente ano. Com isso, foi considerado uma região limitada e livre ao lado da edificação com cerca de 136 m² local esse para ser apurado os elementos de resistividade (ρ).

Foi realizada a distribuição dos pontos onde foram inseridos os eletrodos para a realização das medições de acordo com o que foi apresentado no item 2.4. Os pontos de medição foram realizados em seis retas, tendo comprimentos em 2 metros, 4 metros e 8 metros de distância entre as hastes.

É importante frisar que na 1^o, 2^o e 3^o reta coletamos dados em até 8 metros de distância, na 4^o e 5^o a medição teve distância máxima entre as hastes de 4 metros e a 6^o reta de 2 metros, isto se deu pela limitação da área da coleta dos dados, como demonstra a Figura 10, desenvolvida a partir de diretrizes apresentadas na NBR 7117-1 (2020).

Figura 10 - Pontos máximos de distancias entre as hastes. Autoria própria (2024)



Dado a limitação determinada para o espaço foi necessário ter medições entre distâncias de hastes distintas para algumas retas, conforme demonstra a Tabela 3.

Tabela 3 - Espaçamento para os pontos de medição

RETAS	DISTÂNCIA MÁXIMA ENTRE AS HASTES
1°	8
2°	8
3°	8
4°	4
5°	4
6°	2

Com os pontos de inserção dos eletrodos já estipulados, deu-se sequência nos procedimentos, sendo estendida sobre o solo uma fita métrica para demarcar as posições das retas antes do cravamentos dos eletrodos. Após a demarcação, realizou-se o processo de cravação das hastes para leitura, sendo feitas seguindo as estipulações dos pontos descritos na Tabela 3. A Figura 11 ilustra como foi realizado o processo de cravação dos eletrodos no solo para a medição da resistividade.

Figura 11 - Imagem da cravação dos eletrodos no solo. Autoria própria (2024).



Já a Figura 12 traz informações sobre os valores lidos pelo equipamento após ter sido inserida as quatro hastes no solo dentro dos pontos previstos e descritos anteriormente.

Figura 12 - Leitura realizada pelo equipamento. Autoria própria (2024).



Após a realização das leituras em campo, obtivemos os seguintes resultados dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Lista de resultados das leituras em campo. Autoria própria (2024)

MEDIÇÕES COLETADAS						
HASTES A (m)	RESISTIVIDADE [Ω .m]					
	1° (ρ)	2° (ρ)	3° (ρ)	4° (ρ)	5° (ρ)	6° (ρ)
1m	104 Ω .m	126 Ω .m	132 Ω .m	1164 Ω .m	1159 Ω .m	148 Ω .m
2m	106 Ω .m	81 Ω .m	118 Ω .m	1161 Ω .m	1154 Ω .m	99 Ω .m
4m	67 Ω .m	8 Ω .m	62 Ω .m	1161 Ω .m	1155 Ω .m	-
8m	26 Ω .m	53 Ω .m	19 Ω .m	-	-	-

Observação: Nos espaços sem valores, denotados por “-” não foi possível a realização das medições por limitação física do espaço.

Após realizar as medições e registrar os dados, avançamos para a etapa de tratamento das informações coletadas seguindo os 12 passos proposto por Kindermann e Campagnolo (1995).

Passo 1:

Cálculo da média aritmética dos valores da resistividade elétrica para cada espaçamento.

Passo 2:

Proceder o cálculo do desvio de cada medida em relação ao valor médio.

Passo 3:

Caso tenha sido desprezado algum valor, deve-se recalculer a resistividade média. A Tabela 5 representa os valores encontrados, o valor médio calculado e os valores que devem ser desprezados. Já Tabela 6 representa a tabulação dos valores calculados nos passos 1, 2 e 3.

Tabela 5 - Valores de Resistividade Coletados, com valores desprezados em negrito. Autoria própria (2024)

ANÁLISE MEDIÇÕES COLETADAS								
HASTES A (m)	RESISTIVIDADE [$\Omega.m$]						Média (ρ)	Média x 1,5 (ρ)
	1° (ρ)	2° (ρ)	3° (ρ)	4° (ρ)	5° (ρ)	6° (ρ)		
1m	104 $\Omega.m$	126 $\Omega.m$	132 $\Omega.m$	<u>1164 $\Omega.m$</u>	<u>1159 $\Omega.m$</u>	148 $\Omega.m$	472,16 $\Omega.m$	708,25 $\Omega.m$
2m	106 $\Omega.m$	81 $\Omega.m$	118 $\Omega.m$	<u>1161 $\Omega.m$</u>	<u>1154 $\Omega.m$</u>	99 $\Omega.m$	453,16 $\Omega.m$	679,75 $\Omega.m$
4m	67 $\Omega.m$	8 $\Omega.m$	62 $\Omega.m$	<u>1161 $\Omega.m$</u>	<u>1155 $\Omega.m$</u>	-	490,60 $\Omega.m$	735,90 $\Omega.m$
8m	26 $\Omega.m$	<u>53 $\Omega.m$</u>	19 $\Omega.m$	-	-	-	32,66 $\Omega.m$	49 $\Omega.m$

Observação: Nos espaços sem valores, denotados por (-) não foi possível a realização das medições. Números em negrito e sublinhados, foram desconsiderados, por serem \geq (maior ou igual) a média dos valores obtidos vezes 1,5 ou (150%).

Tabela 6 - Valores de resistividade recalculados. Autoria própria (2024)

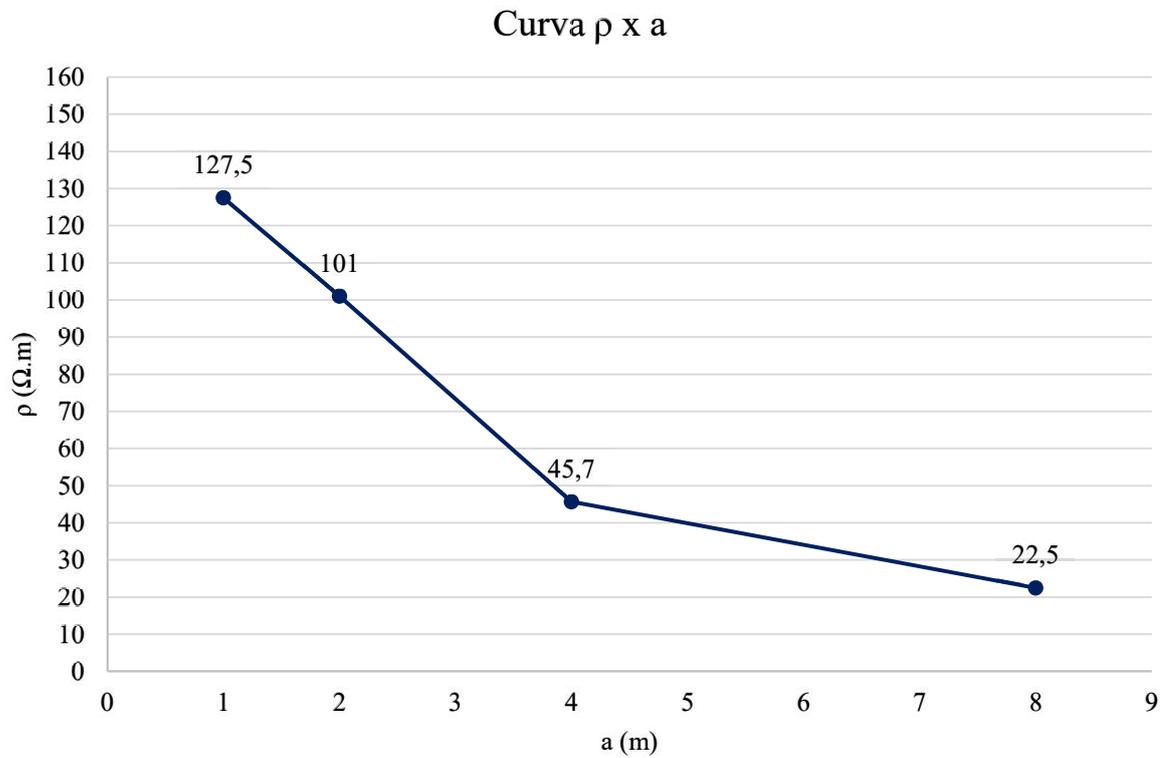
MÉDIA CALCULADA ($\Omega.m$)							
a (m)	1° (ρ)	2° (ρ)	3° (ρ)	4° (ρ)	5° (ρ)	6° (ρ)	Média (ρ)
1m	104 $\Omega.m$	126 $\Omega.m$	132 $\Omega.m$	<u>1164 $\Omega.m$</u>	<u>1159 $\Omega.m$</u>	148 $\Omega.m$	127,5 ρ
2m	106 $\Omega.m$	81 $\Omega.m$	118 $\Omega.m$	<u>1161 $\Omega.m$</u>	<u>1154 $\Omega.m$</u>	99 $\Omega.m$	101 ρ
4m	67 $\Omega.m$	8 $\Omega.m$	62 $\Omega.m$	<u>1161 $\Omega.m$</u>	<u>1155 $\Omega.m$</u>	-	45,7 ρ
8m	26 $\Omega.m$	<u>53 $\Omega.m$</u>	19 $\Omega.m$	-	-	-	22,5 ρ

Observação: A média foi calculada desprezando os valores sublinhados em negrito e os locais onde o valor não foi coletado, denotador por "-".

Passo 4:

Traçar a curva $\rho \times a$, obtida pela medição em campo pelo método Wenner;

Gráfico 1 - Curva $\rho \times a$. Autoria própria (2024)

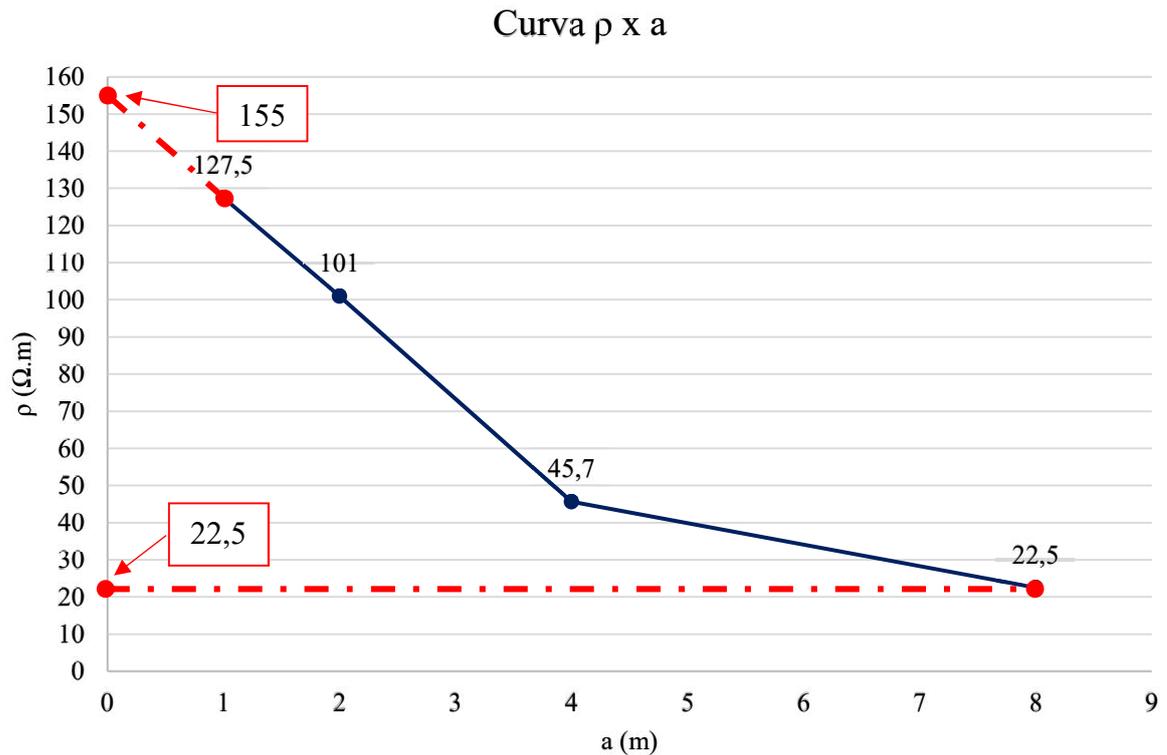
**Passo 5:**

Prolongar a curva $\rho \times a$ até interceptar o eixo das ordenadas - obter o valor de ρ_1 ;

Passo 6:

Traçar a assíntota no final da curva $\rho \times a$ e prolongá-la até o eixo das ordenadas: obter o valor de ρ_2 ;

Gráfico 2 - Prolongamento da curva até seus respectivos eixos. Autoria própria (2024)

**Passo 7:**

Calcular o coeficiente de reflexão K de acordo com a equação (8), temos assim a equação (12);

$$K = \frac{22,5 - 155}{155 + 22,5} = -0,746 \quad \text{Onde, } -1 < K < 1 \quad (12)$$

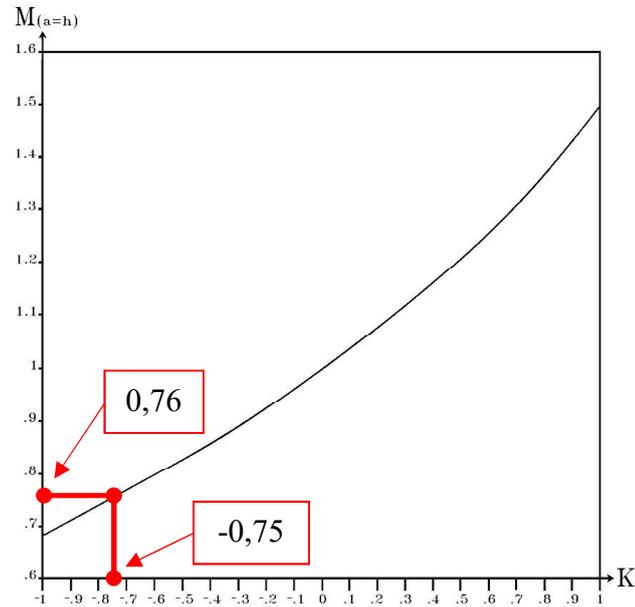
Sendo assim, podemos unir os valores em tabela, conforme visto abaixo:

Tabela 7 - Resultado do cálculo do fator K . Autoria própria (2024)

$\rho_1 - \Omega.m$	155
$\rho_2 - \Omega.m$	22,5
k	-0,75

Passo 8:

A partir do valor de K encontrado no passo anterior (7º passo), para determinar o valor de $M_{(a=h)}$ deverá ser realizado o rebatimento do valor de K na curva prevista na Figura 9 para encontrar o valor de M . Tendo isto em mente, pode ser determinado o valor de M .

Figura 13 - Rebatimento de K na Curva $M_{(a=h)}$ versus K.**Passo 9:**

Calcular $\rho(a=h) = \rho_1 \cdot M(a=h)$ (9);

$$\rho(a=h) = \rho_1 \cdot M(a=h)$$

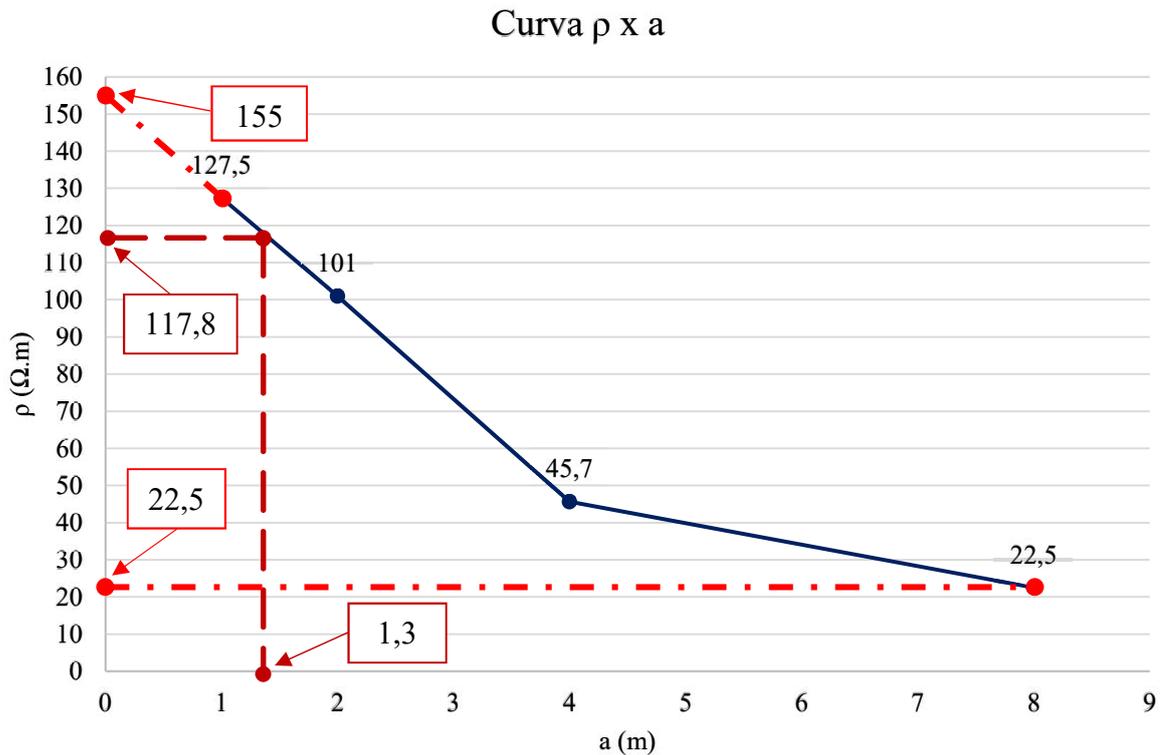
Sendo assim, podemos unir os valores em tabela, conforme visto na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultado do valor de $M_{(a=h)}$, destacado em negrito. Autoria própria (2024)

$\rho_1 - \Omega.m$	155
$\rho_2 - \Omega.m$	22,5
K	-0,75
M	0,76
$\rho(a=h) - \Omega.m$	<u>117,8</u>

Passo 10:

Com o valor de $\rho(a=h)$, determinar o valor da profundidade h (da primeira camada do solo) a partir da curva $\rho \times a$.

Gráfico 3 - Curva ρ x a , com a profundidade encontrada. Autoria própria (2024)

Tabelando os valores, temos como resultante a Tabela 9, a qual demonstra os resultados obtidos até então, e destaca o valor da profundidade encontrada em negrito:

Tabela 9 – Resumo de resultados calculados. Autoria própria (2024)

$\rho_1 - \Omega.m$	155
$\rho_2 - \Omega.m$	22,5
K	-0,75
M	0,76
$\rho_{(a=h)} - \Omega.m$	117,8
h - m	1,3

Passo 11:

Substituindo os valores calculados e aplicando na equação (10), é importante frisar que o diâmetro da haste deve estar em metros e o valor que temos é de $\frac{1}{2}$ ” e para transformá-la multiplicaremos seu valor por (0,0254), sendo assim, temos a (13):

$$R_{1haste} = \frac{155}{2\pi * 2,4} \ln\left(\frac{4 * 2,4}{0,5 * 0,0254}\right) = 68,127 \Omega \quad (13)$$

Assim, a resistência de aterramento de uma única haste é de 68,127 Ω .

Apesar de não haver mais um valor estipulado por normativas vigentes, vamos considerar para este estudo uma resistência de aterramento igual ou menor que 10 Ω para eletrodos não naturais.

Passo 12:

Agora se deve calcular Índice de aproveitamento ou índice de redução (K). Substituindo os valores calculados em (11), chegamos ao resultado:

$$K = \frac{10}{68,127} \cong 0,147 \quad (14)$$

Agora temos todos os valores necessários para escolher a disposição das hastes no terreno, no caso deste estudo em questão, temos bastante espaço em horizontal, sendo assim, é possível instalá-las em linha reta. Por questões de viabilidade foi considerada hastes de 2,4 metros sendo assim para o espaçamento entre as hastes foi escolhido 2,5 metros pelo espaçamento do local. A Tabela 10 demonstra as informações.

Tabela 10 - Tabela de hastes paralelas, alinhadas e igualmente espaçadas, com demarcação do número de hastes necessárias (Adaptado de KINDEMAN, CAMPAGNOLO. 1995).

ESPAÇAMENTO	$L = 2,4m$		$d = \frac{1''}{2}$		$R_{1haste} = 0,44\rho_a$			
	2,5m		3m		4m		5m	
NÚMERO DE HASTES	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K	$R_{eq} [\Omega]$	K
2	0,248 ρ_a	0,564	0,244 ρ_a	0,555	0,239 ρ_a	0,543	0,235 ρ_a	0,535
3	0,178 ρ_a	0,406	0,174 ρ_a	0,395	0,168 ρ_a	0,381	0,164 ρ_a	0,372
4	0,141 ρ_a	0,321	0,136 ρ_a	0,310	0,130 ρ_a	0,297	0,127 ρ_a	0,288
5	0,118 ρ_a	0,268	0,113 ρ_a	0,258	0,107 ρ_a	0,245	0,104 ρ_a	0,236
6	0,102 ρ_a	0,231	0,097 ρ_a	0,221	0,092 ρ_a	0,209	0,088 ρ_a	0,201
7	0,090 ρ_a	0,204	0,085 ρ_a	0,195	0,080 ρ_a	0,182	0,077 ρ_a	0,175
8	0,080 ρ_a	0,183	0,076 ρ_a	0,174	0,071 ρ_a	0,162	0,068 ρ_a	0,155
9	0,073 ρ_a	0,166	0,069 ρ_a	0,157	0,064 ρ_a	0,147	0,061 ρ_a	0,140
10	0,067 ρ_a	0,152	0,063 ρ_a	0,144	0,059 ρ_a	0,134	0,056 ρ_a	0,127
11	0,062 ρ_a	0,140	0,058 ρ_a	0,133	0,054 ρ_a	0,123	0,051 ρ_a	0,117
12	0,057 ρ_a	0,131	0,054 ρ_a	0,123	0,050 ρ_a	0,114	0,048 ρ_a	0,108
13	0,054 ρ_a	0,122	0,051 ρ_a	0,115	0,047 ρ_a	0,106	0,044 ρ_a	0,101
14	0,051 ρ_a	0,115	0,048 ρ_a	0,108	0,044 ρ_a	0,100	0,041 ρ_a	0,094
15	0,048 ρ_a	0,109	0,045 ρ_a	0,102	0,041 ρ_a	0,094	0,039 ρ_a	0,089

Conforme demarcado na Tabela 10, para este estudo a quantidade de hastes estipuladas é 11 hastes, distribuídas igualmente espaçadas em linha reta. A seguir, a Tabela 11 mostra que a sessão mínima da cordoalha a ser aplicada no sistema é de 50mm².

Tabela 11 - Seções mínimas dos materiais do SPDA (Adaptado de ABNT NBR 5419:2015).

MATERIAL	Captor e anéis intermediários (mm ²)	Descidas (para estruturas de altura até 20 m) (mm ²)	Descidas (para estruturas de altura superior a 20 m) (mm ²)	Eletrodo de aterramento (mm ²)
COBRE	35	16	35	50
ALUMÍNIO	70	25	70	-
AÇO GALVANIZADO A QUENTE OU EMBUTIDO EM CONCRETO	50	50	50	80

Já a Figura 14 ilustra a região do estudo e demarca o local onde deve ser instaladas as hastes da malha, sendo elas delimitadas na área com coloração de marrom clara.

Figura 14 - Demonstração da região onde deverá ser instaladas as hastes do sistema de aterramento. Autoria própria (2024)



Podemos inferir então que para a região de interesse analisada, devemos então instalar 11 hastes de cobre de 2,4 metros de comprimento e diâmetro de ½”, sendo interligadas por condutor de cobre trançado de 50 mm² ao qual deve conectar todas as hastes por meio de

(Conector GTDU, conector a compressão ou solda exotérmica), tendo em vista que todo esse sistema deve ser integrado ao sistema de proteção da própria edificação, conforme Figura 15.

Figura 15 - Detalhe da instalação das hastes próximo a edificação. Autoria própria (2024).



5. CONCLUSÃO

A conclusão deste trabalho permitiu consolidar os fundamentos técnicos relacionados ao dimensionamento de sistemas de aterramento com base no método de Frank Wenner, ressaltando sua metodologia na análise de resistividade do solo. Os resultados obtidos, considerando o cenário apresentado e a região de interesse, evidenciaram que, mesmo diante das adversidades delimitadas pela área disponível, foi possível determinar uma solução otimizada e técnica para a implantação do sistema de aterramento.

Aplicando a metodologia proposta, concluiu-se que a correta implantação da malha de aterramento exige o uso de 11 hastes com comprimento de 2,4 metros, dispostas em linha reta e espaçadas a uma distância de 2,5 metros entre si.

A partir disso, foram estabelecidos parâmetros que não apenas asseguram a conformidade com as normas técnicas vigentes, mas também garantem a eficiência e a segurança do sistema projetado. Dessa forma, o trabalho reafirma a relevância de uma engenharia embasada em métodos científicos robustos e adaptáveis, especialmente para situações com restrições físicas ou ambientais.

Por fim, os resultados apresentados contribuem diretamente para a prática da engenharia elétrica, estabelecendo um referencial técnico confiável para projetos futuros e reforçando a importância de soluções personalizadas que atendam às exigências de um setor em constante evolução.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**: Instalações Elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419**: Proteção contra Descargas Atmosféricas. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117-1**: Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos- Parte 1: Medição da resistividade e modelagem geolétrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

BRASIL. **Lei nº 11.337, de 26 de julho de 2006**. Determina a obrigatoriedade de as edificações possuírem sistema de aterramento e instalações elétricas compatíveis com a utilização de condutor-terra de proteção, bem como torna obrigatória a existência de condutor-terra de proteção nos aparelhos elétricos que especifica. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 26 jul. 2006. Disponível em: <<https://tinyurl.com/4zcyj5zk>>. Acesso em: 10/08/2024.

CALIXTO W. P., MARTINS NETO L., WU M., MACHADO FILHO H. B., “**Horizontal stratification of the soil in multi-layer using non-linear optimization**”. Revista Ciências Exatas e Naturais, vol. 11, no. 1, pp. 67-89, 2009.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6. ed., v. 1. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 1988.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. 3. ed. Rio Grande do Sul: Sagra D.C Luzzatto, 1995.

PAIVA, Gustavo Raphael Alves. **Análise teórica-experimental do comportamento de topologias clássicas de aterramentos elétricos conhecidos quando interligadas entre si: um estudo de caso**. 2021. 153 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Ciências e Tecnologia de Goiás, Itumbiara, 2021. Disponível em: <<https://tinyurl.com/yc8j4rnx>>. Acesso em: 06 novembro 2024.

PINHEIRO, Tiago Figueira Leão. **Sistemas de aterramento em baixa tensão**. 2013. 102 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro,

Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<https://tinyurl.com/4kmvu8z4>>. Acesso em: 06 maio 2024.

VIEIRA, Eliel Nery; CARNEIRO, Hugo da Silva; MOREIRA, Fernanda Silva. A Importância Do Aterramento Elétrico Na Segurança E Eficiência De Sistemas Elétricos. **Revista Ft**, [S.L.], v. 28, n. 139, p. 31-32, 31 out. 2024. Revista ft Ltda. Disponível em: <<https://tinyurl.com/3asm9w73>>. Acesso em: 01 dezembro 2024.

VISACRO FILHO, Silvério. **ATERRAMENTOS ELÉTRICOS**. São Paulo. Sp: Artliber, 2016. 159 p.